

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ,  
МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ СССР

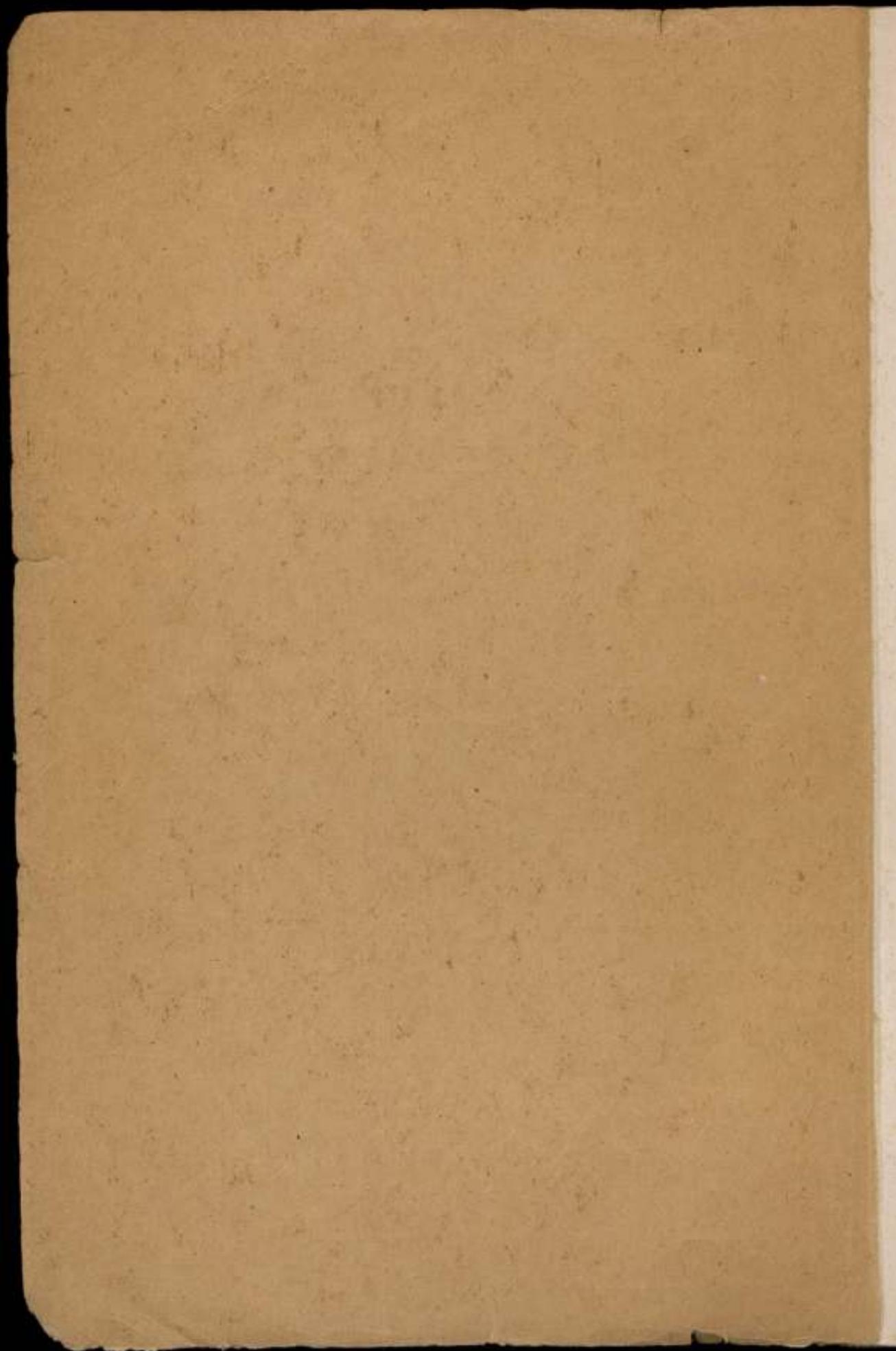
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ  
ИМ. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ  
РАБОТЫ В ОБЛАСТИ  
МЕТРОЛОГИИ

ТРУДЫ ИНСТИТУТОВ ГОСКОМИТЕТА  
ВЫПУСК 76 (136)



76 (136)



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ  
СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ СССР  
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
МЕТРОЛОГИИ им. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

---

№ 10284<sup>a</sup>  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ  
РАБОТЫ В ОБЛАСТИ  
МЕТРОЛОГИИ

ТРУДЫ ИНСТИТУТОВ ГОСКОМИТЕТА  
ВЫПУСК 76 (136)

*Под редакцией*  
д. т. н. Е. Т. ЧЕРНЫШЕВА



ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ  
МОСКВА — ЛЕНИНГРАД  
1965

Редакционный совет

П. Н. Агалецкий, К. К. Аглицев, Н. Н. Александрова,  
В. О. Арутюнов, С. В. Горбачевич, Е. Ф. Долинский,  
М. К. Жоховский, Л. М. Закс, В. В. Кандыба, Л. К. Каяк,  
И. И. Киренков, Д. К. Коллеров, Е. Т. Чернышев,  
К. П. Широков, Е. Г. Шрамков, Б. М. Яновский

Ответственный редактор  
д-р техн. наук проф. В. О. АРУТЮНОВ

1988/1

## ПРЕДИСЛОВИЕ

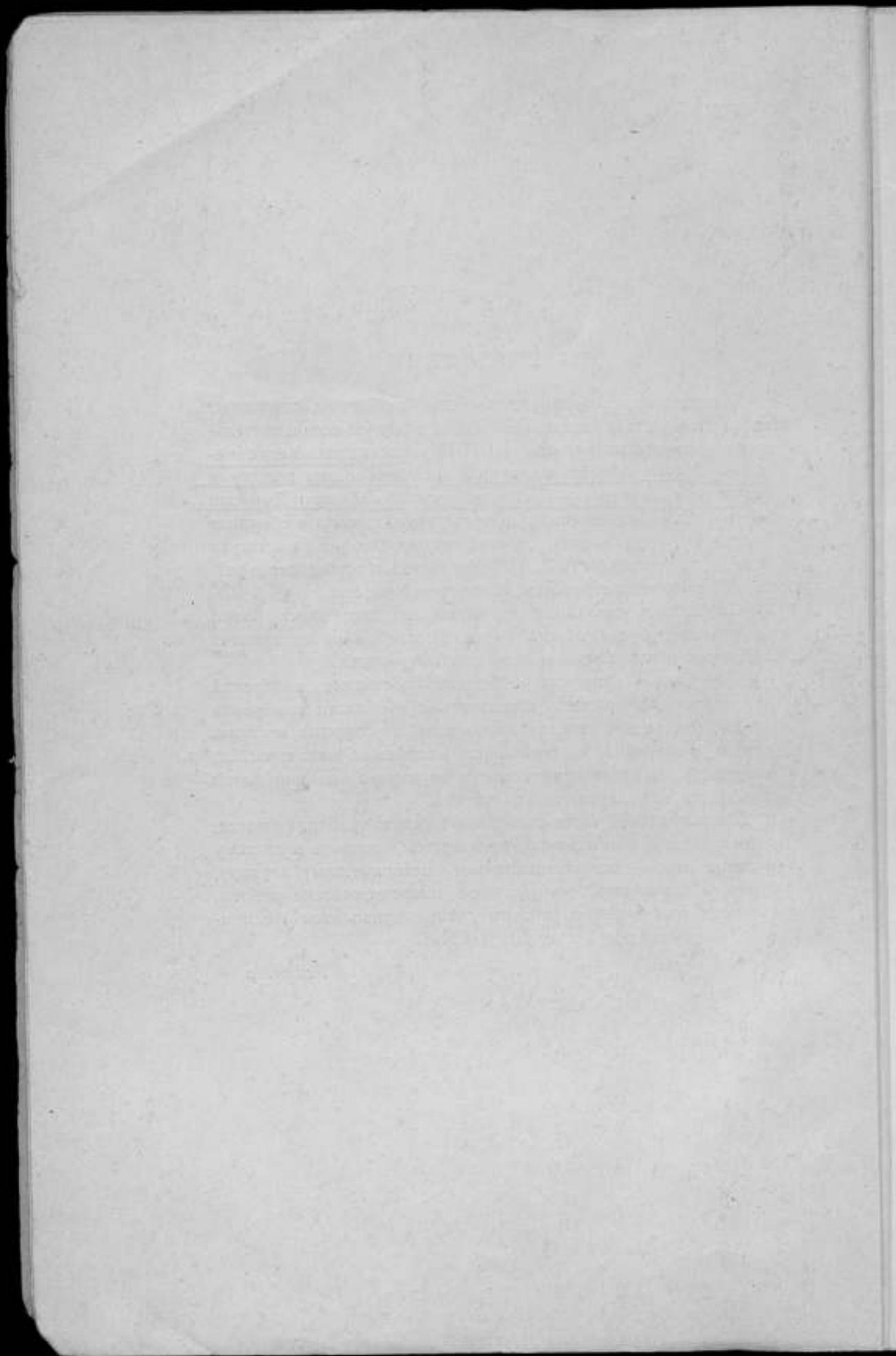
В настоящем сборнике помещены сообщения, сделанные на научной конференции Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии (ВНИИМ), посвященной его семидесятилетию юбилею и стотридцатилетию со дня рождения основателя института — великого русского ученого Дмитрия Ивановича Менделеева. Соответственно этому в сборнике содержатся сообщения, посвященные истории института и научной деятельности Д. И. Менделеева, и сообщения о развитии работ по метрологии за советский период.

Сообщения, сделанные на пленарных заседаниях, носят, естественно, более общий характер, сообщения на секциях относятся к специальным вопросам метрологии.

Материалы сборника освещают состояние измерений и достигнутый уровень точности как в области измерения длины, массы, времени, тепловых и температурных величин, так и измерений электрических, магнитных, механических, измерений физико-химического характера и измерений в области ионизирующих излучений.

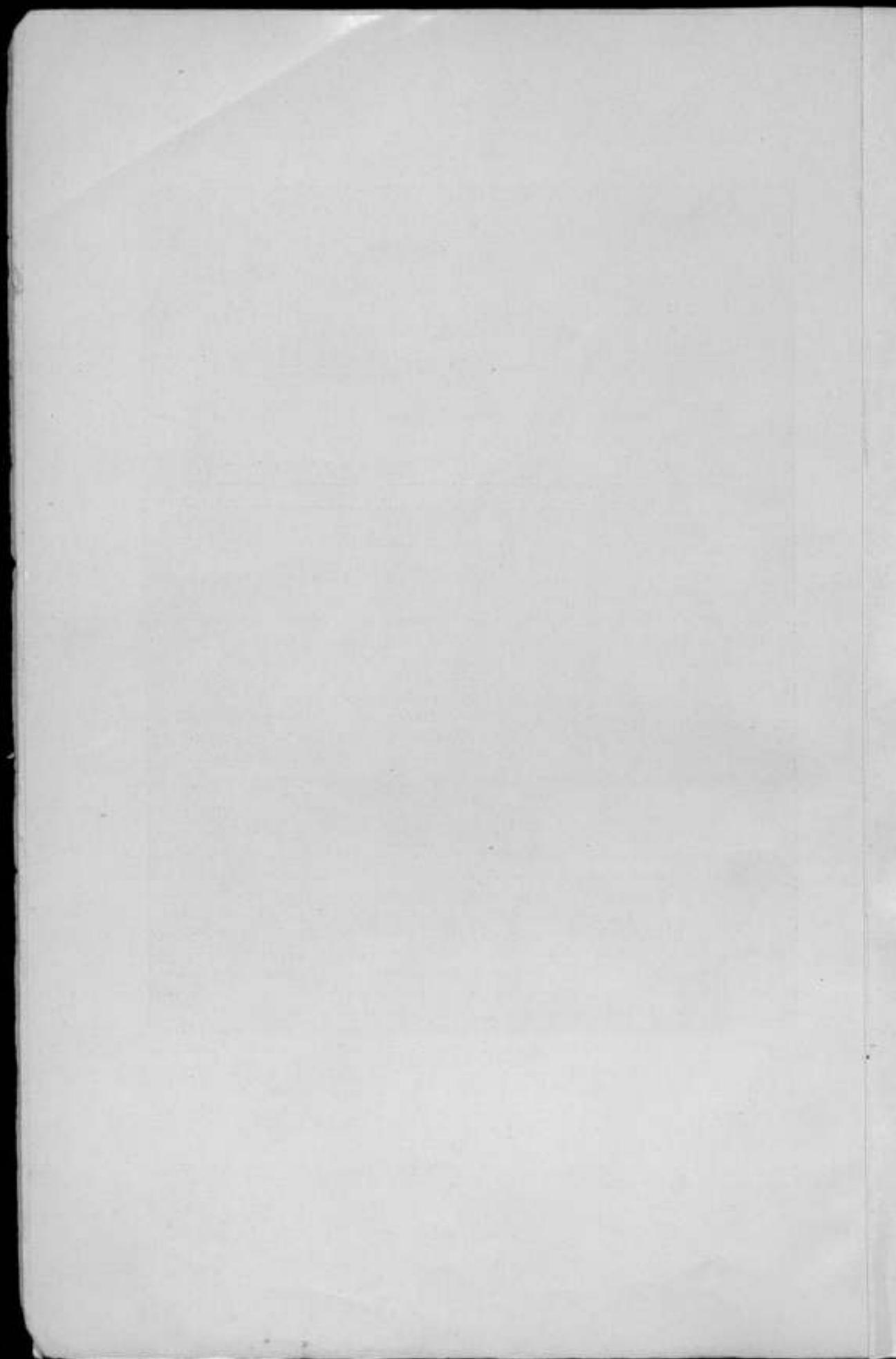
В исторической части сведения о мерах и приборах даются, естественно, в единицах прежних систем, включая и систему русских мер, — соответственно тому историческому периоду, когда проводились описываемые метрологические работы. По всем современным работам данные приводятся в единицах международной системы («СИ»).

*Редактор*





Дмитрий Иванович  
Менделеев



**130 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА  
И 70 ЛЕТ ВНИИМ***(Вступительное слово)*

8-го февраля 1964 г. исполнилось 130 лет со дня рождения великого русского ученого, естествоиспытателя Дмитрия Ивановича Менделеева, имя которого носит старейший в стране институт метрологии, отмечающий эту знаменательную дату.

Гениальный теоретик, экспериментатор, страстный патриот, человек широкого кругозора и кипучей энергии, Дмитрий Иванович посвятил жизнь насущным интересам своей страны, своего народа, русской науке и промышленности.

Д. И. Менделеев никогда не был кабинетным ученым, замыкающимся в своей лаборатории. Для него не существовало деления науки на «высшую» — теоретическую и «второстепенную» — прикладную. Вся деятельность Дмитрия Ивановича служит образцом творческих исканий и борьбы, направленных на развитие науки, ее связь с практикой.

Мировую известность принесла Менделееву созданная им периодическая система элементов. Его фундаментальная работа «Основы химии» впервые в истории одной из древнейших наук привела в систему разрозненные сведения и создала условия для дальнейшего развития химии на основе периодического закона.

Сам Д. И. Менделеев свою научную и практическую деятельность делил на три основных периода. Первые два — подготовительный (до 1861 г.) и университетский (до 1890 г.) — принесли ему славу глубокого ученого химика — теоретика и практика.

Третий период — так называемый палатский, — охватывающий последние 15 лет жизни Менделеева, полностью посвящен становлению и развитию метрологии, составляющей основу всех без исключения отраслей науки и техники.

Надо признать, к сожалению, что этот период жизни и деятельности Дмитрия Ивановича не так хорошо известен широкой общественности, как первые два. Между тем вклад Д. И. Менделеева в метрологическую науку оказал огромное влияние не только на развитие самой метрологии, но и создал исходные условия для успехов многих других отраслей отечественной науки.

Приход Д. И. Менделеева в Главную палату мер и весов не был случайным, а явился естественным следствием всей его предыдущей деятельности.

Глубоко понимая характер внутренней связи между состоянием метрологии и различных отраслей наук, всем развитием техники и хозяйства страны, Д. И. Менделеев весь свой талант, весь свой огромный

опыт и знания посвятил в последний период жизни делу отечественной метрологии. По существу, Менделеев определил и обеспечил пути развития этой науки на многие годы вперед.

Уже с первых дней работы в качестве руководителя Главной палаты мер и весов Д. И. Менделеев со свойственной ему энергией начал проводить в жизнь мысль о том, что метрология — это наука, требующая глубочайших фундаментальных исследований, развитие которой должно опережать и тем самым предопределять развитие других отраслей науки и техники.

В июне 1893 г. было утверждено положение о Главной палате мер и весов. Управляющим ее и одновременно членом Международного комитета мер и весов был назначен Д. И. Менделеев.

Много сил и внимания Дмитрий Иванович уделял преобразованию Депо образцовых мер и весов в передовое метрологическое научное учреждение. Было приобретено прекрасное оборудование для различных областей измерений и организован ряд новых лабораторий.

Уже в 1903 г. в Главной палате, кроме лабораторий мер длины и массы, имелись лаборатории элетроизмерительная, термометрическая, светоизмерительная, манометрическая, водомерная, газомерная и астрономическая.

Лаборатории были укомплектованы специалистами высокой квалификации, которые успешно работали над созданием эталонного и образцового измерительного хозяйства, усовершенствованном методике измерений и повышением их точности.

В этот период был установлен и тщательно отградуирован водородный термометр и определен с высокой точностью коэффициент расширения водорода; изготовлены эталонный барометр конструкции Д. И. Менделеева и его же конструкции образцовый манометр и образцовый серебряный вольтметр. Тогда же были определены технические условия для изготовления мер длины, сыпучих тел, жидкостей, гирь и весов с указанием допустимых погрешностей.

Д. И. Менделеев способствовал превращению метрологии в самостоятельную научную дисциплину — в раздел технической физики. Была начата техническая подготовка будущих поверителей и проверка их знаний.

Необходимо обратить особое внимание на методику работы знаменитого ученого в Главной палате мер и весов и основанные им методические указания.

При выполнении экспериментальных работ Менделеев придавал особенно большое значение получению надежных выводов не в результате увеличения числа измерений, а, как он говорил, разнообразия условий опытов и наблюдений и повышения их точности. «Лучше сделать, — писал он, — немногие, но точные и повторенные наблюдения, ... чем делать многие наблюдения...; притом необходимо... определить меру точности каждого данного». Д. И. Менделеев обращал также внимание на необходимость строгого, критического отношения к результатам измерений: «достойны внимания и обработки только те данные, где все влияния описаны или, несомненно, приняты во внимание».

Еще больше, чем погрешностей наблюдений, он опасался «погрешностей методов и соображений». «Прежде всего должна быть тщательно продумана методика измерений. Построение опыта, его разложение и приемы определяются основным рассуждением, определяющим собою принципы, а не наоборот, как это представляется иным. Во главе дела стоит соображение».

Метролог должен очень внимательно относиться к выбору средств измерения, всемерно повышать их точность, предотвращать посторонние влияния, а также хорошо знать теорию используемого прибора, практически анализировать и дополнять ее.

Как подлинный ученый, Д. И. Менделеев не ограничивал функции метрологов выполнением измерений с максимально возможной точностью, он подчеркивал значение обобщения и объяснения и стремился прежде всего выяснить «истинную физику дела», а затем «извлечь общие теоретические заключения», отмечал важную роль «освещения собранных наблюдений», «правильных объяснений и дальнейших обобщений» для достижения «умственной очевидности», которую противопоставлял «эмпирической очевидности».

Для весов Дмитрий Иванович установил законы измерения их «состояния», изменения продолжительности колебаний и изменений под влиянием нагрузки.

Работая в Главной палате, Менделеев успешно использовал различные научные методы и, в частности, метод гипотез и аналогии.

Какое же развитие получили в дальнейшем метрологические работы Д. И. Менделеева?

Вопрос о введении метрической системы мер был принципиально решен уже декретом СНК РСФСР от 14 сентября 1918 г.; эта система была успешно внедрена за сравнительно короткий промежуток времени при деятельном участии Главной палаты мер и весов.

К этому времени персонал Главной палаты мер и весов прошел строгую школу точного эксперимента и накопил большой опыт. Было создано также ценное метрологическое оборудование.

На этой основе Главной палатой, а в дальнейшем ВНИИМ, довольно успешно решалась поставленная Менделеевым задача создания научной метрологической базы в стране. Было открыто много новых лабораторий, освоены и обеспечены эталонами новые области измерений, усовершенствованы уже существовавшие эталоны, значительно повышены точность и пределы измерения, продолжало расширяться участие в международной метрологической работе, причем некоторые эталоны ВНИИМ, в частности вольты и омы, еще в 30-х годах были включены в состав международных эталонов.

Еще во времена Д. И. Менделеева Главная палата мер и весов разрабатывала и издавала нормативные документы, касавшиеся как самой Палаты и поверочных организаций, так и приборостроительной промышленности. При этом они охватывали не только приборы длины, объема, массы, веса, но и другие приборы, например электрические счетчики, технические условия для которых устанавливались Главной палатой. Эта работа в дальнейшем получила широкое развитие.

В 1922 г. при Главной палате был организован Комитет эталонов и стандартов под председательством президента Главной палаты академика Д. П. Коновалова (1856—1929) и с участием таких видных ученых, как академики Н. С. Куриаков и А. А. Байков, профессора М. А. Шателен, А. Д. Гатцук и др. Этот Комитет объединял и координировал работы по стандартизации в различных ведомствах, разработал ряд норм и стандартов в области метрологии, измерительной техники, машиностроения, металлургии, электротехники, железнодорожного транспорта и т. д.

Таким образом, можно считать, что высший объединяющий центр по стандартизации зародился в недрах Главной палаты мер и весов.

В 1930 г. был создан Всесоюзный комитет стандартизации при Совете Труда и Обороне (СТО), причем Главная палата и местные

поверочные учреждения перешли в его ведение. В связи с этим функции Главной палаты расширились, и в 1931 г. она была переименована во Всесоюзный институт метрологии и стандартизации (ВИМС).

Смысл этого объединения заключался в том, что метрология и стандартизация были сближены друг с другом как два основных начала в рационализации производства и овладения передовой техникой.

Юбилей Дмитрия Ивановича Менделеева нельзя рассматривать лишь как повод для перечисления его заслуг перед наукой и человечеством. Отдавая должное вкладу Д. И. Менделеева в науку, мы не имеем права забывать, что его наследие — это предмет глубокого изучения, развития и совершенствования.

Советские ученые — это люди самого передового в мире общества — общества, которое поставило своей целью достижение наивысшего уровня материальной и духовной культуры. С этой точки зрения наследие Д. И. Менделеева находится в надежных руках. Советские ученые с предельной бережливостью и вниманием изучают его и на этой основе неуклонно развивают, совершенствуют и приумножают достижения отечественной метрологии.

В принятой XXII Съездом Коммунистической партии Советского Союза программе создания материально-технической базы коммунизма поставлены грандиозные задачи по развитию производственных сил, ускорению технического прогресса, повышению качества продукции, развитию науки.

Для решения этих задач необходимо всесторонне критически проанализировать нашу деятельность, в том числе и существующий уровень стандартизации и измерительной техники.

Мы должны уметь анализировать сложившееся положение и на основе этого анализа по-новому, по-новаторски ставить и разрешать практические вопросы, особенно имея в виду их перспективное значение.

Это очень сложно и трудно, потому что большинство работников любой области всегда находится под влиянием традиций. Труден и процесс самокритичного анализа, а часто и отказ от традиций, от удовлетворенности ими.

С первых лет становления советской власти Партия и Правительство неоднократно занимались вопросами стандартизации и метрологии, стремились улучшить постановку их и создать наиболее благоприятные условия для работы в этой области.

В настоящее время подготавливаются мероприятия по резкому улучшению работы во всех областях, связанных со стандартизацией. Цель заключается в том, чтобы поднять стандартизацию до уровня тех требований, которые выдвигаются задачами коммунистического строительства.

Какие же задачи стоят перед нами в области стандартизации и как они связаны с общим народнохозяйственным планом создания материально-технической базы коммунизма?

Во-первых, мы должны самым решительным образом и в кратчайшее время ликвидировать существующий отрыв стандартизации от практических требований коммунистического строительства, т. е. превратить стандартизацию из самоцели в составную часть народнохозяйственных планов.

Нельзя дальше мириться с таким положением, при котором наращивание количественных темпов производства продукции зачастую происходит при полном невнимании к вопросам качества. Качество продукции, надежность и долговечность изделий должны быть неотъемле-

мой частью народнохозяйственных планов — иными словами, планировать нужно не только количество, но и качество.

Совершенно очевидно, что стандартизация как законодательство в вопросах качества и метрологии, как средство, обеспечивающее соблюдение этих законов, играет решающую роль.

Во-вторых, парадоксальным надо считать такое положение, когда при централизованном планировании и управлении народным хозяйством в стране существует многообразие нормативной технической и методической документации, определяющей качественные показатели продукции, методы контроля качества и испытания изделий и материалов.

Зачастую эти документы дублируют или противоречат друг другу, а иногда находятся на таком низком уровне, что не только не ориентируют на перспективное развитие, но и не отвечают требованиям сегодняшнего дня.

Наша неотложная задача — создать в стране единую систему нормативной и методической технической документации, обеспечивать и поддерживать единство методов и средств контроля качества продукции.

В-третьих, в стране чрезвычайно разрознена и действует разобщенно служба контроля за качеством продукции. По существу деятельность технического контроля на производстве безнадзорна.

Выполнение перечисленных задач потребует коренного пересмотра функций и плана развития всех звеньев нашей системы. Решение значительной части очень сложных проблем в этом направлении падает на долю метрологии во всех ее подразделениях — от высшего звена до звеньев, решающих конкретные прикладные вопросы технических измерений, анализов и испытаний.

Стандартизация как разновидность научной и хозяйственной деятельности обладает особенностью, которая ставит ее в исключительное положение. Нет такой отрасли народного хозяйства, начиная от фундаментальных научных исследований и кончая продажей продуктов населению, к которым стандартизация не имела бы прямого отношения. Нет такой технической или экономической задачи, в решении которой стандартизация в широком смысле слова не играла бы одной из первых ролей.

Как известно, программа КПСС предусматривает рост производительности труда в различных областях народного хозяйства в ближайшем будущем в 2—3 и даже в 4—5 раз. В решении этого вопроса роль стандартизации трудно переоценить.

Огромную роль стандартизации можно видеть на примере строительства, где стандартизация позволила внедрить индустриальные методы в области домостроения, сократить объем работ непосредственно на стройплощадках и за счет этого резко, в несколько раз повысить производительность труда.

Стандартизация и нормализация элементов оборудования различных машин и приборов, внедрение методов агрегатирования позволят широко развивать специализированное производство с более высоким уровнем автоматизации и механизации, с большей серийностью, а также резко сократить сроки проектирования и изготовления машин, значительно снизить трудоемкость производственных процессов и себестоимость нового оборудования.

Широкое внедрение в стране комплексной автоматизации и механизации производственных процессов совершенно немислимо без стандартизации.

Быстрая переналадка средств производства и контроля при смене объектов, внедрение автоматизации в серийное и мелкосерийное производство требуют совершенно новых принципов создания средства автоматизации. Только тогда автоматическое оборудование, автоматические линии и автоматические заводы будут себя оправдывать, если они будут комплектоваться из стандартных элементов независимо от функционального назначения технологического оборудования. Это должно стать законом для всех элементов схем автоматизации, начиная от датчиков и кончая исполнительными механизмами. Производство этих элементов должно быть организовано на специализированных предприятиях с тем, чтобы изготовление и сборка оборудования производились самими потребителями, заводами, что даст возможность резко сократить сроки и затраты на внедрение автоматизации и механизации.

Только стандартизация элементов средств производства и контроля открывает возможности для большей гибкости и мобильности производственных процессов, создает условия для многократного, а следовательно, полного использования этих средств.

Развитие нашего народного хозяйства связано с непрерывным усложнением оборудования. Комплексная автоматизация и механизация производственных процессов, введение в строй участков и целых предприятий с автоматическими линиями требуют создания систем, которые могут работать лишь при условии их надежности. Надежность систем может быть достигнута, в первую очередь, повышением надежности и качества отдельных их элементов.

Стандартизация и применение современных объективных методов контроля не только отдельных параметров, но и целых систем являются единственным средством обеспечения высокой надежности работы как элементов, так и систем в целом.

В наше время все большее значение приобретает счетно-вычислительная техника. Однако ее применение немыслимо без упорядочения всей системы управления. В частности, особо важное значение приобретает проблема кодирования, создание единой системы обозначения названий отдельных элементов конструкций и производственных процессов.

Возникает необходимость значительно расширить круг задач метрологии, а также государственной службы мер и измерительных приборов, которые до сих пор сводились к воспроизведению и хранению государственных эталонов единиц измерений и передаче их значений до рабочих мер и приборов.

Необходимо при этом подчеркнуть, что уровень измерительной техники является одним из решающих факторов развития современной науки и технического прогресса во всех отраслях народного хозяйства.

Достижения науки и техники в последние годы предъявили такие высокие требования к точности практических измерений, которые в ряде случаев сравнимы с требованиями к эталонным измерениям.

Новые отрасли техники требуют изыскания методов и разработки новых средств точных измерений, расширения диапазонов измерений от очень малых до весьма больших числовых значений величин, измерения параметров всевозможных систем и определения характеристик веществ в различных физических условиях. Особенно это необходимо в таких областях, как радиоэлектроника, атомная энергетика, ракетная техника, космическая навигация, современная химия, и в ряде других.

Развитие средств автоматического контроля и управления производственными процессами ставит перед метрологами принципиально

новые задачи по внедрению надежных средств измерения в этой области техники.

Очевидной является необходимость значительно расширить метрологические работы по развитию техники точных измерений в стране, разработку методов и средств испытания всевозможных материалов, определения физико-химических констант, разработку и эффективное внедрение в науку и производство прецизионных приборов и устройств.

Надо связать работы наших институтов по повышению точности и расширению пределов измерений с осуществлением крупных научных проблем, которые решаются в институтах Академии наук, оборонных комитетов и других научно-исследовательских организациях.

Мы имеем примеры положительной работы наших институтов в этом направлении. Так, например, институтами Госкомитета стандартов впервые в СССР разработаны и внедрены в производство образцовые оптические пирометры, температурные лампы, грузопоршневые манометры, нормальные элементы э. д. с., катушки сопротивления, измерительные мосты, потенциометры, ядерные измерители магнитного поля, комплекс измерительной аппаратуры для испытания ферромагнитных материалов, образцовые радиоизмерительные и многие другие уникальные приборы.

В свете поставленных задач, которые должны быть решены в самый ближайший период, роль научно-исследовательских институтов Госкомитета должна резко возрасти. Необходимо отметить, что объемы и тематика проводимых работ, материальная база научных исследований в наших институтах еще не соответствуют тому размаху, который должны приобрести работы по стандартизации.

Нам нужно серьезно продумать перспективу развития научно-исследовательских институтов, увязать ее с конкретными задачами построения материально-технической базы коммунизма и решением проблем научно-технического прогресса.

Очевидно необходимо в ближайший период создать крупные научно-исследовательские учреждения с мощной лабораторной базой и соответствующим составом научных кадров, способных обеспечить опережающее развитие всех направлений метрологии.

Институты и лаборатории Госкомитета располагают в настоящее время высококвалифицированным составом научных и инженерно-технических работников, что является той базой, на основе которой безусловно можно успешно решить задачи, связанные с развитием науки о стандартизации и измерениях, по расширению и углублению связи между метрологией и народным хозяйством, по изучению, развитию и приумножению большого и представляющего огромную ценность наследия Дмитрия Ивановича Менделеева.

В юбилейные дни празднования 130-летия со дня рождения Д. И. Менделеева и 70-летия со дня организации Главной палаты мер и весов — этого большого события в истории отечественной науки — преемники и продолжатели дела, которому Дмитрий Иванович посвятил лучшие творческие годы своей жизни, испытывают законную гордость и особенно остро сознают глубину ответственности, вытекающей из доверия, оказанного Партией, Правительством и народом. Есть все основания для выражения уверенности в том, что с возложенными на нас задачами мы успешно справимся и метрологическая наука внесет достойный вклад в дело построения коммунистического общества.

## Д. И. МЕНДЕЛЕЕВ — МЕТРОЛОГ

130 лет назад, 8 февраля 1834 г., родился великий русский ученый, гениальный мыслитель Дмитрий Иванович Менделеев.

Научная деятельность Д. И. Менделеева, как известно, чрезвычайно обширна и разнообразна; она прежде всего относится к химии, где им установлен основной закон мироздания — периодическая система элементов; эта система охватывает также области сельского хозяйства, промышленной экономики, нефтяного дела, метеорологии и, наконец, метрологии.

Не менее обширна и разнообразна деятельность Менделеева как педагога; почти всю жизнь он вел большую преподавательскую работу и часто одновременно в нескольких высших учебных заведениях. Написанные Менделеевым многочисленные учебники, учебные пособия и монографии, в которых излагаются принципы совершенно новых областей наук, свидетельствуют о его большой литературной деятельности и широте научных интересов. Наконец, огромная работа Менделеева как общественного деятеля — создателя Русского химического общества — показывает, что и в этой области он был незаурядным человеком. Вот почему невозможно коротко в одной статье охватить все стороны деятельности Д. И. Менделеева.

Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии, созданный Д. И. Менделеевым в 1893 г. как Главная палата мер и весов и ныне носящий его имя, естественно, должен взять на себя задачу изучить, широко популяризировать деятельность Менделеева как первого русского ученого — метролога и хотя бы в общих чертах дать обзор этой области его деятельности, охватывающей приблизительно 15 последних лет его работы.

## Краткие биографические сведения

Дмитрий Иванович Менделеев родился в Тобольске, в семье директора гимназии Ивана Павловича Менделеева. Он был семнадцатым ребенком в этой большой, дружной и трудовой семье. В 1834 г., как раз в год рождения Д. И. Менделеева, его отца постигло большое несчастье — он полностью потерял зрение и вынужден был оставить службу. И хотя после операции зрение вернулось к нему, он вышел на пенсию, и вся семья переехала в деревню Аремзянку, недалеко от Тобольска, где Менделеев провел свои детские годы и раннюю юность. Мать Менделеева, Мария Дмитриевна, получила доверенность на управление небольшим стекольным заводом в Аремзянке, принадлежавшим ее брату В. Д. Корнильеву. Таким образом, работа матери Менделеева

в качестве управительницы завода и весьма скудная пенсия отца были основными источниками жизни многочисленной семьи Менделеевых.

Когда Д. И. Менделееву было 15 лет и он окончил семилетний курс гимназии, на его семью обрушились новые несчастья: в 1847 г. скончался отец, в 1848 г. — сестра, в этом же году сгорел стекольный завод, и матери пришлось ликвидировать дела и покинуть Аремзянку. Семья Менделеевых распалась.

Необходимость пристроить последнего сына, которого Мария Дмитриевна любила «паче всех», заставила ее переехать в Москву к брату Корнильеву. Несмотря на связи и знакомства, Менделееву не удалось поступить в Московский университет, поскольку тогда существовало правило, по которому, окончив гимназию, можно было поступить в высшее учебное заведение, находившееся лишь в данном учебном округе. Поэтому Менделеев мог поступить только в Казанский университет. Однако в Казани у Менделеевых не было никого, и Мария Дмитриевна решила переехать в Петербург, надеясь на помощь влиятельных друзей. Здесь в 1850 г., после долгих хлопот, Менделеев был принят сверх нормы, «не в очередь», в Главное педагогическое училище с условием, что после окончания он должен будет прослужить в одном из учебных заведений министерства просвещения не менее двух лет за каждый год обучения в училище. В том же году Менделеева постигло горе — умерла его мать, а вскоре скончались дядя и вторая сестра, и он остался в Петербурге один, без средств, живя только на скудный «казенный счет» и подрабатывая уроками.

Годы учебы в Главном педагогическом училище оказались для Д. И. Менделеева чрезвычайно плодотворными. Благодаря исключительному профессорско-преподавательскому составу, а также и потому, что на младшем курсе училища он вынужден был пробыть не два, а три года, Менделеев получил очень солидные знания по всем основным предметам. Его учителями были: математик М. В. Остроградский, физик Э. Х. Ленц, химик А. А. Воскресенский, астроном А. Н. Савич и другие выдающиеся ученые того времени. Много лет спустя Менделеев признавал, что он «обязан Главному педагогическому училищу всем своим развитием».

Преподаватели училища неоднократно отмечали способности и усердие Д. И. Менделеева, его настойчивость в овладении знаниями.

В студенческие годы Менделеев опубликовал несколько заметок и обзоров об успехах в развитии наук.

Несмотря на частые недомогания (Менделеев в тот период болел чахоткой), он написал несколько оригинальных работ по зоологии, уделял большое внимание химии и минералогии и по поручению А. А. Воскресенского провел исследование по химическому анализу минералов ортита и пироксена; отчет об этом исследовании был напечатан в издании Русского минералогического общества. Тогда же Менделеев написал сочинение на тему «Изоморфизм в связи с другими отношениями кристаллической формы к составу», которое представил для получения степени кандидата. Это сочинение было издано отдельной книгой. Оно явилось в некоторой степени основой дальнейшей деятельности Менделеева.

Окончив Главное педагогическое училище с золотой медалью со званием старшего учителя, Менделеев из-за болезни получил направление на работу учителем Симферопольской гимназии. В Симферополе знаменитый хирург Н. И. Пирогов, обследовав Менделеева, совершенно успокоил его относительно здоровья и, как мы знаем, оказался прав.

Вскоре Д. И. Менделеев переехал в Одессу, где преподавал математику, физику и естественные науки в гимназии при Ришельевском лицее. Несмотря на то что обязанности учителя отнимали много времени (16 учебных часов в неделю), он усиленно готовился к магистерским экзаменам и в 1856 г. в Петербурге успешно защитил магистерскую диссертацию на тему «Удельные объемы».

Уже в следующем 1857 г., защитив специальную диссертацию («Строение кремнеземистых соединений») на право чтения лекций, Д. И. Менделеев получил должность приват-доцента химии Петербургского университета. С этого времени перед Менделеевым открылась широкая дорога научной деятельности в университете. В этот период он много работал над конспектами своих курсов, вел литературную работу, занимался подготовкой к печати ряда статей.

В начале 1859 г. Менделеев был командирован за границу для усовершенствования знаний в области химии и пробыл в Гейдельберге до 1861 г. Здесь, не удовлетворенный условиями работы в лаборатории Бунзена, где ему хотелось поставить ряд тонких физико-химических экспериментов, Д. И. Менделеев на свои средства создал небольшую домашнюю лабораторию. В ней были проведены исследования по измерению капиллярных сил, требовавшие особой тщательности выполнения и чистоты применяемых жидкостей. Для исследования сцепления жидкостей и опытов по определению их капиллярных свойств нужна была особая измерительная аппаратура высокой чувствительности. Для этих целей по заказу Менделеева был выполнен специальный катетометр. Выдающимся результатом экспериментальных работ Менделеева было открытие «критической температуры кипения» жидкостей.

В 1860 г. состоялся знаменитый Международный конгресс химиков в Карлсруэ, который, по словам самого Менделеева, оказался исключительно важным для разработки периодического закона. Вот что писал ученый по этому поводу: «Решающим моментом в развитии моей мысли о периодическом законе я считаю 1860 г. — съезд химиков в Карлсруэ, в котором я участвовал, и на этом съезде идеи, высказанные итальянским химиком С. Канницаро. Его я и считаю настоящим моим предшественником, так как установленные им атомные веса дали необходимую точку опоры. Я сразу же тогда заметил, что предложенные им изменения атомных весов вносят в группировки Дюма новую стройность, и идея возможной периодичности свойств элементов при возрастании атомного веса в сущности уже тогда мне представилась внутренне. Меня остановили, однако, оставшиеся несообразности в принятых тогда атомных весах; ясно осталось только убеждение, что в данном направлении надо работать».

По возвращении на родину Менделеев, наряду с большой педагогической деятельностью, занимается серьезным литературным трудом. В 1861 г. в феноменально короткий срок (3 месяца) он написал курс «Органическая химия» в 40 печатных листов, который был издан несколько раз и отмечен Академией наук полной Демидовской премией.

Д. И. Менделеев не занимал в университете штатной должности, поэтому физико-математический факультет возбудил ходатайство о назначении его экстраординарным профессором технической химии (вакантная должность). Однако министр просвещения отклонил это ходатайство на том формальном основании, что Менделеев не имел степени доктора. Истинная причина, скорее всего, крылась в том сочувствии, которое Д. И. Менделеев питал к бастующим студентам и их требованиям. Вообще, и тогда и позже, царская охранка особенно вни-

мательно следила за Менделеевым и считала его неблагонадежным элементом.

В 1865 г. Д. И. Менделеев подготовил обширное исследование «Рас- суждение о соединении спирта с водой», посвященное изменениям свой- ств соединений спирта с водой, и представил его в качестве докторской диссертации. После успешной защиты Менделеев занял должность сначала экстраординарного, а затем и ординарного профессора техни- ческой химии в Петербургском университете.

В период с 1868 по 1871 г. Менделеев, продолжая большую педаго- гическую и литературную деятельность, работает над созданием есте- ственной периодической системы элементов — основного закона химии, принесшего ему всемирную славу.

1 марта 1869 г. Д. И. Менделеев сдает в набор первую таблицу эле- ментов, которая была напечатана через несколько дней на русском и французском языках и разослана некоторым русским и иностранным ученым. 6 марта Н. А. Меншуткин от имени больного Менделеева докладывает на заседании Русского химического общества о системе элементов. Послав статьи по этому вопросу в иностранные журналы, Менделеев немедленно приступает к работе по уточнению некоторых, вызывавших сомнения атомных весов, для чего потребовались новые весьма тонкие измерительные эксперименты. В процессе дальнейшей систематизации элементов Менделеев преодолел много трудностей, выработал строго научные положения периодического закона и указал на возможность и неизбежность открытия новых элементов, места кото- рых в таблице пока пустовали. Ученый предвидел также все основные физико-химические свойства, которыми должны обладать эти элементы. Нам известно, что это предвидение блестяще подтвердилось уже через несколько лет, когда были открыты скандий, гелий, а затем германий, свойства которых поразительно точно совпали с предсказанными.

С этого времени начинается триумф Д. И. Менделеева, признание его мировым ученым, признание его главного детища — периодического закона. Отовсюду, изо всех стран мира, поступали восторженные отзывы крупнейших химиков и других ученых. Английский ученый В. Рамзай писал: «Примите, дорогой учитель, уверения в моем глубоком уважении и дань моего восхищения как Вашими трудами, так и Вами самими».

Один из видных английских историков химии Т. Е. Торпе так писал в 1889 г. о Менделееве: «Ни один русский не оказал более важного, более длительного влияния на развитие физических знаний, чем Мен- делеев. Способ работы и мышления у него настолько самобытен, его метод преподавания и чтения лекций так оригинален, а успех великого обобщения, с которым связаны его имя и слава, так поразительно полон, что в глазах ученого мира Европы и Америки он стал для России тем, чем Берцелиус для Швеции, Либих для Германии, Дюма для Франции».

Энгельс восторженно писал: «Менделеев, применив гегелевский закон о переходе количества в качество, совершил научный подвиг».

Триумф периодического закона стал триумфом и самого Менделеева. Он был избран членом ряда иностранных академий и ученых обществ, стал почетным доктором многих высших учебных заведений и, наконец, был избран членом-корреспондентом Петербургской академии наук (1876 г.).

Однако еще при жизни Менделеева периодический закон дважды подвергался испытаниям: первый раз в результате открытия Рэлеем

и Рамзаем инертных газов, второй — в связи с открытием радиоактивности и радиоактивных элементов. Тем не менее эти испытания естественная система Менделеева с честью выдержала, и после внесения некоторых дополнений (нулевой группы) периодический закон и приобрел стройный и законченный вид. В настоящее время периодический закон и вытекающие из него крупнейшие следствия являются одним из самых общих принципов науки.

Д. И. Менделеев был великим тружеником, он работал много и плодотворно, не теряя ни минуты, занимаясь самыми разнообразными вопросами. В период апогея деятельности Менделеева количество опубликованных им работ превосходило 200, причем в их числе были крупные монографии, капитальные труды и солидные трактаты.

Примечательно, что как раз в период напряженнейшей работы над проблемами естественной системы элементов, работы, насыщенной как теоретическими, так и экспериментальными изысканиями, Менделеев усиленно трудится над созданием трехтомного курса «Основы химии», первый том которого был издан в 1868 г., а последний, третий в 1871 г. Это был курс, содержащий богатый фактический материал и вместе с тем систематически излагающий основы неорганической химии. Курс впоследствии неоднократно переиздавался, при этом Менделеев его непрерывно совершенствовал и дополнял. Еще при жизни Менделеева было выпущено 8-е издание этого фундаментального сочинения. Сам ученый так оценивал свою работу: «Всего более четыре предмета составили мое имя: периодический закон, исследование упругости газов, понимание растворов как ассоциаций и «Основы химии». Тут все мое богатство. Оно не отнято у кого-нибудь, а произведено мной. Это мои дети, и ими, увы, дорожу сильно, столь же, как детками». «Эти «Основы» — любимое дитя мое. В них мой образ, мой опыт педагога и мои задушевные научные мысли».

Но перечисленным не исчерпывается огромный вклад Менделеева в науку. Известно, что к 1863 г. он начал большие работы, посвященные нефти, ее происхождению, проблемам добычи, переработки и транспортировки. В то же время, ведя эту серьезную работу, Менделеев вернулся к проблеме исследования растворов и установил ряд новых фундаментальных закономерностей. А впоследствии, занявшись основательно проблемами метрологии, и здесь оставил неизгладимый след, заложив основы отечественной науки.

В конце 1880 г. кандидатура Менделеева была выдвинута в члены Академии наук, но он был забаллотирован и имел намерение уйти из университета. Однако друзья уговорили его остаться, и это свое намерение Д. И. Менделеев осуществил позже, а именно в 1890 г. Поводом послужили студенческие выступления, в которых Менделеев решительно стал на сторону студентов. В результате оскорбительного отношения к нему министра просвещения графа Делянова, Д. И. Менделеев громко заявил о своем уходе и, дочитав курс, покинул университет, несмотря на настоятельную просьбу Ученого совета университета, а также коллективную просьбу студентов.

Вынужденный в связи с этим искать для себя «новое дело» Менделеев увлекся сначала проблемой создания особых типов бездымного пороха, а затем в 1892 г. принял предложение министра финансов Витте и занял должность ученого хранителя в Депо образцовых мер и весов. С этого времени Д. И. Менделеев приступил к выполнению большой программы метрологических работ и заслужил славу первого русского ученого-метролога.

## Заслуги Д. И. Менделеева в области метрологии

Для всей деятельности Менделеева характерны две важные особенности, получившие существенное развитие в его метрологической работе. Первая заключается в том, что для всех своих научных исследований, носивших в конечном итоге теоретический, обобщающий характер, Менделеев всегда стремился и достигал практического осуществления полученных научных результатов. Он всегда считал, что наука не отделима от практики, что наука без практического использования ее результатов на благо народа бесплодна. В знаменитых «Основах химии» Менделеев так определял цели и задачи науки: «У научного изучения предметов две основных и конечных цели: предвидение и польза...». И еще: «Высшую цель истинной науки составляет не просто эрудиция, т. е. описание, или знание, даже в соединении с искусством или умением, а постижение неизменяющегося — среды переменного и вечного — между временным, соединенное с предсказанием должствующего быть, но еще вовсе неизвестного, и с обладанием, т. е. возможностью прилагать науку к прямому пользованию для новых побед над природою».

Это убеждение Менделеева нашло яркое воплощение в его метрологических работах, где решение больших научных проблем всегда сочеталось с практическим претворением в жизнь теоретических результатов и выводов.

Другая особенность его деятельности состоит в том, что все свои теоретические гипотезы и обобщения он подкреплял широко поставленными экспериментальными исследованиями, основанными на тщательно организованных и точно выполненных измерениях. Здесь Менделеев также был верен высказанному им правилу, обязательному, по его мнению, для всякого научного исследования: «... измерять все то, что может подлежать измерению, показывать численное отношение изучаемого к известному, к категориям времени и пространства, к температуре, массе и т. п.; определять место изучаемого в системе известного, пользуясь как качественными, так и количественными сведениями». Во все периоды своей деятельности Менделеев сам разрабатывал методические вопросы измерений и конструировал измерительную аппаратуру. Еще в Гейдельберге (при изучении им капиллярности) в соответствии с его замыслом был изготовлен специальный новый прибор для измерения плотности жидкостей, известный под названием пикнометра Менделеева. Позже при выполнении фундаментальных исследований по упругости газов Менделеев получил точные значения объемов сжатых газов при точно измеренных значениях давлений и температур. Он сам сконструировал дифференциальный барометр — весьма чувствительный прибор для измерения разности давлений. Менделеев опубликовал ряд статей, специально посвященных вопросам измерений, в том числе: «Нефтяной и водородный термометры», «Новый вид ртутного барометра» и др. Выше указывались и его работы по уточнению атомных весов элементов, также связанные с измерениями. Менделеев сам производил многочисленные весьма тонкие измерения, выполнил множество расчетов по определению границ погрешности измерений, неоднократно выступал с докладами и статьями по вопросам точных измерений.

Весьма характерно в этом отношении выступление Менделеева еще в 1863 г. на первом съезде русских естествоиспытателей по поводу введения метрической системы. В этом выступлении он призывал к применению метрической системы в научных исследованиях и при преподавании. Менделеев говорил: «Станем употреблять ее постоянно в наших



научных исследованиях и только в случае нужды рядом будем означать наши обыкновенные меры и веса. Введем в наши лекции и уроки данные метрические, чтобы развить в наших слушателях привычку соображать по этой системе.

Снабдим наши кабинеты, лаборатории и музеи образцами мер и весов этой системы.

Станем требовать в школах знакомства с этой системой.

Все это возможно нам, и потому решаюсь обратиться на это внимание Съезда. Облегчим же и на нашем скромном поприще возможность всеобщего распространения метрической системы и через то поспособствуем и в этом отношении общей пользе и будущему желанному сближению народов. Нескоро, повемногу, но оно придет. Пойдем ему навстречу».

«Объединение народов, — говорил он, — остается мечтой мира и прогресса, пока не подготовлены к тому пути. До сих пор, кроме стихии, только печатное слово, торговля и наука скрепляют интересы народов. Это крепкие связи, но не всеисильные».

Он ратовал за единство мер и шел дальше, высказываясь за единство денежных систем (единство монет).

Все это показывает, что Д. И. Менделеев не случайно последние 15 лет своей жизни почти целиком посвятил метрологии. Приход в метрологию является закономерным следствием его научной деятельности и обусловлен тем исключительным значением для развития науки, какое имеет измерительная техника и ее высшее звено — метрология.

Ко времени начала работы Менделеева в Депо образцовых мер и весов дело метрологии в России было поставлено очень плохо. Клеймение мер длины и массы велось лишь в городах, городскими управами и притом практически без сличения с образцовыми мерами. Эталонное хозяйство было запущено.

Приступив к исполнению обязанностей ученого хранителя, Д. И. Менделеев поставил перед собой ряд задач, а именно:

а) полную реорганизацию системы метрологической службы в России;

б) воспроизведение (возобновление) русских прототипов мер;

в) проведение широкой программы научных исследований в области метрологии, в том числе таких, как: определение абсолютного значения ускорения силы тяжести, решение вопроса о точном взвешивании, определение веса литра воздуха, электрические измерения для уточнения электрических единиц, термометрические исследования и многие другие.

Для решения указанных задач Менделеев прежде всего решил реорганизовать Депо образцовых мер и весов, являвшееся в значительной степени учреждением музейного типа, в Главную палату мер и весов — в научно-исследовательский институт, главное метрологическое учреждение страны, призванное выполнять все необходимые научные исследования по метрологии. Ходатайство о реорганизации Депо было удовлетворено, и 1 июля 1893 г. Д. И. Менделеев был назначен управляющим Главной палаты мер и весов.

Приступая к практическому решению первой из намеченных задач, Менделеев прежде всего осуществил большие работы по определению состояния поверочного дела в стране. Проведенные с 1893 по 1897 г. во многих губерниях ревизии обнаружили полное запустение в поверочном деле и прямые злоупотребления. Взвешивание с помощью свинца, песка и камней было почти нормальным явлением, в некоторых городах для клеймения мер применяли гири двадцатилетней давности, давно утратившие свою истинную массу. В 15 губерниях поверка вообще не производилась.

Для изучения постановки поверочного дела за рубежом в Англию, Францию, Австрию и Германию были командированы сотрудники Главной палаты.

Была создана специальная правительственная комиссия по обработке и изучению полученных результатов. Выводы этой комиссии и выработанные ею предложения легли в основу нового положения о поверочном деле, изданного в 1899 г. Согласно этому положению предусматривалась организация местных «палаток», в обязанность которых должны были входить поверка и клеймение мер и весов. Постепенно такие палатки были созданы, и к концу жизни Д. И. Менделеева число их достигло 95.

Таким образом создавалась прочная база для обеспечения крайне необходимого единства мер и измерений в стране.

Однако Менделеев хорошо понимал, что для подлинного единства необходимо иметь в своем распоряжении систему эталонов, чтобы обеспечить правильность передачи рабочим мерам и приборам соответствующих единиц измерений. И, поскольку основными являлись единицы массы, длины и времени, Д. И. Менделеев сразу же принялся за организацию эталонного хозяйства именно для этих единиц.

Прежде всего было решено провести работы по возобновлению русских мер массы и длины, т. е. фунта и сажени. При этом Менделеев предложил возобновить не сажень, а аршин, что даст определенные преимущества для сличений этой меры с мерами, принятыми в других странах.

Работа по возобновлению русских мер слагалась из следующих элементов:

- а) установление размера новых мер длины и массы;
- б) установление новых мер массы и длины в качестве эталонов;
- в) изготовление некоторого количества образцов для практической работы с ними по передаче единиц рабочим мерам;
- г) сличение основных эталонных мер с аналогичными, по которым и была установлена тогдашняя система русских мер;
- д) сличение всех новых русских образцов между собой;
- е) определение соотношений между новыми русскими мерами и метрическими.

За основной размер единицы массы было решено принять платиновый фунт 1835 г., а за размер вновь изготавливаемого аршина — 28 дюймов, исходя из английского ярда (36 дюймов). Новые образцы мер длины и массы были изготовлены в Лондоне из того же сплава платины с иридием, из которого были изготовлены прототипы метрических мер (90% платины и 10% иридия). Кроме трех образцов аршина в виде штриховой меры X-образного сечения, по идее Д. И. Менделеева был еще изготовлен четвертый образец — полусажень, на который нанесены отметки для ярда, аршина, метра и полусажени, а также их подразделения (двоймы, вершки и сантиметры). Это представляло исключительные удобства для воспроизведения и хранения единиц длины всех трех систем. Эталон фунта было решено изготовить в виде цилиндра диаметром, равным высоте. Кроме того, Главная палата имела в своем распоряжении метр № 28 и килограмм № 12, полученные Россией в 1889 г. из Международного бюро мер и весов.

За короткий срок, с 1893 по 1899 г., был выполнен весь указанный выше комплекс работ, и 4 июня 1899 г. узаконены новые эталоны массы и длины. На основании результатов взаимных сличений Менделеев доложил Международному комитету мер и весов, членом которого

состоял, о соотношении между русскими, метрическими и английскими мерами.

Важно отметить, что, приступив к метрологической работе в качестве руководителя Главной палаты мер и весов, Д. И. Менделеев немало сделал для введения метрической системы. Уже основное положение от 4 июня 1899 г. об узаконении прототипа аршина и фунта содержало статью, допускающую применение метрических мер в торговых сделках, сметах, расчетах и т. д. Этим был сделан большой шаг по внедрению метрической системы. Как мы знаем, мечта Менделеева была полностью осуществлена лишь через 10 лет после его смерти одним из первых декретов советского государства.

Для решения всех вопросов, связанных с возобновлением эталона массы, Д. И. Менделеев создал лабораторию мер массы и добился оснащения ее первоклассным оборудованием. В частности, им были заказаны фирме Рупрехт (Вена) эталонные весы того же типа, что и изготовленные этой фирмой для Международного бюро. Эти весы были получены в 1895 г. и по настоящее время являются основным средством для самых точных измерений массы (погрешность порядка  $10^{-9}$  кг). В здании, в котором установлены весы, были предусмотрены массивные фундаменты, защищающие аппаратуру от вибраций. Такой же фундамент был предусмотрен и в лаборатории мер длины, для которой тоже были приобретены весьма точные по тому времени компараторы и делительная машина (их поместили в подвальной части).

Имея в виду, что единица времени является третьей основной единицей и что точное измерение этой величины обеспечивает единство измерений других величин, Д. И. Менделеев приложил много сил для организации работ по точному определению времени. В подвальном помещении главного здания Палаты были установлены точные астрономические часы фирмы Рифлер (Мюнхен). Вместе с тем по инициативе Менделеева начинаются работы по определению времени непосредственно из астрономических наблюдений в соответствии с основным определением секунды. Для этой цели в построенном в 1901 г. здании была предусмотрена специальная астрономическая башня, где был установлен пассажный инструмент. Астрономические определения времени, как известно, ведутся в этой башне и сейчас, правда, с более совершенными приборами, причем следует отметить, что служба времени ВНИИМ в настоящее время является одной из самых точных не только в СССР, но и в мире.

Постепенно Д. И. Менделеев организовал ряд других лабораторий в том числе термометрическую, электрических измерений, водомерно-газомерную, а также механическую мастерскую, преобразованную уже в советское время в экспериментальный завод «Эталон» ВНИИМ.

Таким образом, Менделеевым были заложены основы Главной палаты мер и весов как центрального метрологического научно-исследовательского учреждения страны. Однако наибольшее развитие деятельность этого учреждения получила после Великой Октябрьской социалистической революции, и в 1931 г. оно было реорганизовано во Всесоюзный институт метрологии и стандартизации (ВИМС), который в 1934 г. был переименован во Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии (ВНИИМ). В 1937 г. ему присвоено имя великого Менделеева.

Само собой разумеется, что для успешного возобновления прототипов русских мер Д. И. Менделееву и его сотрудникам пришлось про-

вести значительные научно-исследовательские работы по созданию методики и аппаратуры для точных метрологических измерений ряда величин и констант. В этом плане прежде всего следует отметить существенно важный вклад самого Д. И. Менделеева в разработку теории точного взвешивания. Эта работа Менделеева является классической как по методике проведения, так и по результатам.

Еще работая над докторской диссертацией, Д. И. Менделеев в 1865 г. предложил оригинальный способ взвешивания, состоящий в том, что на одну чашку весов кладется всегда гиря одной и той же массы, а взвешиваемый предмет дополняется гирями до предельной. Этот способ, как указывал сам Менделеев, имеет все достоинства двойного взвешивания и, следовательно, сокращает затрачиваемое время. В связи с работами по возобновлению прототипов русских мер, Менделеев, исходя из многочисленных опытных данных, установил, что теория физического маятника не применима к колебаниям весов и что полупериод и амплитуда колебаний весов не остаются постоянными. Он показал, что равновесие весов определяется с высокой степенью точности параболой второго порядка, и на этом основании создал стройную теорию взвешивания. Кроме того, он подробно рассмотрел вопрос о «системе» взвешиваний, сделал ряд важных указаний об обеспечении высокой точности и наимыгоднейшем числе их, а также указал способ наилучшего исключения случайных погрешностей.

Другой капитальной научно-исследовательской работой, поставленной лично Д. И. Менделеевым и выполнявшейся под его руководством, является абсолютное определение ускорения силы тяжести. Постановка этой проблемы диктовалась необходимостью иметь точное значение ускорения силы тяжести для многих метрологических работ, в частности, для введения поправки на воздух при точном измерении массы, при определении усилий и давлений непосредственным нагружением и др. Степень важности этой работы подтверждается тем, что с тех пор почти во всех развитых странах неоднократно проводились и в настоящее время проводятся все новые и новые определения силы тяжести для получения все более точных ее значений. При постановке этого исследования Д. И. Менделеев разработал ряд научно-технических положений, справедливость и значимость которых до сих пор являются решающими, и изложил их в известном труде: «Подготовка к определению абсолютного напряжения тяжести в Г. П. М. И. В. при помощи длинного маятника с золотым шаром». Для практических измерений в здании была построена специальная труба высотой 36,5 м над землей и 16,5 м вглубь, что давало возможность поставить особо точные измерения путем наблюдения периодов качаний физических маятников различной длины.

Д. И. Менделеев считал более выгодным использовать длинные маятники, исходя из того, что увеличение длины приводит к более высокой точности, так как увеличение времени одного колебания повышает точность его определения. Далее Менделеев считал, что наиболее точным способом определения значения  $g$  является вывод его из наблюдений над двумя физическими маятниками разной длины, но одинаковой массы. Д. И. Менделеев подробно рассмотрел также вопрос о подвешивании шара. Он предпочел способ двух проволок и считал, что наиболее точные результаты можно получить, пользуясь шарами из материала высокой плотности. После предварительных опытов было решено воспользоваться золотым шаром массой 50 кг и 4 чугунными шарами: 1) того же объема, что золотой; 2) той же массы, что золотой, 3) вдвое меньшей массы и 4) вдвое большей массы.

Часть обширной программы по измерению ускорения силы тяжести была выполнена при жизни Менделеева. Впоследствии работы по определению  $g$  были возобновлены и, как известно, успешно закончены П. Н. Агалецким и его сотрудниками в 1957 г.

Говоря о метрологических работах Д. И. Менделеева, нельзя не отметить предложение о новой температурной шкале, высказанное им в 1873 г. на заседании Русского химического общества. Эта шкала основывалась на одной экспериментально осуществляемой реперной точке. Он принял за исходную точку водород при давлении  $1000 \text{ г/см}^2$  и температуре таяния льда и предложил принять метрический градус равным такому изменению температуры, при котором упругость газа изменяется на  $1 \text{ г/см}^2$ . При этом Д. И. Менделеев отметил, что можно дать и другие определения метрической системы температур. Это, как справедливо отмечает Б. И. Пилипчук, указывает на то, что Менделеев первый высказал мысль о возможности приписать единственной реперной точке любое условное числовое значение и принять за начало отсчета абсолютный нуль. Сам Д. И. Менделеев считал это свое предложение очень важным и в списке своих сочинений записал: «Считаю эту свою работу многозначительной, но нигде не развивал, а потому предполагаю к ней вернуться».

Однако это предложение было забыто, и только в 1939 г. Джинок вновь поставил его на обсуждение. Дискуссия на эту тему привела к введению X Генеральной конференцией по мерам и весам нового определения абсолютной температурной шкалы, для которой основной реперной точкой служит тройная точка воды. Ей приписано значение  $273,16^\circ \text{K}$ .

Таким образом, шкала Кельвина, которой мы сейчас пользуемся, является, в сущности, осуществлением идеи Д. И. Менделеева.

Не останавливаясь на других метрологических работах Менделеева, таких как определение веса литра воздуха, веса данного объема воды и других, следует отметить весьма важную особенность, характеризующую общую постановку научно-исследовательских работ в Главной палате мер и весов того времени. Дело в том, что с самого начала своей деятельности в Главной палате Д. И. Менделеев организовал для издания трудов сотрудников «Временник Главной палаты мер и весов». Он не считал возможным вести метрологические исследования замкнуто и постоянно как бы отчитывался перед общественностью, перед народом. При его жизни вышло в свет 7 выпусков «Временника», приобретшего большую известность и заслужившего уважение.

В период деятельности в Главной палате Д. И. Менделеев опубликовал около 40 работ, из которых половина относится к метрологии. В них он дал не только новые методы измерений, принципиальные указания о постановке метрологических исследований и результаты практического осуществления их, но, что еще важнее, разработал свой стиль метролога, заключающийся в предварительном глубоком изучении предполагаемого опыта, в исключительной тщательности постановки экспериментов, в детальном изучении всех причин и источников погрешностей, в безукоризненной обработке полученных результатов, в доведении этих результатов до практических дел. В этом стиле он воспитал плеяду русских метрологов и создал русскую метрологическую школу.

Многие мысли и идеи Д. И. Менделеева развивались и осуществлялись его учениками и последователями. Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии всегда стремился сохранить и укрепить разработанный Менделеевым русский стиль метрологии.

Забота советского государства о развитии метрологии в СССР, большие материальные и технические возможности, предоставленные ВНИИМ для этой цели, позволили его коллективу проделать значительную работу, результаты которой вынесены на суд общественности, собравшейся на научную конференцию, посвященную 130-летию со дня рождения великого Менделеева.

В ближайшие годы ВНИИМ предстоит решить много больших и трудных метрологических задач, непосредственно связанных с осуществлением великой программы строительства коммунизма. В этой работе нам ярко светит имя Д. И. Менделеева, великого ученого, основателя русской метрологической школы.

---

**ГЛАВНАЯ ПАЛАТА МЕР И ВЕСОВ — ВНИИМ  
(СОЗДАННАЯ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВЫМ)  
ЗА 70 ЛЕТ СУЩЕСТВОВАНИЯ**

Две даты, отмечаемые на юбилейной конференции ВНИИМ, связаны с одним из наиболее славных имен в истории русской и советской науки — с именем Д. И. Менделеева.

Действительно, только после прихода Д. И. Менделеева высшее учреждение в области измерительной техники того времени — Депо образцовых мер и весов (1842—1893) — смогло превратиться в научно-исследовательский институт, сразу же занявший видное место среди других ведущих мировых метрологических центров.

Организация такого института диктовалась достигнутым уровнем науки и техники, требовавшим высокого единства измерений, а следовательно, и высокого уровня вещественного воспроизведения единиц измерений, сведенных в систему.

Главная палата мер и весов — ныне Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии имени Д. И. Менделеева — была открыта на основе «Положения о Главной палате мер и весов», утвержденного 20 июня 1893 г. Ровесниками ВНИИМ являются физико-технический институт ФРГ (PTR, 1887 г.), Национальная физическая лаборатория Англии (NPL, 1889 г.) и Национальное бюро стандартов США (NBS, 1901 г.), которые вместе с ВНИИМ до сего времени остались ведущими в мире и имеющими полный комплекс метрологических исследований.

Первые исторические сведения о мерах и весах России восходят к истокам русской государственности и имеются в «Уставе о церковных десятинах, суде и мерилах», изданном в конце X в. Владимиром Свято-славичем. Начиная с этого времени, надзор за мерами и их хранение на долгий период переданы церкви. Лишь в XV—XVI вв. надзор за мерами переходит постепенно к гражданской власти — приказам; издается ряд распоряжений (в 1350, 1667, 1681, 1679, 1696 гг. и т. п.), регламентирующих русские меры и их применение (правда, без достаточно обоснованной системы).

Серьезное внимание на положение с мерами и весами в ряде своих распоряжений обращает Петр I. Однако наиболее важными в этом направлении были результаты специально созданной в 1736 г. комиссии о мерах и весах, возглавляемой графом М. Г. Головкиным, установившей значения фунта и полуаршина.

Несколько позднее комиссия под руководством Иоганна Габермана утвердила первые узаконенные государственные образцы (эталоны) русских мер: «бронзовый золоченый фунт 1747 г.» и образцовую меру аршина.

В дальнейшем упорядочивалась регламентация надзора за мерами, однако специального технического органа по воспроизведению и хранению мер не было.

Заметным событием в предыстории ВНИИМ является принятие в 1835 г. закона «О системе российских мер», устанавливавшего единицу веса — фунт, единицу длины — сажень и единицы объема — ведро и четверик. Фунт опирался по размеру единицы на фунт 1747 г., а сажень приравнивалась семи английским футам.

Законом предусматривалось также строительство специального здания для образцов мер, которое и было закончено в 1841 г. в Петропавловской крепости. В этом здании, сохранившемся до сих пор, размещалось Депо образцовых мер. Тогда же были изготовлены платиновые образцы этих мер.

Поворотным этапом в развитии русской метрологии было издание в 1842 г. «Положения о весах и мерах», регламентирующего службу мер и весов. Эта служба преемственно сохранилась до настоящего времени.

Первым ученым хранителем Депо образцовых мер являлся акад. А. Я. Купфер, бывший тогда также первым директором Главной геофизической обсерватории, в которой он проводил и метрологические работы. В период работы Купфера представители русской метрологии впервые приняли участие в международных метрологических совещаниях.

При преемнике Купфера, проф. В. С. Глухове, в 1879 г. было построено в Петербурге на б. Царскосельском проспекте первоклассное здание, специально предназначенное для метрологических работ. Штат Депо к этому времени насчитывал уже 6 сотрудников.

Знаменательной вехой в истории русской метрологии было присоединение России к метрической конвенции в 1876 г.

В 1889 г. в Париже собралась первая Генеральная конференция мер и весов, распределившая, в частности и для России, метрические платино-иридиевые эталоны метра и килограмма, сохранившие свое значение до последнего времени.

Таким образом, уже тогда В. С. Глуховым были созданы основные материальные предпосылки для начала научных работ в области метрологии. Однако к концу своей жизни В. С. Глухов, много сделавший для развития русской науки о мерах и весах, вынужден был все же признать, что «трудно в немногих словах изобразить то печальное состояние, в котором находятся меры и весы в России».

В 1892 г., после смерти В. С. Глухова, ученым хранителем Депо образцовых мер был назначен Д. И. Менделеев, на долю которого выпало решить задачи, поставленные Глуховым в области метрологии.

Предстояло возобновить русские прототипы мер длины и массы, создать научное учреждение для развертывания метрологической работы в тех областях, где это требовалось, и организовать для обслуживания науки, техники и торговли поверочную службу, тесно связанную с работой единственного в стране метрологического центра.

Эти задачи были блестяще решены Д. И. Менделеевым в достаточно сжатые сроки. Еще задолго до работы в Главной палате мер и весов Д. И. Менделеев в своем заявлении о метрической системе, сделанном I съезду русских естествоиспытателей в 1867 г., говорил: «Каждый обя-

зан подготовить связь теснейшего сближения народов. Есть между попытками (сближения) одна, не стоящая ни миллионов, ни громадных усилий ума... — это попытка склонить народы к единству мер... Такова метрическая система, составленная во времена первой республики французскими и иностранными учеными».

Таким образом, Д. И. Менделеев уже давно волновали коренные проблемы метрологии. Приступив к руководству Главной палатой, он имел уже сложившуюся систему взглядов на проблемы, связанные с мерами и весами.

Первой и основной задачей вновь созданного института Менделеев считал возобновление прототипов русских мер: фунта и меры длины сажени, узаконенной в зависимости от английского фута (7 футов = 1 сажени = 3 аршина = 48 вершкам). «Сомнительность» русского фунта, по словам Менделеева, достигала к тому моменту около 5 мг.

Работы по возобновлению прототипов начались сразу после организации нового института. Новые прототипы русских мер были изготовлены в форме трех платино-иридиевых эталонов аршина и трех эталонов фунта и сличены как с ранее существовавшими, так и с метрическими эталонами. При этом использовались результаты многократных сличений старых прототипов с иностранными мерами.

Эти работы подготовили издание в 1899 г. закона о мерах и весах, в котором принималось, что основной единицей массы служит фунт, опирающийся по размеру хранимой им единицы на платиновый фунт 1835 г. и равный 0,40951241 кг, а основной единицей длины — аршин, опирающийся на 28 английских дюйма (1 фут = 12 дюймам) и равный 0,711200 м. Для объема сыпучих тел был принят гарнец, равный объему 8 фунтов воды (при температуре  $16\frac{2}{3}^{\circ}\text{C}$ ), а для объема жидкостей — ведро, равное объему 30 фунтов воды.

Работы по возобновлению прототипов, обстоятельно и с большой глубиной изложенные Менделеевым в его сочинениях, служат до сего времени образцом метрологических исследований высшего класса.

Важно отметить, что в законе 1899 г. приводились соотношения русских мер с метрическими, т. е. была predetermined возможность перехода к метрической системе и разрешалось факультативно применение метрической системы.

Одновременно с возобновлением прототипов русских мер шла работа по превращению бывшего Депо мер и весов в первоклассный метрологический институт. Главная палата приобрела нормальный барометр (1895 г.), водородный термометр (1898 г.), компаратор Траутона-Симса и эталонные весы.

К моменту организации Главная палата имела лаборатории мер массы, мер длины и температурных измерений, которые и составили основное ядро для развития научно-исследовательского института. Имея в виду необходимость проведения работ по возобновлению эталонов русских мер, Менделеев прежде всего обращает внимание на оборудование этих основных лабораторий.

Лаборатория мер массы получает первоклассные весы фирмы Рупрехт, являющиеся и до сих пор основным ее прибором. Коллектив лаборатории под руководством Менделеева в составе Ф. Л. Завадского, В. Д. Сапожникова и А. Н. Доброхотова проводит работы по возобновлению эталона фунта на уровне, превосходящем даже уровень работ Международного бюро того времени.

Далее идет усовершенствование образцовых мер (гирь) и создание новых конструкций весов, в частности, предназначенных для взвешива-

ний по методу Д. И. Менделеева (причем одна из них была разработана его сыном И. Д. Менделеевым). В лаборатории определяют точное значение веса литра воздуха и разрабатывают методы точного взвешивания.

Успешно развивается лаборатория температурных измерений, которая в дополнение к приобретенным в 1886 г. Глуховым термометрам Тонелло и Бодена получила в 1894 г. из Франции водородный термометр.

Двадцатый век ознаменовывается широким распространением электрической энергии, и Менделеев откликается на это организацией электрического отделения. В 1900 г. под руководством Н. Г. Егорова и И. А. Лебедева открывается лаборатория сильных и слабых токов, ставшая впоследствии базой для лабораторий электрических эталонов и электроизмерительной.

Развитие электротехники вызывает к жизни новую отрасль знаний — электрическую светотехнику, в связи с чем в 1901 г. в Палате мер и весов открывается фотометрическая лаборатория.

В 1902 г. организуется водомерная лаборатория, а в 1906 г. — манометрическая, ее первым руководителем был А. М. Кремлев.

Естественно, Д. И. Менделеев связывал дальнейшее развитие института с химическими исследованиями, поэтому он открыл химическую лабораторию, которую сам и возглавил.

Около 1900 г. Главная палата приступает к астрометрическим наблюдениям, и в 1902 г. в ней открывается лаборатория времени.

Таким образом, при жизни Д. И. Менделеева Главная палата мер и весов состояла из лабораторий времени, мер массы, мер длины, термометрической, водомерной, манометрической, двух электрических, фотометрической, химической, и, следовательно, в основном располагала эталонами всех единиц, на которые опирается и современная международная система.

Палата мер и весов обогатилась при Д. И. Менделееве физико-механическими мастерскими.

После смерти Менделеева с 1907 по 1919 г. управляющим Главной палаты мер и весов стал Н. Г. Егоров.

В 1907—1919 гг. в лабораториях продолжались метрологические исследования и значительно пополнилась материально-техническая база. Так, например, лаборатория мер длины наполнилась первоклассным компаратором Женевского общества, используемым и до сего времени, а в термометрической лаборатории в 1912 г. появились платиновые термометры сопротивления. Эталонная электрическая лаборатория благодаря трудам М. Ф. Маликова и А. И. Георгиевского к 1913 г. обогатилась абсолютными эталонами электрического сопротивления в международной системе электрических единиц, а в 1909 г. там же были созданы нормальные элементы Вестона, позволившие установить собственный эталон э. д. с.

В 1910 г. в Главной палате открылась новая лаборатория радиотелеграфных измерений, в 1909—1914 гг. были заложены основы для организации оптической и магнитной лабораторий.

Октябрьская революция дала громадный толчок к интенсивному развитию метрологии в нашей стране.

Первым мероприятием советской метрологии, потребовавшим огромных научных и организационных усилий, был переход во всей стране на метрическую систему мер и единиц. СНК РСФСР декретом от 14 сентября 1918 г. постановил «положить в основание всех измерений, производимых в Российской Социалистической Федеративной республике, международную метрическую систему мер и весов с десятичными подразделениями и производными». Хотя такой переход был уже подготов-

лен работами Главной палаты, однако из-за сложной обстановки гражданской войны и восстановительного периода он был закончен лишь к 1927 г.

В период гражданской войны работа в Главной палате мер и весов не прекращалась. В 1918 г. организуются лаборатории магнитная, нормальных элементов, а в 1922 г. — оптическая.

В 1922 г. Советское правительство назначает президентом Главной палаты одного из крупных ученых страны Д. П. Коновалова.

В период восстановления народного хозяйства нашей Родины наблюдается новый подъем в работе метрологического института. Достаточно сказать, что в 1929 г. создаются лаборатории низких температур (руководитель И. Д. Менделеев), высоких температур (В. И. Божовский), аэродинамическая и механическая (С. И. Дружинин), калибров (А. А. Поликарпов), технологии электроизмерительных приборов (А. И. Маренина), скоростей и ускорений (П. Н. Агалецкий), рентгенометрическая (С. М. Усатый), радиологическая (Л. Н. Богоявленский) и актинометрическая (А. Н. Бойко).

К началу Отечественной войны ВНИИМ обладает уже 25-ю лабораториями, объединенными в отделы: основных единиц, лучистой энергии, механический, тепловой, электрический и ионизирующих излучений.

В предвоенный период были проведены оригинальные работы по определению метра в длинах световых волн, выполненные под руководством Г. В. Варлиха и М. Ф. Романовой, позволившие СССР проявить инициативу в переходе на новое определение метра.

В области механических измерений создаются эталоны давления и образцовые приборы для измерения твердости; в области электрических измерений — эталоны магнитных единиц и подготавливается переход на абсолютные эталоны электрических единиц; в области фотометрии — эталоны световых единиц в форме электрических ламп накаливания; в области температурных измерений — эталоны, воспроизводящие значение температур международной шкалы в интервале  $0-1000^{\circ}\text{C}$ , и проводятся работы по воспроизведению единицы количества теплоты.

Параллельно с этим во всех перечисленных областях ведется работа по материально-техническому обеспечению развивающейся поверочной деятельности, по удовлетворению метрологических запросов промышленности СССР, по созданию нормативных документов и начинается издание стандартов в области метрологии.

На протяжении своего существования институт издает сначала периодические журналы «Временник» и «Поверочное дело», а затем «Труды института» и, кроме того, — отдельные монографии, издания справочного характера, таблицы, инструкции и т. д.

С довоенного времени во ВНИИМ существует аспирантура. Значительно расширяются физико-механические мастерские, к 1941 г. — это уже завод «Эталон».

Активная деятельность ВНИИМ была прервана фашистским нашествием на нашу страну, институт перебазировался в ряд пунктов СССР. Значительная часть сотрудников продолжала работать в условиях блокады Ленинграда, часть работала в Свердловском филиале ВНИИМ, где находились государственные эталоны, а часть — в Томске, Новосибирске и Барнауле.

В 1944 г. после эвакуации этих групп началось восстановление института. Темпы проведения исследований в послевоенный период были очень высоки. Первая Государственная премия за послевоенные работы была получена уже в 1947 г., вторая — в 1948 г.

Еще не закончив восстановление зданий института и завода «Эта-лон», ВНИИМ развертывает большой цикл эталонных исследований и работ по определению констант. Следует прежде всего отметить работы ВНИИМ по переходу на абсолютные эталоны электрических единиц, проводившиеся Б. М. Яновским, С. В. Горбацевичем, И. Н. Кротковым, Н. А. Волковым, В. В. Мюллер и Н. Л. Амати. В результате этих работ были созданы новые токовые весы, меры и установки для воспроизведения абсолютного ома и эталоны индуктивности и емкости.

С. В. Горбацевич, А. К. Колосов, В. П. Шигорин и З. И. Зеликовский создают для эталонных работ первоклассные компараторы.

Разрабатываются эталоны и образцовые установки для магнитных измерений коллективом магнитной лаборатории в составе Е. Г. Шрамкова, Б. М. Яновского, Е. Н. Чечуриной, Н. Г. Чернышевой, Е. А. Соколовой.

За создание первых эталонных кварцевых генераторов в области высокочастотных измерений Б. К. Шембелю, П. Н. Агалецкому, О. А. Тхоржевскому и М. Х. Макашеву была присуждена Государственная премия. Широко развертываются под руководством Б. Е. Рабиновича работы по измерению на высоких частотах мощности и напряжения.

Дальнейшее развитие получают исследования в области электрических и магнитных измерений на переменном токе при расширении частотного диапазона от 50 гц до 1 Мгц. Исследования ведут Т. Б. Рождественская, К. П. Широков, Д. И. Зорин, А. Я. Безикович, Н. Г. Чернышева, Е. Н. Чечурина.

Работы в области электрических измерений завершились определением важнейшей константы гиромангнитного отношения протона, проведенным Б. М. Яновским и Н. В. Студенцовым.

В области акустических измерений под руководством И. Г. Русакова, А. Д. Бродского и Л. П. Блиновой были созданы эталоны звукового давления в широком диапазоне частот.

Коллективами лабораторий линейных измерений и оптической проводились фундаментальные исследования в целях создания источников монохроматического излучения и ряда компараторов, что подготовило все необходимое для перехода к новому определению метра в длинах световых волн и внедрению этой новой нормы в измерительную практику Советского Союза. Среди лиц ведущих эти работы прежде всего следует назвать М. Ф. Романову, А. И. Карташева, Н. Р. Батарчукову и М. Л. Бржезинского.

Характерная особенность послевоенных работ в области линейных измерений — создание новых компарирующих установок оригинальной конструкции (12-метровой машины, 30-метрового компаратора, интерферометров для концевых и штриховых мер), в которых участвовали А. И. Карташев, Е. А. Волкова, Л. К. Каяк, М. Л. Бржезинский, П. П. Зубрилин и др. Работы этого раздела завершаются определением важнейшей константы — скорости света по оригинальному методу А. И. Карташева.

В области фотометрии разрабатывается новый эталон в форме полного излучателя, авторы которого П. М. Тиходеев, В. Е. Карташевская и А. М. Сабуренков получают Государственную премию. В ходе развития работ в этой области создается специальная колориметрическая группа, успешно решающая под руководством Е. Н. Юстовой вопросы цветовых измерений и создавшая первый атлас цветов, основанный на объективных показателях.

В области механических измерений под руководством Д. В. Незговорова и П. В. Индрика разрабатывается стройная система эталонов давления, охватывающих к настоящему времени диапазон давлений  $0 \div 20\,000$  кгс/см<sup>2</sup>, за что авторам работ присуждена Государственная премия.

После войны под руководством Е. Ф. Долинского, П. В. Индрика разрабатываются эталонные барометры как классической, так и совершенно оригинальной грузопоршневой конструкции.

В 1945 г. Б. А. Остроумов организует вакуумную лабораторию, которая под руководством М. А. Гульева создала основной набор эталонных компрессионных манометров для давлений до  $10^{-5}$  мм рт. ст. и образцовые установки для измерения давлений до  $10^{-10}$  мм рт. ст.

Большие работы провела лаборатория скоростей и ускорений, создав под руководством М. Л. Лассана и В. С. Шкаликера первоклассные установки для измерения угловых скоростей до 150 000 об/мин и параметров вибраций в широком диапазоне частот и ускорений. В области измерения сил и твердости упорядочена система передачи значений единиц силы и твердости от исходных установок к промышленным, причем эти исследования нашли свое обобщение в теоретических работах лаборатории (С. А. Смолич, Б. И. Пилипчук, Н. П. Славина, Л. М. Максимова и др.).

Среди механических констант следует отметить первоклассное определение константы ускорения силы тяжести (П. Н. Агалецкий, А. И. Марциняк, К. И. Егоров), а также констант вязкости воды (Г. А. Мальяров), плотности ртути (М. Д. Иппиц) и плотностей водно-спиртовых растворов (П. А. Налимов).

Непосредственно после войны под руководством И. И. Киренкова и А. Н. Гордова очень интенсивно развивается область абсолютных термодинамических определений температуры. Исследования в этой области закончились созданием двух моделей газового термометра и определением важнейшей константы — температуры затвердевания золота и других опорных температурных точек затвердевания (олова, кадмия, цинка).

Успешно развивается область оптической пирометрии, в которой был разработан ряд оригинальных конструкций эталонных и образцовых пирометров (И. И. Киренков, Э. А. Лапина и др.).

В 1957 г. под руководством Б. Н. Олейника была организована новая лаборатория тепловых измерений, в которой за короткий период создан ряд оригинальных конструкций образцовых установок для определения основных тепловых величин. В этой же лаборатории проведены большие работы по установлению системы передачи единицы количества тепла как меры теплотворной способности, в которых активное участие принимает В. С. Усков.

Б. И. Пилипчук восстанавливает лабораторию низких температур, где под руководством А. Д. Бродского после восстановления эталонного хозяйства разрабатывается ряд новых конструкций термометров, основанных на акустическом, термошумовом, ядерно-резонансном принципах.

В 1962 г. была открыта новая лаборатория методов измерения переменных температур, успешно начавшая свои работы под руководством А. Н. Гордова.

В послевоенный период во ВНИИМ широко развернулись работы отдела ионизирующих излучений. В этом отделе, руководимом акад. Н. И. Лукирским, работали чл.-кор. АН СССР Б. С. Желепов, К. К. Аглинцев, А. С. Карамян, М. Ф. Юдин, С. А. Шестопалова, И. А. Ярицына, Ф. М. Караваев и др.

Трудами этого коллектива была создана эталонная база в области измерения активности источников, дозиметрии рентгеновского и других видов измерения и разработаны многочисленные образцовые установки, обслуживающие важнейшие метрологические нужды нашей страны в области ионизирующих излучений.

В отделе ионизирующих излучений в дополнение к ранее существовавшим были открыты лаборатории нейтронных измерений и ядерной спектроскопии.

Во ВНИИМ был создан новый отдел физико-химических измерений, руководимый Д. К. Коллеровым.

Институт имеет, кроме того, в своем составе следующие лаборатории: новую массспектральную (Н. П. Грудинкина), климатических испытаний (Е. А. Гершкович), физико-химических исследований (чистые металлы, специальные сплавы, спектральные измерения ведут Э. Л. Тер-Григорьян и Б. В. Блинов, а исследования в области сенситометрии — В. А. Коридорф). В институте работает также служба времени и частоты под руководством С. С. Товчигречко.

Необходимо особо отметить большую работу метрологического отдела под руководством К. П. Широкова, обеспечившего создание поверочных схем во всех областях измерений и разработавшего организационные основы введения новой системы единиц («СИ»).

ВНИИМ ставит своей задачей разработать нормативные документы, в которых будет стандартизована важнейшая методика измерений.

Наряду с разработкой методов и аппаратуры эталонного характера институт создает также и установки наивысшей точности, находящиеся на уровне эталонных и необходимые для решения важнейших народно-хозяйственных и научных задач.

В рамках такого сообщения невозможно сказать обо всех работах института в послевоенный период. Изложенное далеко не исчерпывает сделанного за это время.

Подводя итоги истекшим 70 годам существования института, можно выделить несколько важнейших этапов его развития.

Первый, связанный с работами Д. И. Менделеева, характеризуется восстановлением прототипов старых русских мер и подготовкой предпосылок к проведению метрической реформы.

Второй этап, предшествующий Октябрьской революции, характеризуется созданием первых русских эталонов в Международной метрической системе, как, например, эталонов сопротивления и электродвижущей силы, еще до введения метрических мер.

Третий этап, начавшийся после Октября, связан с проведением в жизнь метрической реформы.

Четвертым важным этапом в жизни ВНИИМ после осуществления метрической реформы явилось развертывание метрологических исследований по всем разделам физики и техники и расширение деятельности института в области разработки вопросов стандартизации, испытаний типов измерительных приборов и метрологического обеспечения обязательных поверок всех измерительных приборов, что резко отличает советскую метрологию от зарубежной. В этот период все больше расширяются общезначимые исследования, исследования по определению физических констант и созданию эталонов, основанных на этих константах.

Сейчас перед ВНИИМ стоят новые задачи. С одной стороны, тесное взаимопроникновение метрологических и стандартизационных работ

и, с другой, развитие исследований по определению физических констант и характеристик материалов. Естественно, что высокий уровень определения констант и ответственных характеристик потребует повышения уровня эталонов, развития точнейших методов измерений с широким привлечением современных методов, основанных на использовании электроники и счетно-решающей техники.

Кадры метрологов, накопленный ими опыт и созданная материально-техническая база являются залогом успеха в этой большой работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. «Сто лет государственной службы мер и весов в СССР», под ред. А. П. Кузнецова, М. Ф. Маликова, В. Д. Барина, Б. М. Леонова и С. Ф. Маликова, Гостехиздат, 1945.
  2. «Метрологические работы за 40 лет», Труды ВНИИМ, вып. 33 (93), 1958.
  3. Менделеев Д. И., Труды по метрологии, Стандартгиз, 1936.
-

ПОВЕРОЧНЫЕ СХЕМЫ КАК ОСНОВА МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО  
ОБСЛУЖИВАНИЯ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА СССР

Основатель Главной палаты мер и весов, великий русский ученый Д. И. Менделеев, был автором широко задуманного плана охвата всей страны поверочными учреждениями, обеспечивающими поверку основной массы мер и измерительных приборов, изготовляемых и применяемых в стране, а следовательно, и передачу единиц измерений от государственных эталонов рабочим средствам измерений. По этому плану страна делилась на 12 больших поверочных округов с одной окружной и несколькими (2—8, в среднем 5) местными поверочными палатками. Кроме того, в каждом округе предполагалось иметь поверочный вагон-палатку. Поверка образцовых мер окружных палаток должна была производиться в Главной палате мер и весов, все остальные палатки должны были поверять свои меры в окружных палатках. Сроки периодической поверки Д. И. Менделеев предлагал сократить с 3 лет до 1 года. Он предлагал также ввести регистрацию имевшихся в обращении мер и весов, чтобы обеспечить правильную периодичность поверок и полный охват ими мер. Д. И. Менделеев, как мы видим, наряду с выдающимися научными работами, принесшими ему мировую славу, немало сделал для правильной организации поверочного дела в России. Однако он не успел осуществить все свои планы. Лишь после Великой Октябрьской революции, в условиях социалистического способа производства, государственная служба мер и весов получила должное развитие и полностью охватила все народное хозяйство страны. В настоящее время в эту службу входят 6 научно-исследовательских институтов (ВНИИМ, ВНИИГК, ВНИИФТРИ, ХГИМИП, НГИМИП и Свердловский филиал ВНИИМ) и свыше 150 республиканских, краевых и областных государственных контрольных лабораторий по измерительной технике. Эта сеть продолжает расширяться и углубляться. Намечено преобразование некоторых наиболее крупных государственных контрольных лабораторий в филиалы ВНИИМ, призванные способствовать обеспечению современного технического уровня, а также должного качества и надежности промышленной продукции\*.

В деле обеспечения единообразия и правильности мер и измерительных приборов в стране, начатом еще Д. И. Менделеевым, большое значение имеет целесообразное соподчинение эталонов и образцовых средств измерений, способствующее распределению работы по поверке всех

\* В 1964 г. организован Тбилисский филиал ВНИИМ.

средств измерений, применяемых на громадной территории СССР, между поверочными органами, с сохранением необходимой точности передачи единиц. Поверочные органы должны располагать образцовыми мерами и измерительными приборами различного назначения и точности, обеспечивающими поверку как рабочих средств измерений прикрепленных к ним предприятий и организаций, так и образцовых мер нижестоящих поверочных органов, расположенных на обслуживаемой территории. Передача значений единиц производится несколькими ступенями — от государственных эталонов эталонам-копиям, затем рабочим эталонам и далее образцовым мерам и измерительным приборам, подразделяемым, в зависимости от соподчинения, на разряды.

Идея составления особых схем соподчинения эталонов и образцовых средств измерений для различных измеряемых величины была высказана еще в 30-х годах Л. В. Залудким; эти схемы получили название поверочных. Первые поверочные схемы были составлены М. Ф. Маликовым, разработавшим основные принципы их построения [1]. Примеры поверочных схем в их первоначальном виде были опубликованы в книгах М. Ф. Маликова и П. М. Тиходеева [2, 3].

Работа по составлению поверочных схем затем была продолжена с участием лабораторий ВНИИМ, и в 1956 г. в качестве проекта был опубликован сборник [4], включавший 23 поверочные схемы по наиболее важным отраслям измерений. Следующий сборник, включавший 34 поверочные схемы, был издан в 1960 г. [5, 6]. Однако происшедшие с тех пор изменения государственных стандартов на ряд видов средств измерений и усовершенствование эталонов потребовали существенных изменений в некоторых поверочных схемах. Достаточно сослаться, например, на принятие XI Генеральной конференцией по мерам и весам нового определения метра или введение ГОСТ 7328—61 на гири, в котором устанавливается совершенно новая система допусков на гири, и т. д. Поэтому в течение 1963 г. лабораториями ВНИИМ под общим руководством метрологического отдела сборник поверочных схем был пересмотрен, и в настоящее время подготовлено для печати его новое издание.

При изложении этапов, характеризующих работу по составлению поверочных схем, полезно упомянуть о том, что делается в этом направлении за границей. Насколько нам известно, систематической работы по регламентации иерархии эталонов и образцовых мер там не ведется. Имеется лишь небольшое число опубликованных работ по этому вопросу, выполненных в США. Однако эти работы дают лишь иллюстрацию существующего положения с передачей единиц в отдельных областях [7] или рассматривают вопрос с чисто экономической точки зрения [8]. В отличие от этого, в СССР поверочные схемы являются нормативными документами, которые совместно с Правилами 12—58, Положением об эталонах и образцовых мерах и измерительных приборах\* [9, 10] и инструкциями по поверке их регламентируют всю работу по поддержанию единства измерений в стране.

В современном понимании термина «поверочная схема» — это документ, устанавливающий соподчинение эталонов и разрядных образцовых мер и измерительных приборов, а также методы и точность передачи единицы измерения от эталонов образцовым, а от них рабочим мерам и измерительным приборам [11]. Из этого определения вытекает содержание поверочной схемы и ее основные элементы.

Очевидно, что поверочная схема, как всякая схема, не может отра-

\* В 1964 г. Советом ВНИИМ утвержден новый текст этого документа, получившего наименование «Положение об эталонах и образцовых средствах измерений».

жать все детали и подробности, связанные с поверкой, а также все возможные отклонения от типового порядка передачи единиц, диктуемые местными условиями.

Поверочные схемы должны наглядно изображать принятую в СССР систему передачи установленных государственными стандартами единиц измерений [12]. Легче всего достигнуть этого, изображая на каждой схеме систему передачи только одной единицы. Поэтому каждая поверочная схема, как правило, охватывает меры и измерительные приборы, предназначенные только для одной физической величины.

Поверочные схемы включают следующие элементы: эталоны, образцовые меры и измерительные приборы, рабочие меры и измерительные приборы, методы поверки.

Термин «эталон» в современной метрологии применяется в двух, несколько отличающихся друг от друга значениях. Под эталоном в собственном смысле слова понимаются конкретная мера или измерительный прибор, предназначенные для воспроизведения и хранения единицы измерения в государственном или международном масштабе (например, эталон килограмма, эталон ома, рабочий эталон метра). В тех случаях, когда в соответствии с принятым определением, единица воспроизводится путем использования постоянных свойств веществ или тел, имеющихся в природе, говорят о «естественных эталонах», имея в виду всю совокупность элементов, необходимых для воспроизведения и хранения единицы, т. е. метод со спецификацией его осуществления, аппаратуру и сами действия по воспроизведению единицы (например, под эталоном метра, определенного через длину световой волны, понимаются средства для его воспроизведения включая не только конкретную аппаратуру, но и строго определенную методику и условия проведения измерений, необходимые для достижения наивысшей точности.)

По признаку соподчинения эталоны подразделяются на первичные и вторичные. Первичный эталон по точности стоит выше других эталонов, воспроизводящих единицы той же физической величины. Для сохранения единства измерений в данном государстве может быть только один первичный эталон. Вторичные эталоны, значения которых устанавливаются по первичному эталону (в виде конкретной меры или «естественному»), именуется эталонами-копиями, эталонами-свидетелями, эталонами сравнения.

Эталоны, служащие для текущих поверок образцовых мер и измерительных приборов высших разрядов, именуется рабочими эталонами. Как правило, эти эталоны получают значения путем сличения с эталонами-копиями и лишь в редких случаях, когда отсутствуют эталоны-копии, — путем сличения с первичными эталонами.

Вторичные эталоны представляют собой конкретные меры или измерительные приборы. Поэтому эталоны-копии в случаях, когда первичный эталон является «естественным» эталоном, отличаются от него по своему устройству, т. е. являются копиями лишь по метрологическому назначению. Очевидно, что эталоны-свидетели нужны лишь в случае первичных эталонов в виде конкретных мер, которые могут со временем изменяться или подвергнуться износу и порче.

Эталоны могут быть одиночные и групповые. При групповом эталоне значение единицы определяется по средневзвешенному из значений отдельных мер, входящих в групповой эталон. Ряд эталонных мер или эталонных измерительных приборов, в котором различные меры или измерительные приборы воспроизводят соответственно различное число единиц измерения или различные области значений измеряемой величины, образует эталонный набор.

В некоторых областях, когда определение единицы основано на использовании воспроизводимых свойств веществ или тел, первичные эталоны не могут быть созданы в виде конкретных мер или измерительных приборов (например, единица времени — секунда, по определению равная  $1/31556925,9747$  части тропического года для 1900 г. января 0 в 12 ч эфемеридного времени может воспроизводиться лишь с помощью астрономических наблюдений).

В сборнике издания 1960 г. [5] для подобных случаев во главе поверочных схем были поставлены эталонные методы воспроизведения единиц (например, эталонный метод воспроизведения метра в длинах световых волн, эталонный метод воспроизведения единиц времени и частоты на основе звездных наблюдений и т. д.). Под эталонным методом понимался метод воспроизведения единицы измерения в соответствии с ее определением, основанный на использовании воспроизводимых свойств веществ или тел, причем в понятие «эталонный метод» включалась не только сущность применяемого метода измерений, но и сами действия по воспроизведению единицы, что не совсем строго, так как при этом расширяется содержание слова «метод». Вопрос о правильном наименовании высшего звена поверочной схемы был подвергнут обсуждению на совещаниях руководящих работников ВНИИМ. В результате дискуссии было решено отказаться от термина «эталонный метод», ограничившись наименованием конкретного метода воспроизведения единицы, но с обязательным указанием на спецификацию, регламентирующую условия воспроизведения единицы, и на аппаратуру, применяемую для этой цели.

От эталонов единицы передаются образцовым мерам или образцовым измерительным приборам, которые могут делиться на разряды, обозначаемые порядковыми номерами. Число разрядов зависит от пространенности средств измерений, числа классов точности, на которые они разделяются, и количества лабораторий, производящих их поверку. Так, в поверочной схеме для концевых мер длины и приборов для измерения линейных размеров, чрезвычайно распространенных в технике и имеющих широкий диапазон точностей, потребовалось введение пяти разрядов образцовых мер. В противоположность этому в поверочной схеме для калориметров, применяемых значительно реже и с более узкой шкалой точностей, достаточно иметь всего два разряда образцовых приборов.

Из всего разнообразия методов поверки можно выделить, принимая во внимание вид сличаемых средств измерений и наличие или отсутствие специального компарирующего прибора, четыре основных: а) непосредственное (т. е. без какого-либо компарирующего прибора) сличение мер (или измерительных приборов) друг с другом; б) сличение мер посредством того или иного компаратора; в) поверка измерительного прибора путем воздействия на него величиной, воспроизводимой образцовой мерой («поверка по образцовой мере»); г) прямое измерение образцовым измерительным прибором значения поверяемой меры. Естественно, что в поверочных схемах эти основные методы конкретизированы применительно к особенностям отдельных видов измерительной аппаратуры.

В связи с введением ГОСТ 9867—61 «Международная система единиц» (СИ), требующим предпочтительного применения этой системы во всех областях науки, техники и народного хозяйства, а также при преподавании, система применяемых в СССР эталонов и образцовых мер и измерительных приборов должна быть приведена в соответствие с этим требованием. Однако в отдельных поверочных схемах (как,

например, для манометров, динамометров, мер вместимости и др.) приходится временно сохранить прежние единицы, поскольку в них градуирован пока еще весь парк средств измерений. В пояснительных текстах к таким схемам оговорено, что после перехода при практических измерениях на единицы СИ в них должны быть сделаны соответствующие изменения.

Поверочные схемы построены следующим образом. Первичные эталоны помещены в верхней части поля схемы, отведенного для эталонов. Ниже первичных эталонов в этом же поле помещены вторичные эталоны. Первичные эталоны, когда они осуществлены в виде мер или измерительных приборов, изображены горизонтальными прямоугольниками, обведенными двойной линией. В случаях «естественных» эталонов они показаны горизонтальными овалами, также обведенными двойной линией. Вторичные эталоны представлены горизонтальными прямоугольниками, обведенными одной линией.

Ниже поля эталонов расположены поля образцовых мер и образцовых измерительных приборов по числу имеющихся разрядов. Внизу схемы расположено поле рабочих мер и измерительных приборов, охватываемых данной схемой. Поля разделены горизонтальными пунктирными линиями.

Соподчинение мер и измерительных приборов показано соединяющими их линиями, проходящими через круги или овалы, в которых указаны методы передачи единиц.

Наименования образцовых мер различных разрядов сопровождаются на схемах указанием предельной погрешности  $\delta_{пр}$  передачи от высшего звена схемы до данной меры (или измерительного прибора), а в некоторых случаях — указанием классов точности. Значения предельных погрешностей поверки образцовых мер установлены на основании опыта, накопленного в лабораториях ВНИИМ.

Точность рабочих мер и измерительных приборов характеризуется указанием на схемах классов точности, установленных для этих средств измерений соответствующими государственными стандартами. В тех случаях, когда классы точности для данного вида мер или приборов не установлены, их точность характеризуется ценой деления шкалы или допускаемой погрешностью  $\delta_{доп}$ , установленной для данного вида приборов. В некоторых случаях, когда не установлены и допускаемые погрешности, для рабочих приборов, аналогично образцовым, указаны предельные погрешности поверки  $\delta_{пр}$ . В виде исключения для отдельных видов мер, не имеющих деления по точности, погрешности вообще не указаны. Для пояснения сказанного выше о построении поверочных схем приводим две из них: поверочную схему для гирь и весов (рис. 1) и поверочную схему для нормальных элементов (рис. 2).

Поверочные схемы сопровождаются пояснительными текстами, дополняющими надписи на самих схемах. В текстах приводятся более подробные сведения об эталонах и образцовых мерах, а также о некоторых методах поверки. Кроме того, указаны учреждения Госкомитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР, в которых хранятся, поверяются и применяются те или иные эталоны и образцовые средства измерений.

Работа по составлению и изданию сборников поверочных схем имеет большое значение для нашей метрологии. Поверочные схемы должны служить руководящим материалом при сличениях и поверках эталонов и образцовых мер, при составлении поверочных схем для отдельных институтов и лабораторий, выполняющих поверочные работы, а также при составлении инструкций и других нормативных документов, относя-



щихся к поверочной деятельности. Проведенную работу нельзя, однако, считать законченной. В связи с развитием все новых отраслей измерительной техники для них также должны составляться поверочные схемы

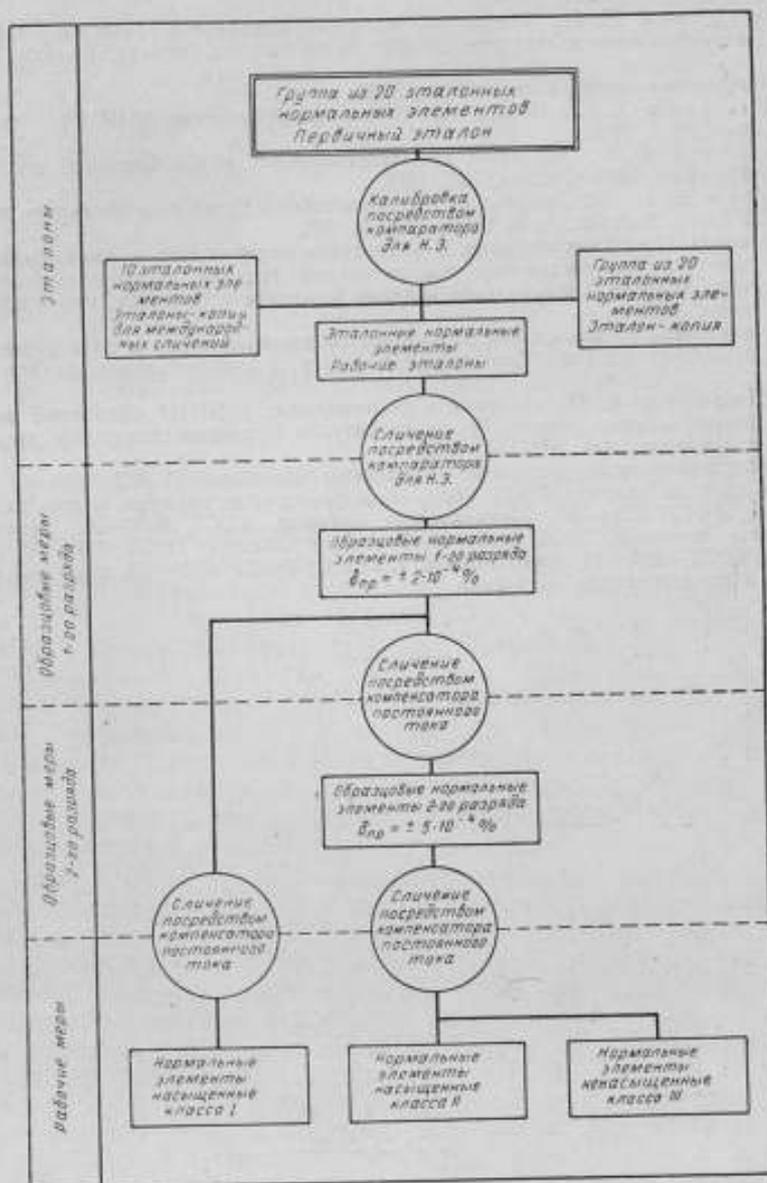


Рис. 2. Поверочная схема для нормальных элементов.

(например, для области измерений рН, для области газового анализа и др.). С другой стороны, развиваются и уже охваченные поверочными схемами области измерительной техники, что требует периодического пересмотра ранее составленных поверочных схем. Таким образом, работа по совершенствованию и модернизации поверочных схем должна продолжаться.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сто лет государственной службы мер и весов в СССР, ОГИЗ, 1945.
2. Маликов М. Ф., Основы метрологии, Издание Комитета по делам мер и измерительных приборов, 1949.
3. Тиходеев П. И., Очерки об исходных измерениях, Машиз, 1954.
4. Поверочные схемы, под ред. К. П. Широкова, проект, Издание ВНИИМ, 1956.
5. Поверочные схемы, Стандартгиз, 1960.
6. Широков К. П., Поверочные схемы, разработанные ВНИИМ, «Измерительная техника», № 7, 1960.
7. Sillsbee F. B., Extension and Dissemination of the Electrical and Magnetic Units by the NBS, NBS Circular, 531, 1952.
8. Grow E. L., An Analysis of the Accumulated Error in a Hierarchy of Calibrations, JRE Trans. Instrum., v. 9, No 2, 1960, p. 105.
9. Правила 12—58 организации и проведения поверки мер и измерительных приборов и контроля за состоянием измерительной техники, соблюдением стандартов и технических условий. Официальное издание Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, 1959.
10. Положение об эталонах и разрядных образцовых мерах и образцовых измерительных приборах, Издание Главной палаты мер и измерительных приборов СССР, 1954.
11. Широков К. П., О проекте рекомендации ВНИИМ «Основные метрологические термины и определения», Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 57(117), 1962.
12. Государственные стандарты на единицы измерений: ГОСТ 9867—61, Международная система единиц; ГОСТ 7663—55, Образование кратных и дольных единиц измерений; ГОСТ 7664—61, Механические единицы; ГОСТ 8033—56, Электрические и магнитные единицы; ГОСТ 8550—61, Тепловые единицы; ГОСТ 7932—56, Световые единицы; ГОСТ 8849—58, Акустические единицы; ГОСТ 8848—63, Единицы радиоактивности и ионизирующих излучений.

### О ПЕРЕХОДЕ В СССР НА МЕЖДУНАРОДНУЮ СИСТЕМУ ЕДИНИЦ (СИ)

С 1 января 1963 г. в СССР вступил в силу ГОСТ 9867—61 «Международная система единиц», который требует применения этой системы как предпочтительной во всех областях науки, техники и народного хозяйства, а также при преподавании. Этот ГОСТ введен в соответствии с решением XI Генеральной конференции по мерам и весам (Париж, октябрь 1960 г.) о принятии Международной системы единиц (СИ). В настоящее время правительственными декретами СИ принята также в ГДР, Чехословакии, Франции, Австрии и в других странах. Предполагается, что в дальнейшем другие системы единиц, допускаемые действующими стандартами СССР на единицы измерений, будут изъяты из употребления, и единицы СИ, за редкими исключениями, будут единственными, применяемыми во всех сферах науки и техники. Полная унификация единиц измерений принесет стране неисчислимую экономию умственного труда и времени.

Принятие в СССР Международной системы единиц является закономерным следствием развития мер и систем единиц, применявшихся в России, а затем и в СССР. Еще во второй половине XIX в. Российская академия наук активно участвовала в подготовке и заключении Метрической конвенции, положившей начало широкому распространению метрической системы мер. Россия была в числе 17 государств, первыми подписавших Метрическую конвенцию в 1875 г. Основную роль в переходе на метрическую систему мер сыграла Главная палата мер и весов — детище Д. И. Менделеева, который своими трудами и организацией государственной службы метрологии обеспечил базу для такого перехода. В Главной палате мер и весов с 1889 г. хранились копии международных прототипов метра и килограмма, которые и послужили основными эталонами при введении в СССР метрической системы мер в 1918 г. Переход на метрические меры был закончен к 1927 г.

В стандартизации единиц измерений в СССР можно различить несколько этапов. Если в первые годы советской власти стандартизовались отдельные единицы (1924—1954 гг.), а затем отдельные системы единиц для различных отраслей измерительной техники (1955—1961 гг.), то теперь мы подходим к введению Международной системы как единой универсальной системы единиц для всех отраслей знания.

Основная работа по подготовке стандартов на единицы измерений была выполнена во ВНИИМ. За период с 1927 по 1934 г. были разработаны стандарты на механические, электрические и магнитные единицы, единицы частоты и времени, температурные и тепловые, световые и акустические единицы, а также на единицы в области рентгеновского излучения и радиоактивности. С 1936 по 1938 г. вопросами, связанными со стандартизацией единиц в СССР, занималась Комиссия по единицам мер Отделения технических наук АН СССР. Комиссия обсудила различные предложения о выборе системы единиц, подлежащей стандартизации, и вынесла рекомендацию о принятии в качестве основных единиц системы метра, килограмма и секунды. В 1938 г. был образован Комитет по делам мер и измерительных приборов при СНК СССР, к которому перешли функции утверждения основных метрологических общесоюзных стандартов. Этим Комитетом были приняты Положение о световых единицах и Положение об электрических и магнитных единицах, подготовленные ВНИИМ на основе рекомендаций Комиссии по единицам мер. Оба Положения были изданы в 1948 г. и играли роль стандартов.

Следующим этапом была стандартизация систем единиц. В период с 1955 по 1961 г. Комитетом стандартов, мер и измерительных приборов при СМ СССР был введен ряд государственных стандартов, заменивших устаревшие к тому времени стандарты на единицы измерений. В новых стандартах были установлены системы единиц, допускаемые к применению в отдельных отраслях измерений. Так, в области механики допускались системы МКС, СГС и МКГСС, в области электротехники — МКСА и СГС симметричная, в области теплотехники — МКСГ, в области акустики — МКС и СГС, а в области светотехники — МСС. Все стандарты требовали отдавать предпочтение системам, включавшим основные единицы метр, килограмм и секунду, т. е., по существу, системам, позднее вошедшим в Международную систему единиц в качестве ее составных частей. Кроме указанных систем единиц, в стандартах предусматривалось применение ряда внесистемных единиц. Этот этап завершился принятием ГОСТ 9867—61 «Международная система единиц», положившим начало переходу на единую универсальную систему единиц — СИ.

В настоящее время перед страной поставлена задача завершить реформу единиц и обеспечить переход на эту систему во всех сферах научной и производственной деятельности. Для успешного перехода потребуется большой комплекс мероприятий, охватывающих многие стороны жизни страны.

Одним из наиболее важных мероприятий, обеспечивающим подготовку всего населения к применению новой системы единиц, является преподавание ее и всех дисциплин с применением единиц СИ в общеобразовательных школах, вузах и техникумах. Начало такого преподавания положено приказами Министра народного просвещения РСФСР и Министра высшего и среднего специального образования СССР, изданными еще в 1962 г. Международная система единиц все прочнее входит в учебный процесс, и учащиеся получают необходимые знания для успешного практического использования этой системы.

Не менее важным является и переход на применение единиц СИ в научно-технической и справочной литературе. Уже выпущен и выпускается ряд книг по техническим дисциплинам, изложенным с применением единиц СИ. Однако в некоторых изданиях переход производится лишь частично, с отступлениями от последовательного применения единиц СИ. Издательства должны требовать от авторов обязательного

применения единиц СИ в подготовленных для издания книгах, справочниках и статьях, чтобы обеспечить полный переход на эти единицы уже в ближайшее время.

Для перехода на единицы СИ в промышленности необходимо ввести новые единицы в государственные стандарты и технические условия, а затем и в другие виды технической документации (чертежи, описания, технические инструкции и т. д.).

Особое место занимает оснащение страны измерительными приборами всех видов, проградуированными в единицах СИ. Правда, значительное число физических величин уже и сейчас измеряется в этих единицах (и их кратных и дольных). Таковы, например, линейные размеры, масса, многие электрические величины, световые величины и т. п. Поэтому только некоторые виды приборов потребуют переградуировки или переделки (приборы для измерения давления, силы, некоторых тепловых величин, магнитных величин и т. п.). Конечно, переход в сфере производства будет проводиться постепенно, по мере введения единиц СИ в государственные стандарты на соответствующие виды изделий и материалов, и будет регулироваться Госкомитетом стандартов, мер и измерительных приборов СССР. Большой объем подлежащей пересмотру нормативной и технической документации и большое количество подлежащих переградуировке приборов потребуют для проведения этой работы нескольких лет.

Это, однако, не должно задерживать перехода на новые единицы в научно-исследовательских и расчетных работах. Опыт некоторых научных учреждений и выпуск из печати справочников по расчету, составленных в единицах СИ, подтвердил полную возможность применения единиц СИ в работах этого рода.

В настоящее время Госкомитет стандартов, мер и измерительных приборов СССР разрабатывает план мероприятий, которые позволят осуществить внедрение Международной системы единиц в нормативную техническую документацию (стандарты и технические условия на промышленные изделия и материалы), в преподавание, научно-техническую литературу и в практику всех отраслей народного хозяйства.\*

Переход на Международную систему единиц обеспечит дальнейший прогресс науки, техники и всего народного хозяйства страны.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Богуславский М. Г., Широков К. П., Международная система единиц. Пособие для лекторов и пропагандистов, Издательство стандартов, 1964.
2. Богуславский М. Г., Кремлевский П. П., Олейник Б. Н., Чечурин Е. Н., Широков К. П., Таблицы перевода единиц измерения, Стандартгиз, 1963.
3. Бурдун Г. Д., Единицы физических величин, Стандартгиз, 1963.
4. Коротков В. П., К введению Международной системы единиц в СССР, «Измерительная техника», № 2, 1963; «Стандартизация», № 3, 1963.
5. Широков К. П., Развитие метрической системы мер и пути перехода в СССР к Международной системе единиц, «Измерительная техника», № 4, 1964.

\* Ко времени выхода в свет настоящего сборника план был принят Госкомитетом и успешно реализуется. Порядок внедрения СИ, принятый Госкомитетом, освещен в статье члена Госкомитета А. И. Излева (см. журналы «Измерительная техника», № 9, 1964 и «Стандартизация», № 9, 1964).

РАБОТЫ ВНИИМ  
В ОБЛАСТИ ОСНОВНЫХ КОНСТАНТ

Физические константы являются неотъемлемой частью физических теорий, а также физического и технического эксперимента. Наряду с измеренными значениями величин они придают теориям и опыту конкретный численный характер. Естественно, этим далеко не исчерпывается роль констант.

На протяжении нашего столетия была установлена дискретность таких величин, как электрический заряд, орбитальный и спиновый моменты электрона, излучение, и многих других квантуемых величин атомной и ядерной физики.

Роль квантуемых величин необычайно велика в атомной физике элементарных частиц. И вопрос заключается не только в том, чтобы определять физические константы, но и в том, чтобы уточнять их, так как это позволяет повышать уровень и достоверность самих физических теорий.

Уточнение ряда универсальных констант физики имеет большое значение для прогресса метрологии. Переход на естественные эталоны становится возможным только тогда, когда константа, как основа единицы, определена в существующих единицах с точностью, не уступающей их воспроизведению.

До 30-х годов нашего столетия вопрос об определении констант решался разобщенно, иными словами, не рассматривалась совокупность констант, объединенных физическими зависимостями.

При требовавшейся в XIX в. точности измерений комплексное решение проблемы оценки значений констант не вызывалось необходимостью. В таких условиях ставились первые опыты по определению постоянных Авогадро, Фарадея, универсальной газовой и др.

В самом общем случае методы определения констант опираются либо на косвенные, либо на совместные измерения и, таким образом, по своей точности уступают методам, основанным на прямых (относительных) измерениях.

В настоящей статье рассматривается современное состояние и в отдельных случаях исторические аспекты вопроса об определении некоторых физических констант, имеющих важное значение для метрологии.

## Скорость света $c$

Наиболее далекую историю имеет константа  $c$  — скорость света, значение которой астрономы начали определять во второй половине XVII в.

Существенные уточнения в определении  $c$  связаны с переходом от астрономических методов к физическим.

Если учесть, что величина  $c$  входит в многочисленные зависимости в электродинамике, атомной физике и теории относительности, в радиолокации, а также в теории систем единиц, то станет ясным, сколь важное значение имеет дальнейшее уточнение этой величины.

Физические методы определения  $c$  связаны с именами Физо (1849 г.), Фуко (1868 г.), Майкельсона (1879 г.), который вычислил скорость света с погрешностью 75 км/сек.

На рубеже нашего столетия погрешность определения  $c$  снизилась до 20 км/сек, но в последующие десятилетия, по крайней мере до 30-х годов, точность определения  $c$  повысилась незначительно, несмотря на большое число опытов, проводившихся в разных странах. Начиная с 40-х годов, работы по определению  $c$  получили широкое развитие, причем методы их могут быть классифицированы по трем признакам:

- 1) диапазон ультракоротких и микрорадиоволн с применением соответственно радиоинтерферометров и полых резонаторов;
- 2) диапазон волн видимой части спектра с применением модуляторов света (ячейка Керра, интерференционный модулятор);
- 3) определение  $c$  по отношению резонансных частот поглощения микрорадиоволн для некоторых веществ.

В табл. 1 приводятся результаты определения  $c$  за 10 лет — с 1949 по 1959 г.

Таблица 1

Автор	Метод	Год	$c$ , км/сек.
Фрум (НФЛ)	Микроволновый интерферометр	1949	$299\,793,0 \pm 0,3$
Эсаев (НФЛ)	Полые резонаторы	1950	$792,5 \pm 1$
Карташев (ВНИИМ)	Многолучевой интерференционный модулятор	1951	$794 \pm 6$
		1952	$788 \pm 5$
Бергетранд (Швеция)	Свет, модулированный ячейкой Керра	1952	$793,1 \pm 0,25$
Эдж (США)	То же	1953	$792,2 \pm 0,13$
Величко, Васильев, Голосов (МИИГАИК)	Две ячейки Керра	1955	$793,9 \pm 1,0$
Пайер, Блейк	Полосы поглощения СО в инфракрасной области и резонансное поглощение микрорадиоволн	1955	$792 \pm 6$
Райк и другие	Полосы поглощения НС и резонансное поглощение микрорадиоволн	1957	$793,7 \pm 0,7$
Фрум (НФЛ)	Микроволновый интерферометр	1959	$792,5 \pm 0,1$

Из приведенных данных, далеко не исчерпывающих всех работ по определению  $c$ , видно, что расхождения результатов во многих случаях превышают погрешности, приводимые авторами.

Если учесть дополнительно некоторые работы, то будем иметь средневзвешенное значение  $c$ , равное

$$c = 299\,792,5 \pm 0,5 \text{ км/сек},$$

где  $0,5 \text{ км/сек}$  — предельная погрешность. Формально она меньше, однако расхождения результатов, полученных отдельными авторами, превышающие остаточные погрешности, свидетельствуют о наличии некоторых систематических погрешностей.

Применение газовых лазеров непрерывного действия совместно с интерферометром может дать существенное повышение точности измерения скорости света. По данным, опубликованным в 1962 г. в журнале *Electronic Design* (v. 10, № 12, p. 14—15), сотрудник лаборатории General Electric's General Engineering Laboratory Холеман определил скорость света с погрешностью  $\pm 3 \text{ м/сек}$ .

Значения  $c$  в настоящее время уточняются в разных странах. В СССР работы ведутся во ВНИИМ и в ХГИМИП.

### Постоянная Авогадро $N$

Гипотеза об одинаковом числе молекул разных веществ в равных объемах была высказана Авогадро в 1811 г., но измерения этой постоянной впервые были проведены Лошмидтом (Вена) в 1865 г., спустя девять лет после смерти Авогадро. Однако Лошмидт определил лишь нижнюю границу этого числа.

В 1908 г. французский физик Перрен производил опыты со взвешенными в воде однородными частицами гуммигута и смолы с целью доказательства атомного строения материи. Его опыты позволили получить нижнюю границу числа Авогадро ( $N > 4,4 \cdot 10^{23}$ ) в грамм-моле газа.

Позднейшие опыты ставили своей целью определить число Авогадро, которое уточнялось от опыта к опыту. В частности, оно определялось по постоянной Фарадея и заряду электрона, но наиболее точные результаты были получены дифракцией рентгеновых лучей на решетках кристаллов исландского шпата, поваренной соли, алмаза и некоторых других. Независимо от результатов определения других констант, число  $N$  в физической шкале атомных весов получило значение  $(6,02252 \pm 0,00028) \cdot 10^{26} \text{ молекул/(кмоль)}$ .

Следует заметить, что при определении  $N$  полагали длину волны X-лучей равной  $0,001 \text{ \AA}$ . Однако работы Зигбана показали неточность этого значения. В связи с этим одной из главнейших задач в проблеме оценки значений констант стало уточнение отношения длины волны X-лучей к ангстрему. В настоящее время оно полагается равным  $1,002020 \pm 30 \cdot 10^{-6}$ .

### Постоянная Фарадея $F$

В связи с установлением практической системы электрических единиц в конце прошлого века возникла необходимость определить значение постоянной Фарадея  $F$ . Электрохимические методы в большинстве случаев осуществлялись с серебряным и значительно реже с йодным вольтаметром.

В течение 30 лет (с 1916 по 1946 г.) нигде не производилось повторного определения  $F$ , хотя уже с 30-х годов возникли сомнения в правильности значения, полученного в 1916 г.

Причиной сомнений в значении  $F$  было определение двумя методами удельного заряда электрона  $e/m$ , значение которого получалось суще-

ственно различным. В один из методов при вычислении  $e/m$  входила величина  $F$ .

Важность этой константы необходимо подчеркнуть потому, что она дает одно из уравнений, которые используются для определения других констант. Опыты по уточнению  $F$  производятся в настоящее время в НБЭ и в Рокфеллеровском институте медицинских исследований в Нью-Йорке.

При опытах с серебряным вольтметром экспериментаторы столкнулись с рядом трудностей. Было неясно, входит ли в серебро, отложенное на катоде, какое-либо другое вещество из электролита, весь ли осадок оседает на катоде.

Неясен был также изотопический состав серебра, в связи с чем нельзя было уточнить его атомный вес.

К настоящему времени многое выяснено и одновременно предприняты большие исследования с йодным вольтметром.

Будущее покажет, в какой мере работа с йодным вольтметром будет успешной. Большое преимущество йода в том, что он существует в природе в виде одного изотопа, а недостаток — его летучесть.

В 1961—1962 гг. при обобщении данных по константам использовались результаты, полученные при опытах с серебряным вольтметром.

В физической шкале атомных весов постоянная  $F$  равна  $(96487,0 \pm 1,6) \cdot 10^3$  к/кмоль.

#### Гиромагнитное отношение протона $\gamma$

Явление протонного резонанса открыло перед экспериментаторами новые пути определения гиромагнитного отношения протона, обладающего, подобно электрону, спином, а следовательно, и магнитным моментом, что вызывает прецессирование дипольной оси протона в постоянном магнитном поле.

При первых опытах, проведенных в конце 40-х годов в НБЭ, использовали сильное поле электромагнита, индукция которого измерялась по силе, действующей на прямоугольную рамку с током. Результаты этих опытов были недостаточно достоверны. Причина, как предполагают, заключалась в том, что не была обеспечена перпендикулярность силовых линий плоскостям полюсных наконечников. Как показала работа, проводившаяся в Харьковском институте мер и измерительных приборов, в этом методе было несколько источников ошибок, которые и были учтены институтом. Высокий уровень работы ХГИМИП был подтвержден рабочей группой Консультативного комитета по электричеству на ее заседаниях в Лондоне в конце апреля и начале мая 1963 г.

В последующие годы получили большое развитие методы измерения  $\gamma$  в слабых магнитных полях.

Поле создается током, протекающим по соленоиду, размеры которого определены с высокой точностью (порядка 1 мм). Образец воды поляризуется в сильном магнитном поле и выливается в соленоид. Импульсом тока высокой частоты устанавливается ориентация осей протонов под углом  $90^\circ$  по отношению к полю соленоида, и в специальной катушке наблюдается сигнал прецессии.

По существу, различные модификации методов заключаются лишь в способе измерения частоты прецессии протона. Работы ВНИИМ по определению гиромагнитного отношения протона методом свободной ядерной индукции в слабых полях были начаты в 1956—1957 гг. Осо-

бенность их заключается в том, что в качестве источника постоянной индукции были использованы десять пар колец Гельмгольца, специально изготовленных для этой цели. Индукция, возникающая в центральной области пары колец при токе  $I = 1$  а, находилась в пределах  $0,58 \div 0,67$  гс (в НБЭ индукция равнялась 12 гс). Индукция поляризующей катушки составляла 2600 гс.

Результаты определения  $\gamma$  в  $\text{м}^2/(\text{аб} \cdot \text{сек})$ , полученные разными лабораториями, следующие:  $(267\,506 \pm 6) \cdot 10^3$  (ВНИИМ, 1962 г.),  $(267\,509 \pm 6) \cdot 10^3$  (ХГИМИП, 1962 г.),  $(267\,523 \pm 6) \cdot 10^3$  (НБЭ, 1955 г.) и  $(267\,514 \pm 2) \cdot 10^3$  (НБЭ, 1962 г.).

Каждую из постоянных  $\gamma$  и  $F$  можно определять двумя различными методами. Не вдаваясь в подробности, отметим, что при высокой степени достоверности определения  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  двумя методами или  $F_x$  — химическим и  $F_\phi$  — физическим методами, можно найти ампер в абсолютной мере и сравнить его с ампером, определяемым на токовых весах. К сожалению, эти работы у нас до сих пор не ведутся.

### Ускорение силы тяжести $g$

Ускорение силы тяжести не является универсальной константой физики, однако как локальная константа оно имеет исключительное значение в различных физических и технических исследованиях. Невозможно переоценить роль  $g$  в решении многочисленных метрологических задач.

Не останавливаясь подробно на истории вопроса, следует отметить, что определение в абсолютной мере значения  $g$  (Потсдам, 1906 г.) было крупнейшей вехой международной гравиметрии. Сравнительная гравиметрия очень точно определяет не только разницу в значениях  $g$  для отдельных пунктов, но и абсолютное значение  $g$ , привязанное к Потсдаму.

В течение трех десятилетий потсдамское значение  $g$  считалось исходным для мировой гравиметрии. Погрешность его оценивалась в  $0,003 \text{ см/сек}^2$ , однако сопоставление результатов по определению ряда физических констант указывало на наличие систематической погрешности в значении  $g$ , большей приведенной в  $3 \div 5$  раз.

Д. И. Менделеев своевременно понял необходимость уточнить значение  $g$  и с момента основания Главной палаты мер и весов считал это одной из ее задач. Для уточнения значения  $g$  была изготовлена специальная аппаратура и построена башня с колодезем, в которой можно было наблюдать качание маятника длиной 36 м. Такие наблюдения проводились в Главной палате мер и весов (теперь ВНИИМ) А. А. Ивановым в 1911 г. и А. В. Басковым и В. У. Старцевым в 1936—1938 гг. Полученные ими данные имели большое значение для накопления опыта по определению  $g$ .

В тридцатых годах в НБЭ (Вашингтон) и в НФЛ (Тедингтон) были осуществлены абсолютные определения  $g$  как методом маятников, так и методом свободно падающего стержня. К этому времени методика измерения промежутков времени достигла высокой степени совершенства и в результате выяснилось, что потсдамское значение  $g$  было завышено на  $15 \div 20 \text{ мгал}$ . С 1947 г. во ВНИИМ начались работы по определению  $g$  в абсолютной мере методами: 1) поворотных маятников из кварца, имеющих одинаковую массу, но разные длины (всего было три маятника), 2) совмещенного свободного и несвободного падения тел и 3) падения стержня в вакууме. К 1955 г. метод свободного паде-

ния стержня получил применение в МБМВ (Франция), в Научно-исследовательском совете (Канада) и в НБЭ (США).

Результаты этих определений  $g$  к настоящему времени опубликованы за исключением последней незаконченной работы, проводимой в США. К сожалению, необходимо констатировать, что данные, опубликованные Дюмондом в 1959 г., неточно интерпретируют полученные у нас результаты.

Отклонения значений  $g$  от потсдамского, полученные в СССР, США, Англии, Канаде и Франции, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Страна	Годы	Метод	Отклонение $g$ от потсдамского значения, $см/сек^2$
СССР	1947—1956	Маятники	-0,012
		Совмещенное свободное и несвободное падение тел	-0,009
		Свободное падение стержня	-0,008
США	1936	Маятник	-0,018
Англия	1939	"	-0,014
		Свободное падение стержня	-0,015
Франция	1952	То же	-0,024
Канада	1958	"	-0,016

Из этих данных следует, что, несмотря на высокий уровень проведенных работ, расхождение результатов превышает остаточные погрешности, которые оцениваются авторами работ не выше  $0,001 \text{ см/сек}^2$  и даже менее.

### Другие константы

Методологическая основа всей проблемы определения физических констант заключается в том, что используются некоторые зависимости между ними, которые наиболее точно могут определяться экспериментальным путем. По крайней мере, это имеет место для следующих констант:

- 1)  $\alpha$  — постоянная тонкой структуры,
- 2)  $e$  — заряд электрона,
- 3)  $N$  — число Авогадро,
- 4)  $\Lambda$  — отношение длины волны X-лучей, выраженной в миллиангстремах, к длине волны X-лучей, выраженной в шкале Зигбана.

Если учесть, что в выражение для  $\alpha$  входит постоянная Планка  $h$ , то станет ясно, что зависимости, охватывающие эти величины, позволяют определить  $\alpha$ ,  $e$ ,  $\Lambda$  и  $h$ .

Результаты экспериментальных данных показывают, что приведенные в табл. 3 константы могут быть определены с указанными в ней погрешностями.

Для определения этих констант необходимо отдельно найти скорость света  $c$ , о которой сказано ранее и для определения которой осуществляются независимые методы.

Как следует из приведенных данных, порядок погрешностей результатов один и тот же для определений указываемых констант, однако использование этих данных для определения  $\alpha$ ,  $e$ ,  $N$  и  $\Lambda$  по способу

Постоянное	Обозначение	Погрешность определения в процентах $\times 10^0$
Постоянная Фарадея	F	$\pm 2$
Коэффициент Зигбана	$\Lambda$	$\pm 3$
Отношение $N/\Delta^3$	—	$\pm 4$
Гиромагнитное отношение протона	$\gamma$	$\pm (2 \div 3)$
Магнитный момент протона в ядерных магнетонах	$\mu_p$	$\pm (1 \div 4)$
Величина, определяемая по расщеплению тонкой структуры в дейтерии	$a^2c$	$\pm (1 \div 5)$
Величина, определяемая по коротковолновой границе непрерывного рентгеновского спектра	$ec/\Delta\lambda$	$\pm (4 \div 8)$

наименьших квадратов требует тщательного анализа всех экспериментальных условий.

Это относится не только к тем случаям, когда одна и та же величина определяется различными методами, но и к тем, когда используется один метод.

Как показали работы американских исследователей Дюмонда и Коэна, к 1961 г. значения  $\Lambda$ , а следовательно, и  $N/\Delta^3$ , определенные по константам решетки и плотности различных кристаллов, имеют такие расхождения результатов (более  $5 \cdot 10^{-30}/\text{г}$ ), которые не позволяют использовать их в числе исходных для обработки методом наименьших квадратов.

Точно так же детальный анализ определения гиромагнитного отношения протона  $\gamma$  в сильных полях (1950 г., Томси, НБЭ) показал, что полученный результат не может быть использован для включения в общую совокупность данных для нахождения универсальных физических констант. Это послужило толчком для начала работ по определению  $\gamma$  как в США, так и в других странах новыми методами (слабые поля) и к усовершенствованию метода в сильных магнитных полях.

### Заключение

Работы по определению и уточнению физических констант имеют большое значение не только в общенаучном плане, но и потому, что они являются основой для перехода на естественные эталоны.

Метрологическая сторона этой проблемы заключается в том, что должны быть выбраны константы, которые в наибольшей степени могут стать основой единиц, как это уже становится возможным для единиц длины, времени и частоты.

Такие константы должны определяться с наибольшей возможной точностью в существующих единицах и эти определения и уточнения должны производиться в том метрологическом институте, в котором хранятся и воспроизводятся эталоны физических единиц.

Константы, не представляющие непосредственного интереса для метрологии, но имеющие значение для физических и технических исследований, должны определяться и уточняться в других институтах — как системы Госкомитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР, так и других комитетов и АН СССР. Координация решения этой проблемы должна оставаться за ВНИИМ.

**РАБОТА ВНИИМ ПО СОЗДАНИЮ ЭТАЛОНОВ  
АБСОЛЮТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЕДИНИЦ**

Переход в первой половине текущего столетия от международной системы электрических и магнитных единиц к абсолютным единицам потребовал установления во всем мире новых эталонов, воспроизводящих эти единицы в абсолютной мере, т. е. через единицы длины, массы и времени. Теоретически для такого перехода достаточно было бы воспроизвести одну какую-либо из электрических или магнитных единиц, практически же, как известно, требуется воспроизведение в абсолютной системе по крайней мере двух единиц — ампера и вольта, или ампера и ома, или же, наконец, ома и вольта.

Наиболее достижимым в отношении точности измерения оказалось воспроизведение ампера и ома, которые и были приняты в качестве основных эталонов во всех странах, в том числе и в Советском Союзе. Работы по их воспроизведению сводятся, в конечном счете, к абсолютным измерениям силы тока и сопротивления, т. е. к таким измерениям, при которых непосредственно измеряемыми величинами служат длина, масса и время, а определяемая величина вычисляется по формулам, связывающим ее с основными величинами.

**Абсолютные измерения силы тока  
(воспроизведение эталона ампера)**

Следует отметить, что единица силы тока — ампер, принятая СИ за основную единицу, т. е. независимую от каких-либо других единиц, в сущности не является таковой, так как ампер определяется величиной метра, килограмма и секунды. Это можно видеть и из самого определения ампера как основной единицы, в котором говорится, что ампер есть сила такого тока, который, проходя по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого, в вакууме вызвал бы между этими проводниками силу, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  единицы силы СИ на каждый метр длины, т. е.  $2 \cdot 10^{-7}$  н. Из этого определения следует, что произвольность ампера заключается лишь в выборе силы взаимодействия, которая при когерентности системы должна бы иметь значение, равное единице, здесь же она равна  $2 \cdot 10^{-7}$ .

Однако, пользуясь таким определением ампера, воспроизвести его, т. е. осуществить установку и измерить силу взаимодействия между бесконечно длинными проводниками, практически невозможно. Поэтому при постановке эксперимента приходится пользоваться более общим законом Ампера взаимодействия между проводниками, который в интегральной форме для двух замкнутых проводников имеет вид:

$$F_z = \frac{I_1 I_2}{c^2} \cdot \frac{\partial M}{\partial z}, \quad (1)$$

где  $F_z$  — составляющая силы взаимодействия в направлении  $z$ ;  
 $I_1$  и  $I_2$  — токи в каждом из проводников;  
 $M$  — взаимная индуктивность между этими проводниками;  
 $c$  — скорость света.

Если токи в обоих проводниках одинаковы, т. е. если  $I_1 = I_2 = I$ , то из формулы (1) следует, что

$$I = c \sqrt{F_z} \frac{\partial M}{\partial z}. \quad (2)$$

Взаимная индуктивность, в свою очередь, выражается формулой

$$M = \oint \oint \frac{dl_1 dl_2}{r}, \quad (3)$$

где  $dl_1$  и  $dl_2$  — элементы длины проводников,  
 $r$  — расстояние между ними;

интегрирование же распространяется по замкнутым контурам обоих проводников.

Из формулы (3) видно, что  $M$  зависит лишь от геометрической формы, размеров проводников и взаимного их расположения, и, следовательно, является чисто геометрической величиной, размерность которой есть длина.

Формула (2) дает прямую связь силы тока с чисто механическими величинами, силой и скоростью, и является единственной, выражающей силу тока через основные единицы. Таким образом, проблема абсолютных измерений силы тока сводится к построению катушек взаимной индуктивности, определению их геометрических размеров и к измерению силы взаимодействия между катушками, когда по ним протекает ток  $I$ . С первого взгляда кажется, что такая задача вряд ли может представить какие-либо затруднения, чтобы считать ее проблемной, в действительности же, как показывает опыт всех метрологических учреждений мира, задача абсолютных измерений любой физической величины почти всегда вырастает в проблему, когда требуется согласовать точность измерений с той точностью, которая предъявляется практикой.

Трудности, встречающиеся на пути к осуществлению абсолютных измерений силы тока, заключаются не столько в самих непосредственных измерениях длины, массы и времени, сколько в изготовлении тех соленоидов или катушек, взаимодействие между которыми требуется определить.

Теоретические расчеты показывают, что для достижения в измерении силы тока такой же точности, как и при относительных измерениях, характеризуемой погрешностью порядка  $10^{-7}$ , потребовалось бы изготовить соленоид в форме цилиндра, диаметры которого по всей длине и по любой образующей не отличались бы друг от друга больше чем на  $10^{-6}$  его величины, что при диаметре в 30 см составило бы разность в 0,1 мкм.

Такая же точность должна быть выдержана и в остальных размерах, а именно в расстояниях между соленоидами и в их соосности.

Во ВНИИМ работа по установлению эталонов абсолютных электрических единиц была начата в 1938 г. под руководством Л. В. Залуцкого. Им была разработана установка для измерения силы тока, так называемые ампер-весы, или токовые весы, а также подготовлена к печати монография «Основы теории ампер-весов».

Прерванные в 1941 г. работы были возобновлены в 1945 г. под руководством Б. М. Яновского при непосредственном участии Н. А. Волкова и С. В. Горбачевича. В 1952 г. они завершились определением э. д. с. эталонной группы нормальных элементов в абсолютных единицах.

Разработанные и построенные в последние годы токовые весы для абсолютных измерений представляли собой установку, основными частями которой являлись рычажные весы и катушка взаимной индукции (рис. 1).

В качестве рычажных весов, служивших для измерения силы взаимодействия, были использованы обычные равноплечие весы лабораторного типа грузоподъемностью до 3 кг. Отличительной особенностью их являлась более высокая чувствительность ( $S = 25 \text{ дел/мг}$ ) по сравнению с чувствительностью существующих весов и тщательность выбора материала для их изготовления. Все без исключения детали обладали относительной магнитной восприимчивостью менее  $4\pi \cdot 10^{-6}$  единиц СИ.

К одному из плеч коромысла подвешивалась вторичная обмотка (подвижный соленоид ПС) катушки взаимной индуктивности, а ко второму — уравновешивающий груз.

Катушка взаимной индуктивности состояла из двух соленоидов: подвижного (вторичного), и неподвижного НС (первичного), внутри которого помещался подвижный.

Неподвижный соленоид представлял собой полый цилиндр, на наружной поверхности которого спирально навита однослойная обмотка из медной проволоки. Каркас соленоида (длина 50 см, диаметр около 27 см, толщина стенок 2 см) изготовлен из специального стекла пирекс. Вторичный подвижный соленоид состоял из двух однослойных соленоидов, имеющих по 58 витков, связанных concentрично (диаметр одного — 21,5 см, другого — 18,7 см, высота — 4,55 см). Обмотки обоих соленоидов соединены последовательно. Уравновешивающим грузом на весах служил такой же соленоид.

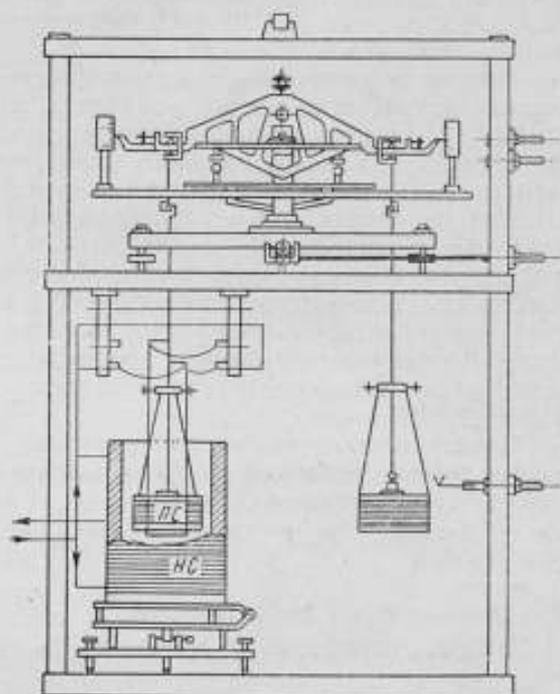


Рис. 1. Токовые весы для абсолютных измерений.

Подвижный соленоид был оснащен специальной арматурой, при помощи которой он скреплялся с серьгой и подвешивался к коромыслу весов. При наличии наиболее совершенного оборудования, которое имелось в распоряжении изготовителей и, несмотря на тщательность изготовления соленоидов, все же не удалось выдержать их нужные геометрические размеры. Среднее значение диаметра неподвижного цилиндра оказалось равным 27,1602 см с отклонениями от действительных значений до  $\pm 50$  мкм.

Однако теоретические расчеты показали, что при случайных отклонениях диаметра от среднего значения, не превосходящих 50 мкм, т. е.  $2 \cdot 10^{-4}$  его величины, взаимная индуктивность соленоидов, вычисленная по среднему диаметру, должна отличаться от действительного менее чем на  $4 \cdot 10^{-5}$ . Поэтому среднее значение диаметра было получено из данных измерений диаметра неподвижного цилиндра в 108 различных сечениях, а подвижного — в 30. Зная же диаметр, высоту и взаимное расположение соленоидов, можно было по соответствующей формуле вычислить производную взаимной индуктивности  $dM/dz$ , которая получила название постоянной токовых весов. Численно она представляет силу взаимодействия между соленоидами, когда в них протекает ток в 1 а. Для соленоидов указанных выше размеров постоянная  $F_0 = 0,0386055$  н/а.

Следовательно, чтобы уравновесить силу взаимодействия между соленоидами, необходимо к уравнивающему грузу добавить гирьку, масса которой  $m$  была бы равна

$$m = \frac{F_0 I^2}{g},$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести.

Отсюда, определив  $m$ , можно найти силу тока по формуле

$$I = \sqrt{mg/F_0}. \quad (4)$$

При силе тока  $I = 1$  а масса уравнивающей гирьки составляет 3,9 г.

Само по себе измерение силы тока таким способом не представляло бы никакого интереса, если бы этот ток нельзя было связать с каким-либо постоянным его значением или с какой-либо другой электрической величиной, которая сохраняет свое значение и после прекращения процесса измерения. Такой величиной может служить э. д. с. нормального элемента. Поэтому абсолютные измерения силы тока, в сущности, сводятся к абсолютным измерениям э. д. с.  $E_n$  нормальных элементов. Однако при этом необходимо иметь проводник, сопротивление которого  $R_n$  известно в абсолютных единицах. Таким проводником в данном случае служила эталонная катушка сопротивления с номинальным значением 1 ом. Принципиальная схема измерения э. д. с. нормальных элементов при помощи токовых весов показана на рис. 2.

Значения тока  $I$ , вычисляемые по формуле (4), как показали теоретические расчеты и экспериментальные данные, могли содержать не исключенную систематическую погрешность, не превышающую  $4 \cdot 10^{-6}$ .

Погрешность  $\delta I$ , обусловленная случайными погрешностями непосредственных измерений силы взаимодействия, вычисленная из сопоставления ряда независимых наблюдений, в большинстве случаев не превышала  $5 \cdot 10^{-6}$ , а средняя квадратичная погрешность одного измерения составила  $3 \cdot 10^{-6}$ . Таким образом среднюю погрешность абсолютного значения силы тока, а следовательно, и э. д. с. нормаль-

ного элемента можно оценить как  $1 \cdot 10^{-5}$  ее величины. В табл. 1 приводятся результаты измерений на токовых весах э. д. с. шести нормальных элементов, из которой можно видеть справедливость выводов относительно случайных погрешностей  $\delta E$ .

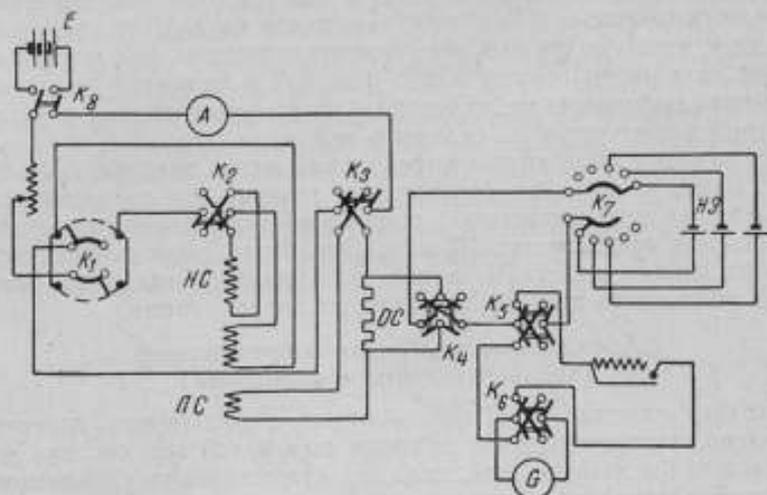


Рис. 2. Принципиальная схема измерения э. д. с. нормальных элементов на токовых весах.

$E$  — источник постоянного тока;  $NS$  — неподвижный соленоид;  $PS$  — подвижный соленоид;  $OC$  — катушка сопротивления;  $HZ$  — нормальный элемент;  $K_1 - K_6$  — переключатели.

Таблица 1

Серия наблюдений	Измеренные на токовых весах значения э. д. с. $E$ нормальных элементов											
	5226		5530		5539		5541		5585		5586	
	$E$	$\delta E$	$E$	$\delta E$	$E$	$\delta E$	$E$	$\delta E$	$E$	$\delta E$	$E$	$\delta E$
1	1,018603	-5	1,018603	-2	1,018612	-4	1,018616	+1	1,018581	-3	1,018587	-1
2	605	-3	605	0	616	0	617	+2	585	+1	591	+3
3	604	-4	606	+1	618	+2	622	+7	581	-3	588	0
4	605	-3	606	+1	616	0	614	-1	585	+1	589	+1
5	613	+5	610	+5	623	+7	613	-2	585	+1	585	-3
6	611	+3	609	+4	618	+2	615	0	587	+3	587	-1
7	611	+3	607	+2	613	-3	616	-5	584	0	586	-2
8	608	0	607	+2	619	+3	613	-2	584	0	586	-2
9	610	+2	602	+3	615	-1	615	0	584	0	587	-1
10	611	+3	599	-6	614	-2	616	+1	581	-3	592	+4
Среднее	1,018608	-	1,018605	-	1,018616	-	1,018615	-	1,018584	-	1,018588	-
Погрешности средних квадратичной выборкой, $\mu$	$\pm 4,0$		$\pm 3,1$		$\pm 3,3$		$\pm 3,1$		$\pm 2,1$		$\pm 2,3$	
	$\pm 2,7$		$\pm 2,1$		$\pm 2,2$		$\pm 2,1$		$\pm 1,4$		$\pm 1,5$	

Таким образом, абсолютное значение э.д.с. эталонов группы нормальных элементов можно определить лишь с точностью, характеризующей погрешностью порядка  $6 \div 7$  мкв, в то время как относительные измерения позволяют сравнивать э.д.с. одного элемента с э.д.с. другого и, следовательно, передавать значения э.д.с. от эталона к рабочим мерам с погрешностью  $0,1 \div 1$  мкв, т. е. почти на два порядка выше.

Поэтому, чтобы сохранить эту точность передачи, приходится последним двум значащим цифрам э.д.с. (шестой и седьмой) после запятой приписывать произвольные значения, которые получаются в результате вычислений с точностью до седьмого знака.

По окончании абсолютных определений э.д.с. токовые весы продолжают служить в качестве «хранителя» эталона э.д.с., который позволяет следить за изменениями э.д.с. каждого нормального элемента, если эти изменения превосходят 10 мкв. Для этого периодически производятся абсолютные измерения э.д.с., т. е. повторяется весь тот цикл, который имел место при первоначальных определениях.

### Абсолютные измерения сопротивления (воспроизведение эталона ома)

Поскольку единица силы тока — ампер в абсолютной системе была установлена, воспроизведение эталона ома в той же системе уже не представляло бы затруднений, если бы существовала удовлетворительная методика измерения энергии с той точностью, которая требуется для измерения электрических величин. Однако таких методов пока не существует, и поэтому, как указывалось выше, приходится единицу сопротивления устанавливать при помощи абсолютных измерений, пользуясь связью между  $R$  и основными величинами, выражаемой уравнениями

$$R = \omega L \quad \text{и} \quad R = \frac{1}{\omega C},$$

где  $L$  — индуктивность какого-либо контура,  
 $C$  — емкость,

$\omega$  — угловая частота переменного тока.

При этом  $L$ , аналогично взаимной индуктивности  $M$ , выражается формулой (3), в которой  $dl_1$  и  $dl_2$  будут представлять отрезки одного и того же контура, взятые в двух разных его точках.

Таким образом, и в этом случае для воспроизведения ома необходимо иметь катушку с индуктивностью  $L$  или взаимной индуктивностью  $M$ , которую можно было бы рассчитать, исходя из ее геометрических размеров.

Измерение  $R$  в этом случае производится при помощи моста переменного тока, в одном из плеч которого находится измеряемое сопротивление  $R$ , а в другом — известная емкость  $C$  или индуктивность  $L$ .

Кроме того, пользуясь тем, что при прохождении в первичной обмотке катушки взаимной индуктивности меняющегося тока  $i$  во вторичной — должна возникать э.д.с.  $\varepsilon$ , выражаемая уравнением

$$\varepsilon = M \frac{di}{dt}, \quad (5)$$

можно получить метод измерения  $R$ , отличающийся от мостовых методов. Действительно, полагая, что  $i$  — периодическая функция с периодом  $T$ , и интегрируя выражение (5) в пределах от 0 до  $T/2$ , будем иметь

$$\varepsilon_{\text{ср}} = \frac{4M}{T} I_m = 4MnI_m,$$

где  $I_m$  — максимальное значение тока  $i$ ,  
 $n$  — частота переменного тока.

Далее, компенсируя  $\varepsilon_{cp}$  падением напряжения на измеряемом сопротивлении, по которому протекает постоянный ток, мы получим уравнение

$$\varepsilon_{cp} = IR = 4MnI_m.$$

При равенстве токов

$$R = 4Mn. \quad (6)$$

Как видно, при таком методе определения  $R$  необходимо осуществить схему, в которой максимальное значение переменного тока  $I_m$  в точности совпадало бы со значением постоянного тока  $I$ . Тогда, зная  $M$  из геометрических размеров и частоту переменного тока  $n$ , можно найти  $R$ . При этом форма кривой переменного тока не имеет значения, единственно необходимо постоянство амплитуды. Этот метод получил название метода постоянного тока.

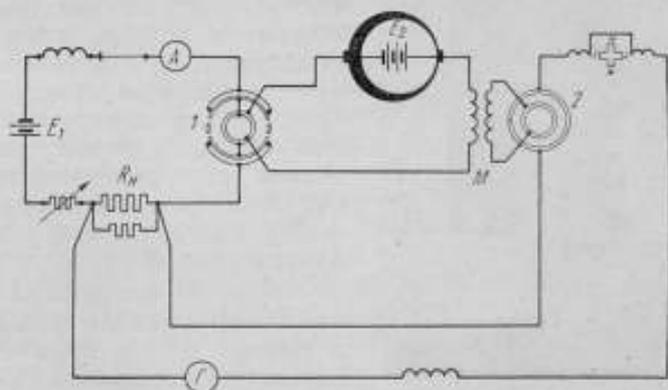


Рис. 3. Принципиальная схема измерения сопротивления.

Во ВНИИМ работы по абсолютным измерениям сопротивления были начаты мостовым методом на частоте 1000 гц с 1949 г. в лаборатории эталонных электрических единиц под руководством И. Н. Кроткова. В качестве катушек индуктивности были использованы однослойные соленоиды на пирексовом основании. Индуктивности их, вычисленные по соответствующим формулам, составили  $0,017 \pm 0,03$  гн, а индуктивное сопротивление  $107 \pm 188$  ом. Абсолютные измерения сопротивления с их помощью оказались возможными лишь для катушек с таким же номинальным значением сопротивлений, т. е.  $107 \pm 188$  ом. Между тем первичными эталонами сопротивления служат катушки с номинальным значением в 1 ом, что создает дополнительные трудности в передаче значения от эталона в 1000 ом к эталону в 1 ом.

Поэтому в 1951 г. были начаты работы по абсолютным измерениям катушек сопротивления с номинальным значением в 1 ом методом постоянного тока. С 1951 по 1953 г. работа велась под руководством Б. М. Яновского, С. В. Горбачевича и Н. Л. Амадуни, а с 1954 г. по настоящее время ее ведет Н. Л. Амадуни.

Вследствие того, что непосредственное воспроизведение эталона ома во ВНИИМ осуществлено именно этим методом, остановимся на нем несколько подробнее.

Принципиальная схема измерения  $R$  представлена на рис. 3. Батареи  $E_1$  и  $E_2$  создают постоянный ток  $I$  в цепи измеряемого сопротивления  $R_n$ . С помощью коммутатора  $K$  постоянный ток цепи

сопротивления  $R_n$  превращается в переменный ток заданной формы. Проходя по первичной цепи обмотки катушки взаимной индуктивности  $M$ , этот ток возбуждает во вторичной обмотке э. д. с., которая после выпрямления с помощью коммутатора 2 компенсируется падением напряжения на сопротивлении  $R_n$ .

Равенство токов  $I$  и  $I_m$  достигается тем, что коммутатор 1 включает через равные периоды первичную обмотку катушки  $M$  в цепь сопротивления  $R_n$  на промежуток времени равный  $1/6$  периода, после чего отключает ее, замыкая цепь  $R_n$  на сопротивление, равное сопротивлению первичной обмотки. В это же время в первичную обмотку  $M$  подключается посторонний источник тока, который тем же переключателем меняет ток  $+I$  до  $-I$ . Таким образом в цепи  $R_n$  течет прерывистый ток  $I$ , а в первичной обмотке — переменный с амплитудой  $I_m$ . Погрешность измерения  $R_n$  на такой установке зависит от погрешностей непосредственных измерений: частоты  $\omega$ , выравнивания токов  $I$  и  $I_m$  и определения взаимной индуктивности  $M$ .

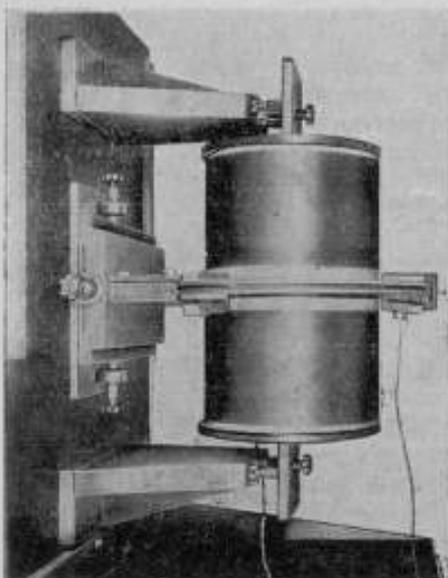


Рис. 4. Однослойный соленоид.

Точность абсолютных определений она всецело зависит, как и в случае определения ампера, от точности изготовления и определения геометрических размеров катушек взаимной индуктивности.

В качестве такой катушки был принят однослойный соленоид с тремя разделенными секциями и вторичная катушка, охватывающая весь магнитный поток, создаваемый таким соленоидом. По своей форме соленоид подобен катушке Кемпбелла (рис. 4).

Взаимная индуктивность  $M$  была выбрана такой, чтобы при частоте коммутации, равной 20, сопротивление, выражаемое формулой (6), было равно единице, что соответствует значению  $M = 0,0125 \text{ гн}$ .

В результате измерений геометрических размеров обмоток и расчетов взаимной индуктивности с учетом числа витков  $\omega$  вторичной катушки и поправочных членов, было получено значение

$$M = 0,0125081 \pm 8,5 \cdot 10^{-6} \text{ гн.}$$

Сопротивление измерялось сравнением э. д. с., возникающей во вторичной обмотке катушки взаимной индуктивности, с падением напряжения на катушке сопротивления с номинальным значением в  $1 \text{ ом}$ , рассчитанной на рассеивание мощности  $20 \text{ вт}$ , изготовленной заводом «Эталон».

В течение 1956 г. тремя разными наблюдателями было произведено 75 независимых измерений, в результате которых получено значение

$$R = 4Mn = 1,000517 \text{ ом.}$$

Средняя квадратичная погрешность ряда измерений составляет  $0,0036\%$ , средняя квадратичная погрешность результата —  $0,0004\%$ ,

максимальные же отклонения от среднего результата доходили до 0,008%.

Разность между значением сопротивления, полученным выше и приписанным на основании сличения с первичным эталоном ома, составляет:

$$1,000517 - 1,000529 = -0,000012, \text{ или } 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ ‰}.$$

Несмотря на кажущуюся высокую точность измерений (0,0004%), результаты их нельзя признать вполне удовлетворительными. Такая точность была достигнута ценой накопления большого числа независимых наблюдений, что является практически не только неудобным и неэкономичным, но и не может гарантировать в дальнейшем появления еще больших разбросов в отдельных измерениях.

С целью устранения или, во всяком случае, резкого уменьшения случайных погрешностей было решено произвести реконструкцию всей установки, явившуюся третьим этапом работы.

Основным источником погрешности, как показали исследования установки, явились контакты, с помощью которых производились переключения в схеме при переходе от короткого замыкания к последовательному соединению. По предложению Н. Л. Амагуни, щеточные контакты были заменены контактами давления с приводом от кулачкового механизма, вследствие чего сопротивление контакта уменьшилось с 0,05 до 0,002 ом. Кроме того, появилась возможность на время короткого замыкания электрически разъединить цепи эталонного сопротивления и катушки взаимной индуктивности и тем самым исключить влияние цепей друг на друга в период короткого замыкания. В результате была получена большая стабилизация в цепи эталонного сопротивления.

Нарушения в работе установки вызывались и вращающимся делителем напряжения из-за наличия контакта пластина — угольная щетка. Для устранения этого в установке применен генератор переменного тока с гладкостенным статором, дающий трапециевидную форму кривой тока. Возбуждение у генератора создается постоянными магнитами, вследствие чего становится невозможным возникновение погрешностей, связанных с изменением магнитного потока.

Уменьшение случайной погрешности, возникающей при выпрямлении в. д. с. во вторичной цепи, достигается заменой механического выпрямителя с полукольцами выпрямителем с контактами давления. Такая замена одновременно дает возможность резко уменьшить и погрешность от т. э. д. с. Эти изменения в установке позволили не только устранить случайные погрешности, но и повысить чувствительность схемы.

В настоящее время ведутся работы по исследованию установки и ожидается, что внесенные изменения обеспечат воспроизведение ома с погрешностью, не превышающей  $10^{-3}\%$  при чувствительности порядка  $5 \cdot 10^{-4}\%$ .

#### Абсолютные определения гиромангнитного отношения протона

К числу работ, имеющих такой же характер, как и работы по абсолютным измерениям ампера и ома, относится определение одной из мировых констант — гиромангнитного отношения  $\gamma$  протона, представляющего собой отношение магнитного момента протона к его механическому моменту.

Простой теоретический расчет показывает, что при помещении в магнитное поле вещества, содержащего атомы водорода (протоны), например воды, в нем должны возникать прецизионные вращения ядер водорода вокруг магнитного поля с угловой частотой  $\omega$ , которая связывается с напряженностью магнитного поля  $H$  соотношением

$$\omega = \gamma H. \quad (7)$$

Подтверждением этого является экспериментальный факт возникновения переменной э. д. с. (с частотой  $\omega$ ) в катушке, охватывающей вещество.

Отсюда, измеряя частоту переменной э. д. с. и зная напряженность магнитного поля, можно определить величину гиромагнитного отношения.

Гиромагнитное отношение  $\gamma$  протона приобрело в настоящее время в метрологии такое же значение, как скорость и длина волны света  $\lambda$ , частота колебания молекул  $\omega$  и другие, так как знание величины  $\gamma$  в абсолютных единицах с достаточной степенью точности позволило бы, с одной стороны, получить новую методику абсолютных измерений напряженности магнитного поля (с точностью на два порядка выше чем классический метод Гаусса), с другой стороны, — приблизить решение вопроса о переходе на новые эталоны основных единиц, опирающиеся полностью на естественные константы.

Чтобы выразить  $\gamma$  в абсолютных единицах, необходимо  $\omega$  и  $H$  измерять абсолютными методами. Процесс измерения частоты  $\omega$  в настоящее время не представляет особых затруднений и может быть выполнен с точностью, превышающей точность всех остальных абсолютных измерений. Измерения же  $H$  относятся к той же категории, что и измерения силы тока и сопротивления, т. е. к категории проблемных, так как встречаются те же трудности, что и при абсолютных определениях ампера и ома.

Опыт показывает, что явление прецессии ядра обнаруживается лишь в том случае, когда магнитное поле, в котором помещается вещество, является однородным.

Работа по определению  $\gamma$  протона проводилась во ВНИИМ с 1958 по 1961 г. Н. В. Студенцовым и Т. Н. Малеревской под руководством Б. М. Яновского.

В качестве источника однородного магнитного поля были выбраны однослойные катушки типа колец Гельмгольца, с десятью витками в каждом кольце. Расстояние между средними витками выдерживалось равным радиусу колец. Кольца были навиты на пирексовом цилиндре, который изготавливался и обрабатывался теми же методами и с той же точностью, как и соленоиды для токовых весов и катушки взаимной индуктивности для ома. Всего было изготовлено 10 катушек типа колец Гельмгольца.

Напряженность  $H$  поля в центре колец Гельмгольца определяется по известной формуле

$$H = \frac{3,2\pi\omega}{5\sqrt{5}a} I, \quad (8)$$

где  $a$  — радиус колец,

$\omega$  — число витков в одном из колец,

$I$  — сила тока ( $\omega a$ ).

Теория показывает, что отклонения величины поля  $H$  на расстояниях  $0,05a$  от центра колец не превышает  $3 \cdot 10^{-6}H$ , среднее же

значение поля в объеме  $V = (0,1a)^3$ , занимаемом вокруг центра колец, составляет  $H_{cp} = H(1 + 10^{-7})$ .

Поэтому необходимые для получения прецессии и измерения поля условия полностью выполняются с требуемой точностью кольцами Гельмгольца.

Катушки имели радиусы от 15,6 до 13,4 см, вследствие чего при токе  $I = 1$  а, создаваемая в них напряженность поля  $H$  принимала значения  $45,3 \div 52,5$  а/м.

При такой величине поля  $H$ , напряженность магнитного поля Земли  $H_T$ , равная 39,8 а/м, должна играть такую же роль в образовании прецессии, как и поле колец Гельмгольца, и поэтому необходимо было либо принимать во внимание поле Земли, либо его компенсировать.

Ввиду того, что отсутствие магнитного поля Земли  $H_T$  легче обнаружить, чем измерить, катушку Гельмгольца помещали в систему колец, которые компенсировали  $H_T$ .

Для достижения такой же степени однородности поля, как и поле Земли, компенсирующая система колец была изготовлена в виде двух пар расположенных коаксиально квадратных катушек, со сторонами квадрата  $b = 69,1$  и 43,1 см. Расстояние  $d$  между кольцами каждой пары катушек удовлетворяло условию  $d = 0,5445$  а, при котором в центре колец, согласно теоретическим расчетам, поле имеет однородный характер.

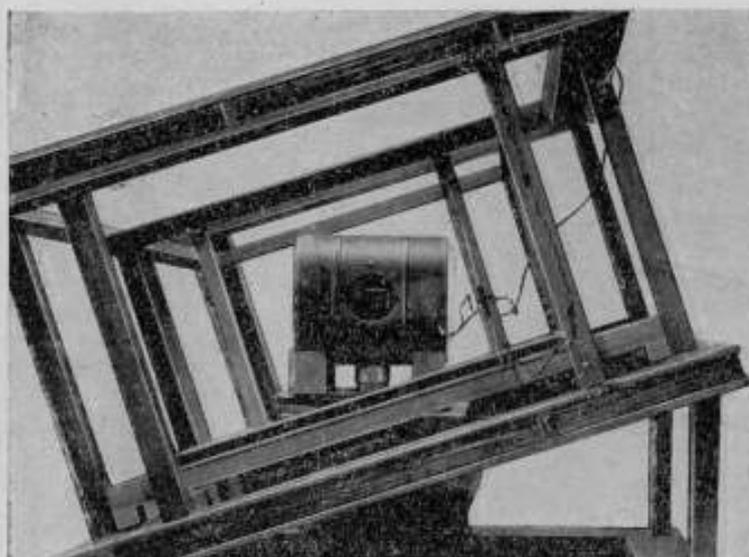


Рис. 5. Общий вид установки с кольцами Гельмгольца.

Для компенсации магнитного поля Земли  $H_T$  ось катушек устанавливали по направлению полного вектора  $H_T$ , а ось колец Гельмгольца — по направлению горизонтальной составляющей поля Земли. Общий вид установки с кольцами Гельмгольца и с компенсирующими катушками показан на рис. 5.

Чтобы наблюдать прецессию в таких слабых полях, как в данном случае ( $39,8 + 47,7$  а/м), необходимо предварительно поляризовать (намагнитить) все ядра в одном направлении, поместив вещество

на короткий срок (1—2 сек) в сильное магнитное поле  $H_m$  (порядка 79 600—15 900 а/м), направленное перпендикулярно к слабому полю  $H$ . После выключения поля  $H_m$  ядра начнут прецессировать вокруг поля  $H$  в перпендикулярной ему плоскости.

Такой метод получил название метода свободной ядерной прецессии или индукции.

Измеритель частоты  $\omega$  может быть любого устройства, позволяющего определять частоту порядка нескольких кГц с погрешностью не более 0,001 %.

Одно из таких устройств, применяемых на практике, основано на смешении измеряемой частоты  $\omega$  с частотой  $\omega_0$  образцового генератора и наблюдении разности частот на шлейфном осциллографе.

Погрешность измерения частоты таким методом, как показали исследования, составила

$$\frac{\Delta \omega}{\omega} < 6 \cdot 10^{-6}.$$

Для каждой пары колец Гельмгольца было выполнено 10—15 серий измерений, при этом каждая серия состояла из 15 наблюдений. Результаты этих измерений с предельной квадратичной погрешностью измерения в 0,1 даны в табл. 2.

Таблица 2

Номера колец	$\gamma \cdot 10^{-3}$ , аб · м <sup>2</sup> · сек <sup>-1</sup>	$V_i$	$V_i^2$	Отклонение от среднего, в относительных единицах
3	267488	- 8	64	$-3,1 \cdot 10^{-5}$
4	508	+ 2	4	$+0,7 \cdot 10^{-5}$
5	522	+16	256	$+6,0 \cdot 10^{-5}$
6	519	+13	169	$+5,0 \cdot 10^{-5}$
7	501	- 5	25	$-2,0 \cdot 10^{-5}$
8	515	+ 9	81	$-3,5 \cdot 10^{-5}$
9	497	- 9	81	$-3,5 \cdot 10^{-5}$
10	502	- 4	16	$-1,6 \cdot 10^{-5}$
11	494	-12	144	$-1,5 \cdot 10^{-5}$
12	506	0	0	0

$$\gamma_{\text{ср}} = 2,67506 \cdot 10^8; \quad \sum V_i^2 = 840; \quad \sigma = \frac{1}{\gamma} \sqrt{\frac{\sum V_i^2}{n-1}} = 3,5 \cdot 10^{-5}$$

Данные табл. 2 показывают, что расхождение значений  $\gamma$ , полученных в магнитном поле разных колец, на порядок превосходит предельную квадратичную погрешность измерения в магнитном поле каждой пары отдельных колец. Это указывает на существование систематических погрешностей в определении постоянной  $K$  каждой пары колец Гельмгольца, которые значительно превышают погрешность, вычисленную теоретически.

Из формул (6) и (7) имеем

$$\left(\frac{\Delta\gamma}{\gamma}\right)^2 = \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\omega}{\omega}\right)^2 + \Sigma,$$

где  $\Sigma$  — сумма квадратов поправочных членов.

После подстановки в правую часть этой формулы значений погрешностей  $\Delta R$ ,  $\Delta l$ ,  $\Delta\omega$  и поправочных членов, найденных из непосредственных измерений, было получено значение

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = 1,3 \cdot 10^{-5},$$

в то время как расхождения между отдельными значениями доходят до  $5 \cdot 10^{-5}$ , т. е. в 4,5 раза больше. Следовательно, неисключенная систематическая погрешность вызывается факторами, которые не могут быть учтены теоретически. Можно предполагать, что такими факторами являются:

- 1) недоучет влияния соединительных и подводящих ток проводников,
- 2) возможность отклонения истинного среднего значения диаметра колец и расстояния между обмотками от найденного путем измерения их геометрических размеров.

Однако указанные систематические погрешности могут быть сведены к случайным при наличии большого числа пар колец Гельмгольца, так как в этом случае природа их становится тоже случайной.

Таковы результаты работ ВНИИМ в области абсолютных измерений электрических и магнитных величин за последние 10—15 лет. Подходя к оценке их с точки зрения метрологической точности, нельзя не признать, что они далеки еще от того, чтобы стать примером для всех существующих методов электрических и магнитных измерений. Относительная погрешность их абсолютных измерений, как было показано, достигает  $10^{-6}$ , в то время как погрешность относительных методов не превосходит  $10^{-6}$  и может доходить до  $10^{-7}$ .

Проведенный анализ результатов убеждает нас в том, что основную причину такого положения следует искать в недостаточной точности как изготовления катушек, так и измерения их геометрических размеров. Поэтому первое, на что следует обратить особое внимание в дальнейших работах по абсолютным измерениям, это усовершенствование технических средств и технологии изготовления катушек. В настоящее время проводятся работы по установлению эталона емкости путем построения конденсатора, емкость которого должна быть определена по его геометрическим размерам. Зная же емкость, как было указано выше, можно перейти и к воспроизведению эталона единицы сопротивления. Такой путь освобождает от изготовления катушек и, казалось бы, от связанных с этим затруднений. Однако и здесь мы встречаемся с той же проблемой построения, если не катушки, то конденсатора, форма и размеры которого должны удовлетворять еще большим требованиям.

Таким образом, проблема построения катушек или конденсаторов «идеальной формы» должна оставаться такой же первоочередной, как и в настоящее время, до тех пор пока эталоны электрических единиц будут воспроизводиться при помощи эталонов длины, массы и времени.

Полностью освободиться от изготовления катушек и конденсаторов в качестве эталонов, воспроизводящих единицы индуктивности и емкости

в абсолютной системе, возможно лишь в том случае, если единицами электрических и магнитных величин будут служить универсальные физические константы.

Примером может служить физическая константа — гиромагнитное отношение. Если в качестве эталона единицы напряженности магнитного поля принять угловую частоту прецессии протона, равную гиромагнитному отношению, то измерение напряженности любого магнитного поля сведется к измерению в нем частоты прецессии.

Однако для того, чтобы любая константа могла служить эталоном, необходимо определить ее в абсолютных единицах при помощи тех же катушек и конденсаторов, что можно было видеть на примере определения гиромагнитного отношения. Следовательно, переход на естественные эталоны потребует в первую очередь решения той же проблемы, т. е. проблемы изготовления и измерения катушек индуктивности и конденсаторов емкости.

**МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ РАБОТЫ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ  
ТОКА, НАПРЯЖЕНИЯ И МОЩНОСТИ  
ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ЧАСТОТАХ**

Начало метрологических работ в области электрических измерений в России относится к 1900 г., когда в Главной палате мер и весов было открыто электрическое отделение.

К этому времени в результате успешного развития электротехники электрические установки нашли практическое применение в промышленности и быту. В связи с этим перед электрическим отделением стояла важная задача: решить вопрос правильного учета расхода энергии электрическими счетчиками, организовать их поверку, а также провести регулярное и обязательное испытание их типов. Еще при жизни Д. И. Менделеева в 1901—1903 гг. были утверждены правила испытания и поверки электроизмерительных приборов. Однако в то время в Главной палате еще не было собственных электрических эталонов. В качестве образцовых мер для работы использовались катушки электрического сопротивления и нормальные элементы, аттестованные в иностранных метрологических учреждениях.

После Лондонской международной конференции по электрическим единицам и эталонам в 1909 г. А. Н. Георгиевский и М. Ф. Маликов начали работы по осуществлению отечественных эталонов ома. К этому же времени была организована лаборатория нормальных элементов, в которой приступили к работе по созданию эталона вольта и начали исследования по воспроизведению ампера с помощью серебряного вольтметра.

Особенно широкое развитие в нашей стране метрологические работы получили после Великой Октябрьской социалистической революции, когда поддержание единства измерений стало задачей государственной важности.

В электрических лабораториях стали заниматься созданием и совершенствованием государственных эталонов и образцовых мер. Одновременно была поставлена задача реорганизовать всю поверочную работу.

С 1924 г. Главная палата широко развертывает поверку электроизмерительных приборов, проводит огромную работу по созданию типового поверочного оборудования, организует его изготовление в собственных мастерских (впоследствии завод «Эталон»). Был разработан

и исследован новый тип эталонных и образцовых катушек электрического сопротивления (М. Ф. Маликов, А. И. Маренина, Е. К. Вессо-Адо), освоено изготовление точных компенсаторов постоянного тока (В. И. Кротова), делителей напряжения, магазинов сопротивления, гальванометров. Кроме того, в лаборатории нормальных элементов (А. К. Колосов, В. В. Мюллер) возобновили изготовление нормальных элементов улучшенной конструкции.

Еще перед войной были начаты работы по воспроизведению и определению электрических единиц абсолютными методами через длину, массу и время с предельно высокой точностью.

Выполнение эталонных работ и создание специализированных поверочных установок дало возможность существенно расширить номенклатуру поверяемых и подлежащих госиспытанию приборов постоянного тока. Поверка приборов на переменном токе длительное время выполнялась только при частоте 50 гц с помощью образцовых показывающих электродинамических приборов классов 0,2 и 0,5, градуируемых и поверяемых на постоянном токе. При этом считалось, что погрешность перехода от постоянного тока к переменному ничтожно мала.

Однако по мере развития промышленного применения переменных токов повышенных частот возникала потребность в повышении точности измерений при промышленных и звуковых частотах.

Если еще сравнительно недавно электроприборостроительная промышленность выпускала приборы только для частот 50÷60 гц, то сейчас уже освоен их выпуск для широкого диапазона частот. Наряду с этим, в настоящее время ведутся большие работы по повышению точности выпускаемых приборов. Уже освоены приборы непосредственной оценки класса 0,1 и государственным стандартом предусмотрены приборы классов 0,05. Очевидно, что существовавшие раньше способы оценки погрешности приборов только на постоянном токе не могли удовлетворить практику.

Решением отдельных вопросов повышения точности измерений переменного тока во ВНИИМ еще в 30-е годы занимался А. А. Чечулин [1]. Он исследовал возможность применения электронных ламп для сравнения переменного тока с постоянным.

Однако общая проблема повышения точности передачи значений единиц тока и напряжения от эталонов, воспроизводящих эти значения на постоянном токе, образцовым и рабочим приборам переменного тока была наиболее широко поставлена в 1947 г. электромагнитным отделом ВНИИМ, руководимым в то время Е. Г. Шрамковым. Эта проблема для звукового диапазона частот была решена в лаборатории электрических измерений [2]. Основные направления и пути ее решения, намеченные в начале работы К. П. Широковым, получили большое развитие и привели к созданию методов и комплекта универсальных установок и приборов высокой точности для поверок амперметров, вольтметров, ваттметров и трансформаторов тока при повышенных частотах.

Разработанные методы учтены в новых поверочных схемах и инструкциях [3, 4]. В настоящее время ведутся работы по еще большему повышению точности, расширению частотного диапазона в области ультразвуковых частот и пределов измерений в сторону как больших, так и малых значений. Основными исполнителями всего комплекса работ были А. Я. Безикович, Д. И. Зорин, М. С. Каяндер, Т. Б. Рождественская, К. П. Широков, а также сотрудники конструкторского бюро и завода «Эталон» ВНИИМ [5].

Параллельно работы этого же направления велись в национальных метрологических институтах других стран: Хермаком в НБЭ (США, [6, 7]), Арнольдом [8] и Хиллом в НФЛ (Англия), Хельком в ПТБ (ФРГ) и Румпом в ДАМГ (ФРГ, [9]).

### Передача значений электрических единиц от постоянного тока к переменному

На постоянном токе значения единиц тока и напряжения передаются от эталонов образцовым и рабочим приборам при помощи образцовых нормальных элементов и катушек сопротивления компенсационным методом [3], обеспечивающим высокую точность. Естественным направлением работ в начальной их стадии было исследование возможности применения тех же методов на переменном токе [10].

В процессе решения этой задачи во ВНИИМ и в ряде зарубежных метрологических институтов были изучены на переменном токе погрешности мер сопротивления [11], компенсационные методы измерения и разработаны устройства для точного измерения рабочего тока компенсаторов, иногда называемые «нормальными элементами переменного тока» [12]. Исследования показали, что нужно отказаться от применения для указанных целей компенсационного метода на переменном токе из-за значительного числа источников погрешности, трудностей создания образцовых мер сопротивления для широкого диапазона частот и необходимости создания устройств для контроля рабочего тока-компенсатора. В связи с этим возник вопрос о разработке иных методов передачи единиц тока и напряжения, опирающихся на образцовые меры э.д.с. и сопротивления постоянного тока, не требующих создания новых образцовых мер для переменного тока и позволяющих непосредственно сравнивать неизвестные величины переменного тока с эквивалентными им величинами постоянного тока. Во ВНИИМ для этой цели были созданы специальные приборы, которые в отечественной метрологической практике называются компараторами. За границей подобные приборы называют *dc/ac transfer instruments*.

В настоящее время компараторы (рис. 1) находят применение не только в метрологических учреждениях, но и во многих лабораториях промышленного значения. Некоторые их типы выпускаются серийно приборостроительными предприятиями.

Основным элементом компаратора тока, напряжения или мощности (независимо от принятого метода сравнения) является измерительный преобразователь ИП, одинаково реагирующий на измеряемый переменный ток и эквивалентный ему постоянный.

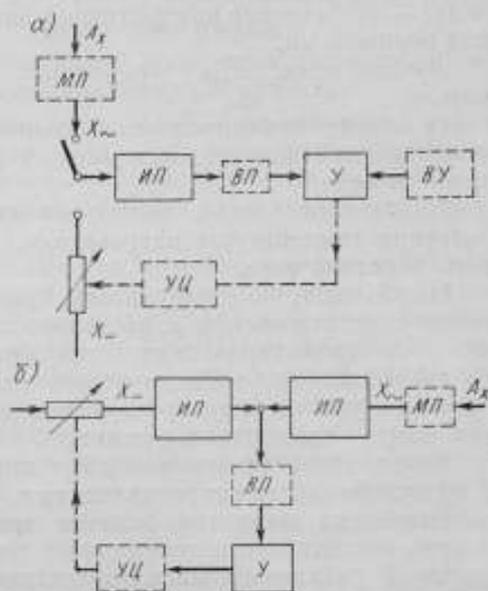


Рис. 1. Структурные схемы компараторов а — одновременного, б — одновременного сравнения.

В практике электрических измерений применяются методы и приборы для измерения как мгновенных значений переменного тока, так и ряда интегральных значений: действующих, средних за половину периода, средних из всех положительных или отрицательных значений и др.

Кроме того, широкое распространение находят приборы, отградуированные в действующих значениях переменного тока или напряжения и в средних значениях мощности. В силу этого при передаче значений электрических единиц приборам переменного тока были созданы в первую очередь компараторы, измерительные преобразователи которых реагируют на действующие значения переменного тока напряжения или на среднее значение мощности. Одно из основных требований, предъявляемое к измерительным преобразователям действующего значения, — это наличие квадратичной зависимости между выходной и входной величинами.

Лучше всего этому требованию отвечают следующие преобразователи:

1) электромеханические, выходным параметром которых является механический момент, вызываемый действием постоянного или переменного тока;

2) электротепловые, выходным параметром которых является превышение температуры нагревателя, возникающее в результате теплового действия тока.

Наиболее точные результаты сравнения переменного и постоянного токов с погрешностью в несколько сотых долей процента могут дать: из электромеханических преобразователей — электродинамические (в сравнительно узком звуковом диапазоне частот) и электростатические (в звуковом и ультразвуковом диапазонах частот) [13]; из электротепловых — термоэлектрические.

В последнее время начинают широко применять преобразователи с подогреваемыми сопротивлениями.

Равенство выходных величин преобразователя при включении его в цепь постоянного и переменного токов фиксируется при помощи указателя  $У$  (например, магнитоэлектрического гальванометра). Если чувствительность измерительного преобразователя недостаточна, применяют вспомогательные преобразователи  $ВП$ . Чаще всего это различного рода усилители.

В ряде случаев (при компарировании малых или больших величин переменного тока) в структурную схему вводится масштабный преобразователь  $МП$ , который служит для предварительного преобразования измеряемой величины переменного тока в величину, соответствующую номинальным данным измерительного преобразователя.

При измерении больших значений переменного тока роль масштабного преобразователя играют измерительные трансформаторы, а при измерении малых токов — усилители переменного тока.

Чтобы иметь при сравнении более высокую точность, указатель ставят в режим нулевого прибора. Для этого в структурную схему вводят вспомогательную цепь уравнивания  $ВУ$  с дополнительным источником питания.

Если в качестве измерительных преобразователей используются термопреобразователи, то роль  $ВУ$  играет упрощенный компенсатор.

За последние годы приборостроительная промышленность освоила выпуск компараторов с автоматическим уравниванием. В этих

компараторах отклонение указателя от нулевого положения влияет на управляющую цепь УП, с помощью которой регулируется постоянный ток, приводящий компаратор в положение, близкое к равновесию.

По способу сравнения компараторы можно разделить на две категории:

1. Компараторы одновременного сравнения с преобразователем ИП, поочередно включаемым в цепи измеряемого переменного и постоянного тока (рис. 1, а). Сравнимые величины считаются равными, если равны выходные параметры преобразователя.

2. Компараторы одновременного сравнения (рис. 1, б) с двумя идентичными преобразователями, один из которых включается в цепь измеряемого переменного, другой — в цепь постоянного тока.

Оба способа сравнения с использованием различных видов преобразователей широко применяются в метрологической практике.

В таблице приведены схемы преобразователей, применяемых в ведущих метрологических институтах мира для наиболее точного сравнения величин переменного и постоянного тока, и основные технические характеристики компараторов, которые в НФЛ и НБЭ относятся к разряду эталонов.

Во ВНИИМ (СССР) и НБЭ (США) в качестве основного метода передачи значений постоянного тока и напряжения приборам переменного тока применяется метод одновременного сравнения с использованием термопреобразователей [6, 7, 12, 14]. Во ВНИИМ этот метод, кроме того, применяется для сравнения мощности. Примечательно также то, что именно во ВНИИМ была создана уникальная аппаратура для наиболее точных метрологических измерений, а также простая и удобная универсальная аппаратура для поверочных и заводских лабораторий.

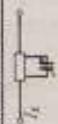
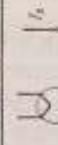
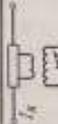
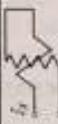
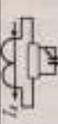
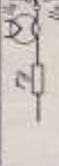
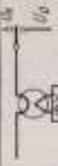
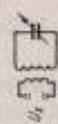
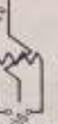
Рассмотрим несколько подробнее методы сравнения, применяемые в практике ВНИИМ.

**Измерение токов.** Наиболее точно можно измерить токи методом одновременного сравнения с помощью набора бесконтактных термопреобразователей от 1 до 500 мА (вакуумных) и от 500 мА до 50 А (воздушных). В поверочной практике при частотах до 20 кГц применяется бесконтактный термопреобразователь с набором безреактивных шунтов на токи от 20 мА до 10 А.

При включении термопреобразователя в цепь переменного тока его т. э. д. с. фиксируется при помощи магнитоэлектрического гальванометра в упрощенной компенсационной цепи (ВУ на рис. 1, а). При включении в цепь постоянного тока последний регулируют до повторного получения нулевого показания гальванометра, что свидетельствует о равенстве действующих значений переменного и постоянного тока [12, 14].

Постоянный ток измеряют при помощи точного компенсатора постоянного тока, нормального элемента и набора образцовых измерительных катушек сопротивления 1-го разряда.

Если необходимо сравнивать большие переменные токи, на которые не рассчитаны термопреобразователи, в качестве масштабного преобразователя применяют измерительный трансформатор  $T_0$ . При этом (рис. 2) с постоянным током сравнивается только вторичный ток трансформатора  $I$ . Результат определяется как произведение значений измеренного эквивалентного постоянного тока  $I_0$  и коэффициента трансформации [4, 15, 16].

	ВНИМ (СССР)		НФЛ (АНГЛИЯ)		НБЗ (США)		
	Условные схемы измерительных преобразователей	Технические характеристики	Условные схемы измерительных преобразователей	Технические характеристики	Условные схемы измерительных преобразователей	Технические характеристики	
I	Разное		1 мВ - 10 В 50 Гц ± 20 кГц 0,01 - 0,001 % до 3 мГц - 0,2 %		0,2 - 25 В 50 Гц ± 20 кГц 0,01 %		1 - 5 В 0,01 % - 0,001 % диапазон частот
		Разное		1 мВ ± 10 В 50 Гц ± 20 кГц 0,01 %		Разное	0,1 - 20 В 0,01 %
	Разное		20 мВ ± 10 мВ 50 Гц ± 200 кГц 0,2 - 0,3 %		0,1 - 20 В 50 Гц ± 0,01 % до 3 мГц - 0,1 %	Разное	0,2 - 600 В 0,02 % - 0,001 % диапазон частот Средними значениями согласованными при калибровке использованы
			10 - 6000 В 50 - 10 кГц 0,05 - 0,1 %		1 мВ ± 20 мВ 50 Гц ± 20 кГц		
II	Разное		0,1 - 200 В 50 Гц ± 30 кГц 0,02 - 0,005 % до 3 мГц - 0,2 %		50 - 100 В 50 Гц ± 30 кГц - 0,01 % до 300 кГц - 0,05 %	Разное	0,2 - 600 В 0,02 % - 0,001 % диапазон частот Средними значениями согласованными при калибровке использованы
			1 мВ - 0,5 В 50 Гц ± 100 кГц 0,2 - 0,2 %		0,2 - 20 В 50 Гц ± 500 Гц 0,01 %		
	Разное		до 2 мВ 100 Гц ± 8 кГц 0,2 - 0,3 %		160 - 1100 В 50 Гц ± 30 кГц до 40 мВ - 50 Гц	Разное	0,1 - 20 В 10 - 600 В 50 Гц - 0,01 % до 3 мГц - 0,1 %
			10 мВ ± 10 В 65 - 300 В 50 Гц ± 20 кГц 0,05 - 0,1 % до 200 кГц - 0,1 % 50 мВ ± 2 мВ шаг > 0,1 0,2 %		до 10 В до 100 Гц 0,02 % Выше 10 В с трансформатором тока		
Разное		30 - 300 В 0,1 - 10 В 50 Гц ± 20 кГц		50 - 160 В 2 мВ ± 0,2 В 25 Гц ± 30 кГц 0,05 - 0,1 %	Разное	0,1 - 20 В 10 - 600 В 50 Гц - 0,01 % до 3 мГц - 0,1 %	
							

При компарировании малых токов (меньших 1 ма), при которых чувствительность термопреобразователя оказывается недостаточной, в качестве вспомогательного преобразователя (ВП на рис. 1) применяется фотокомпенсационный усилитель постоянного тока ФУ (рис. 3). Диапазон частот и точность сравнения токов указаны в таблице.

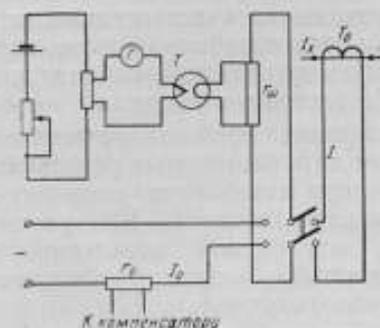


Рис. 2. Принципиальная схема компарирования больших токов.

$r_{ш}$  — безреактивный шунт;  $r_0$  — образцовое сопротивление;  $I_x$  — измеряемый ток;  $I_0$  — постоянный ток.

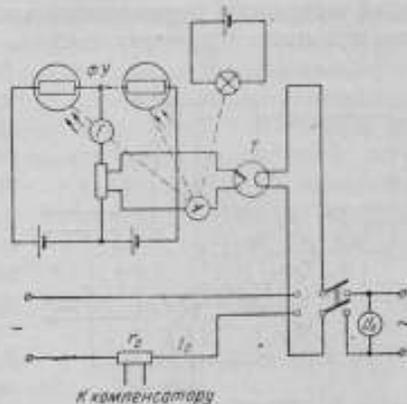


Рис. 3. Принципиальная схема компарирования малых токов.

**Измерение напряжений.** Для сравнения напряжений в среднем диапазоне значений (0,5 ÷ 300 в) применяются вакуумные бесконтактные термопреобразователи (на 10 ма) с безреактивными добавочными сопротивлениями.

В случае применения проволочных добавочных сопротивлений частотный диапазон измерений ограничивается 20 кГц [12, 14]. При частотах до 1 МГц применяются непроволочные добавочные сопротивления, оформленные в одном коаксиально-экранированном блоке с термопреобразователем. Для измерения больших напряжений в качестве масштабного преобразователя можно применять измерительный трансформатор напряжения. Однако ввиду значительной зависимости трансформаторов напряжения от частоты применение их ограничено. Специальные трансформаторы напряжения повышенной частоты до 2 кВ при частотах до 8000 гц класса 0,2 разработаны во ВНИИГК [17] и в ряде случаев применяются для поверочных целей.

Для измерения малых напряжений (меньших 0,5 в) применяется термопреобразователь на 1 ма с фотокомпенсационным усилителем (по аналогии со схемой сравнения токов) [18].

При поверках электронных милли- и микрольтметров, потребляющих малый ток, в цепь нагревателя термопреобразователя включается образцовое безреактивное сопротивление, падение напряжения на котором измеряется при помощи поверяемого вольтметра. Ток в сопротивлении измеряется путем сравнения с постоянным [19].

**Сравнение мощностей.** Мощность измеряют также методом разновременного сравнения [20].

В схему измерительного преобразователя мощности входят два бесконтактных многоэлементных термопреобразователя  $T_1$  и  $T_2$  специальной конструкции с квадратичными вольт-амперными характеристиками. При включении их нагревателей в два плеча моста (рис. 4, а) разность

э. д. с. включенных встречно термодпар, как известно, пропорциональна мощности. Если разность э. д. с. при включении измерительного преобразователя в цепь постоянного и переменного токов остается неизменной, то можно показать, что произведение измеренных напряжения и силы постоянного тока в момент равенства разностей т. э. д. с. равно средней мощности переменного тока. Эта схема применяется при сравнении мощностей в цепях с  $\cos \varphi > 0,5$ . При меньших значениях  $\cos \varphi$

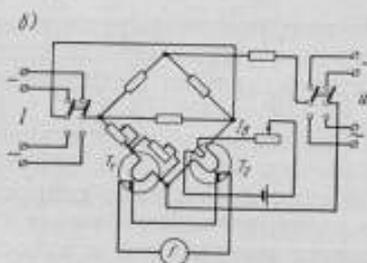
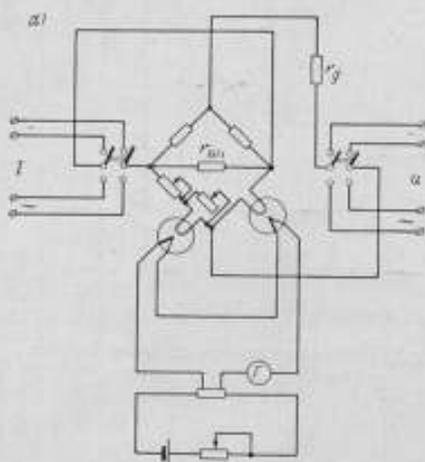


Рис. 4. Принципиальная схема компарирования мощностей в среднем диапазоне значений: а) при  $\cos \varphi > 0,5$ ; б) при  $\cos \varphi < 0,5$ .

точность измерения снижается как из-за понижения чувствительности измерительного преобразователя, так и вследствие возрастания влияния реактивности элементов его цепи.

Увеличение тока в нагревателях не может дать ожидаемых результатов, так как при повышении температуры нагревателя свыше  $8-10^\circ$  увеличиваются отклонения вольт-амперной характеристики термопреобразователей от квадратичной.

Для сравнения мощностей при  $\cos \varphi < 0,5$  в компараторе мощности применен «способ равных температур» [21]. Для его осуществления (рис. 4, б) термопреобразователь  $T_2$  снабжают двумя идентичными нагревателями. Один нагреватель включается в одно из плеч моста по обычной схеме, а по второму — пропускается постоянный ток  $I_n$  от вспомогательного источника.

Можно показать, что величина вспомогательного тока, необходимого для получения нулевой т. э. д. с. в цепи встречно включенных термодпар, пропорциональна мощности.

Мощности постоянного и переменного токов при неизменном вспомогательном токе считаются равными, если разность т. э. д. с. равна нулю.

При наличии измерительных трансформаторов тока и напряжения повышенной частоты можно расширить пределы компарирования мощности. В этом случае цепи переменного тока и напряжения преобразователя мощности подключаются к вторичным цепям измерительных трансформаторов. Результат определяется как произведение мощности, измеренной на постоянном токе, на комплексные коэффициенты трансформации (с учетом их угловых погрешностей). При этом погрешность измерения возрастает (особенно при малом  $\cos \varphi$ ) за счет погрешностей трансформаторов.

Аналогично схемам компарирования малых токов и напряжений (рис. 3) можно применить схему компарирования малых мощностей, в которой для повышения чувствительности разностная т. э. д. с. термопреобразователей  $T_1$  и  $T_2$  фиксируется при помощи гальванометрического усилителя постоянного тока (например, фотокомпенсационного).

В качестве второго независимого метода для сравнения мощности применяется электростатический компаратор [13]. Измеряемая мощность в нем подводится к электростатическому преобразователю (по типу квадратного электромметра), на общем подвесе которого закреплен магнитоэлектрический элемент («возвратитель») (см. таблицу), момент которого направлен навстречу основному моменту. Очевидно, что при компенсации моментов ток в возвратителе может являться мерой измеряемой мощности. Подобные компараторы, но только с электродинамическим преобразователем с автоматической компенсацией моментов [22] выпускаются серийно и применяются для точных измерений в промышленности. Однако, поскольку их частотный диапазон ограничен, а точность по сравнению с компараторами одновременного сравнения мала, эти приборы в качестве основных в метрологии не применяются.

### Поверочная аппаратура

Схемы одновременного сравнения с помощью термопреобразователей широко применяются в поверочной практике.

В схемах компарирования тока, напряжения и мощности много общих элементов. Это позволило создать универсальные компараторы и комплектную установку сначала для компарирования только тока и напряжения (типа УППТ) [14], а несколько позже и для компарирования мощности (типа УВ-2) [23].

Установка типа УВ-2 обеспечивает измерение тока, напряжения и мощности при частотах до 20 кГц в диапазоне значений тока 0,05—10 а, напряжения 0,5—300 в и соответствующих им значений мощности. Погрешности сравнения переменного и постоянного токов зависят от частоты измеряемых величин и лежат в пределах  $\pm(0,05-0,1)\%$ . В комплекте установки содержатся все элементы, необходимые для плавного регулирования и точного измерения постоянного тока. Установка переменного тока получают питание от специально созданного источника, обеспечивающего плавное регулирование необходимого тока, напряжения и сдвига фаз между ними.

Для измерения малых значений тока (от 2 мка до 10 ма) и для проверки милливольтметров (до 100 кГц) созданы компаратор и установка типа УПМА, основанная на принципе сравнения с применением фотоусилителя (рис. 4). Эквивалентный постоянный ток измеряется полуавтоматическим компенсатором.

Для проверки измерительных трансформаторов тока при повышенных частотах до 10 кГц разработана установка типа УПТТ [24] и для проверки трансформаторов напряжения также до 10 кГц — установка типа УПТН.

В настоящее время ведутся работы по повышению точности созданных методов и аппаратуры и по расширению ее частотного диапазона.

Аппаратура, созданная во ВНИИМ [5], обеспечивает поверку показывающих приборов высоких классов точности. Однако для поверки приборов классов 1,0; 1,5 и 4,0 желательно иметь более простые образцовые приборы несколько меньшей точности. Чтобы упростить методы и средства поверки, были проведены работы по созданию как упрощенных компараторов, так и приборов непосредственной оценки. В результате были изготовлены опытные образцы упрощенных компараторов тока, напряжения и мощности и ряд показывающих термоэлектрических приборов высокой точности (класса 0,1—0,2).

Разработанные методы и приборы обеспечивают достоверную передачу значений постоянного тока от рабочих эталонов образцовым

и рабочим приборам переменного тока промышленной и повышенной частоты классов точности 0,1 и менее точных.

Дальнейшее развитие электроприборостроения предусматривает еще большее повышение точности и расширение пределов измерений электроизмерительных приборов. В связи с этим перед метрологическими учреждениями ставятся новые задачи повышения точности измерений на переменном токе с целью приближения к метрологической точности, достигнутой на постоянном токе.

Для решения этих задач необходимо, наряду с исследованием и созданием новых, более совершенных видов измерительных преобразователей, вести работы по созданию источников питания измерительных цепей переменного тока звукового и ультразвукового диапазонов частот со стабильностью не менее 0,01% в течение, по крайней мере, 10 мин с необходимой плавностью регулирования выходных характеристик и синусоидальной формой кривой переменного тока.

Чтобы расширить пределы измерения основных величин, необходимо создать еще более точные измерительные трансформаторы для широкого диапазона частот, по крайней мере до 100 кгц, методы оценки их погрешностей и соответствующие источники питания достаточной мощности и стабильности. Для точного сравнения малых напряжений должны вестись работы как по повышению чувствительности измерительных преобразователей, так и по созданию стабильных измерительных усилителей постоянного и переменного токов.

В последние годы в некоторых схемах регулирования и автоматики начали применять токи низкой и инфранизкой частот. В связи с этим возникла задача разработать новые методы компарирования, так как при низких частотах (< 1—2 гц) инерция термопреобразователей мала и на результат влияет флуктуация температуры нагревателя.

Работы по изысканию других методов передачи значений постоянного тока в области низких и инфранизких частот, так же как и работы по повышению точности измерений в звуковом и ультразвуковом диапазонах частот, уже начаты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Чечулин А. А., Применение электронных ламп для повышения точности измерений на переменном токе, Сб. трудов ВИМС, Электрические и магнитные измерения, 1934.
2. Рождественская Т. Б., Методы и приборы для точных измерений на переменном токе повышенной частоты, Научно-техническое совещание работников промышленности, деятелей науки и техники, вып. 57, 1951.
3. Поверочные схемы, под ред. К. П. Широкова, Стандартгиз, 1961.
4. Инструкция Комитета стандартов, мер и измерительных приборов по проверке амперметров, вольтметров и ваттметров № 184—62.
5. Безикович А. Я., Зорин Д. И., Рождественская Т. Б., Новая аппаратура для точного измерения тока, напряжения и мощности в широком диапазоне частот, Доклад на конференции в Будапеште ИМЕКО, 25—101, 1961.
6. Hermach F. L., and Williams E. S., Thermal Voltage Converters for Accurate Voltage Measurements to 30 Megacycles, p. sec. Communication and Electronics July, 1960.
7. Hermach F. L., AC/DC Transfer Instruments for Current and Voltage Measurements, IRI Transactions on Instrumentation, v. 1—7, № 3—4, 1958.
8. Arnold A. H. M., Alternating Current Instrument Testing Equipment, Proc. IEE, v. 101, № 80, part II, 1954 (April).
9. Rump W., Kompensator zur genauen Absolutmessung von Wechselspannungen, Elektrotechnik, Bd. 5, 1951.
10. Безикович А. Я., О точности компенсационного метода измерения тока, Труды ВНИИМ, вып. 14 (74), Машгиз, 1952.
11. Зорин Д. И., Исследование катушек сопротивления переменного тока, Автореферат диссертации, ВНИИМ, 1951.

12. Каяндер М. С., Термоэлектрический метод поверки амперметров и вольтметров на переменном токе повышенной частоты, «Вестник электропромышленности», № 1, 1952.
13. Широков К. П., Применение квадрантного электрометра для поверки ваттметров на переменном токе повышенной частоты, Труды ВНИИМ, вып. 28 (88), 1956.
14. Широков К. П., Комплектная установка для поверки амперметров и вольтметров при повышенной частоте переменного тока, Труды ВНИИМ, вып. 24 (84), 1952.
15. Рождественская Т. Б., Погрешности измерительных трансформаторов тока в звуковом диапазоне частот, Труды ВНИИМ, вып. 28 (88), 1956.
16. Каяндер М. С., Образцовый измерительный трансформатор тока для диапазона частот 50—10 000 гц, Труды ВНИИМ, вып. 28 (88), 1956.
17. Любарская А. М., Измерительные трансформаторы напряжения для повышенных частот, «Измерительная техника», № 4, 1957.
18. Рождественская Т. Б., Теплинский А. М., Компаратор для измерения малых переменных токов, «Измерительная техника», № 11, 1960.
19. Рождественская Т. Б., Теплинский А. М., Образцовая установка для поверки микроамперметров и милливольтметров переменного тока, «Новые измерительные приборы и методы их поверки», № 7, 1961.
20. Безикович А. Я., Термоэлектрический метод поверки ваттметров на переменном токе нормальной и повышенной частоты, Труды ВНИИМ, вып. 24 (84), 1954.
21. Безикович А. Я. и Попов В. С., Метод и аппаратура для поверки ваттметров в диапазоне звуковых частот, Труды институтов Комитета стандартов мер и измерительных приборов, вып. 39 (99), 1960.
22. Shaffer G. F. and Hawkes H. D., A Precision AC/DC Comparator for Power and Voltage Measurements, Proc. IEE, v. 93, 1946.
23. Безикович А. Я., Зорин Д. И., Установка для поверки ваттметров, амперметров и вольтметров на переменном токе нормальной и повышенной частоты, Труды ВНИИМ, вып. 28 (88), 1956.
24. Рождественская Т. Б., Метод и аппаратура для поверки измерительных трансформаторов тока при повышенной частоте, Труды ВНИИМ, вып. 28 (88), 1956.

### МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ В ПЕРЕМЕННЫХ ПОЛЯХ

Раздел магнитных измерений принадлежит к числу весьма старых в измерительной технике. Так, например, считается, что китайский компас существует уже, по крайней мере, 3000 лет.

К началу прошлого столетия была создана методика измерений элементов магнитного поля Земли, связанная с именем Карла Гаусса, которая претендует на довольно малые погрешности измерений (десятые и даже сотые доли процента).

Область магнитных измерений получила свое развитие только после открытия Фарадеем закона электромагнитной индукции в первой половине прошлого столетия. На основе этого закона Максвеллом, Вебером и Столетовым был развит баллистический метод, а также предложены методы мостовых и компенсационных измерений на переменном токе.

Появление динамомашин и трансформаторов поставило перед измерительной техникой задачу определения магнитных характеристик материалов, необходимых как для расчета указанных устройств, так и для контроля качества магнитного материала, идущего на их изготовление. В числе этих характеристик главными являлись основная кривая намагничивания, определяемая баллистическим методом в переметрах, и потери энергии на гистерезис и вихревые токи при перемагничивании металла переменным полем промышленной частоты 50 гц. Последние измерялись в приборе Эпштейна, который в своей принципиальной части был предложен Доливо-Добровольским.

Задачи метрологии по обслуживанию этой области измерений сводились:

- 1) к воспроизведению единиц напряженности магнитного поля и магнитного потока в постоянных полях и передаче их значений к установкам, измеряющим основную кривую намагничивания,

- 2) к передаче единицы магнитного потока в область переменного намагничивания при частотах около 50 гц для получения зависимости потерь в стали в функции максимального значения переменной магнитной индукции.

Началом работ по магнитным измерениям в Главной палате мер и весов следует считать испытания листовой электротехнической стали, проведенные И. А. Лебедевым в электроизмерительной лаборатории в 1910—1913 гг.

В период первой мировой войны 1914—1918 гг. потребовалось организовать производство отечественной листовой электротехнической стали. Активное участие в этом принимали крупные метрологи: Л. В. Залуцкий, Н. А. Маренин и позднее Е. Г. Шрамков.

В 1918 г. Л. В. Залуцкий создал в Главной палате магнитную лабораторию, которая обеспечивала метрологическое обслуживание выпуска магнитного металла, а следовательно, и магнитные измерения в переменных полях. В этой лаборатории работали такие известные специалисты, как Е. Г. Шрамков, Б. М. Яновский, А. Н. Бойко.

К крупнейшим исследованиям в области материалов в переменных полях в первый период деятельности лаборатории следует отнести разработку Е. Г. Шрамковым теоретических основ ваттметрового метода измерения потерь, а также создание новой конструкции первых отечественных приборов Эпштейна. В конце 30-х годов в лаборатории велось изучение методики магнитных измерений на переменном токе промышленной частоты и составление нормативных документов.

В 1935—1938 гг. Е. Т. Чернышев и Г. Е. Егоров предложили методику и аппаратуру для измерения коэффициентов формы э. д. с., индуктированных в обмотках прибора Эпштейна, а в 1934 г. Е. Г. Шрамков и Е. Т. Чернышев разработали ОСТ 6896/ВКС на термины и определения в области магнитных величин, действующий по настоящее время.

К 1941 г. лаборатория располагала ваттметровой и дифференциально-ваттметровой установками, резонансным мостом Гибе—Варнера для частот до 1000  $\text{гц}$  и установкой с компенсатором Гейгера, на которой проводились первые измерения при намагничивании одновременно постоянным и переменным полями. В то же время Е. Г. Шрамковым были произведены теоретические изыскания по погрешностям измерений магнитных характеристик.

Таким образом, к 1941 г. магнитная лаборатория располагала некоторой аппаратурой (правда, преимущественно иностранного производства) и накопила достаточный опыт для составления первого плана исследований, который позволил в будущем сделать качественный скачок в области магнитных измерений. Однако выполнению этих задач помешала Великая Отечественная война. С 1941 по 1944 г. лаборатория находилась в Свердловске и вела главным образом поверочную работу.

В послевоенный период в связи с развитием техники связи и использованием магнитных материалов в ряде специальных областей частотный диапазон их применения расширился до 10  $\text{кгц}$ . При этом появилась необходимость измерять на переменном токе при этих частотах не только потери, но и основную кривую намагничивания и комплексную магнитную проницаемость. В связи с этим с 1945 по 1953 г. лаборатория работала над созданием необходимой отечественной аппаратуры.

Уже к 1951 г. был создан комплекс аппаратуры, в том числе прибор, аналогичный феррометру фирмы «Сименс», измеряющий на переменном токе частотой 50  $\text{гц}$  основную кривую намагничивания и потери как на кольцевых, так и на полосовых образцах в пермеетре. Для удовлетворения требований промышленности уменьшить массу испытываемых образцов при измерении потерь в листовых электротехнических сталях Г. К. Яголой была разработана установка (рис. 1) с прибором Эпштейна для образцов массой 2  $\text{кг}$  и первым в СССР ваттметром, предназначенным для работы в цепях с малым  $\cos \varphi$  (порядка 0,1). Кроме того, была разработана мостовая установка, с помощью которой в диапазоне частот 200  $\text{гц}$  ÷ 20  $\text{кгц}$  измеряли с погрешностью 2% индуктивность, пропорциональную упругой составляющей комплексной магнитной проницаемости, и с погрешностью 5% — сопротивление потерь. Для испыта-

ния материалов, намагничиваемых одновременно постоянным и переменным полями частотой 50 гц, была создана установка, определяющая основную кривую намагничивания (как компенсационным методом, так и при помощи приборов непосредственной оценки) и суммарные потери на гистерезис и вихревые токи на кольцевых образцах.

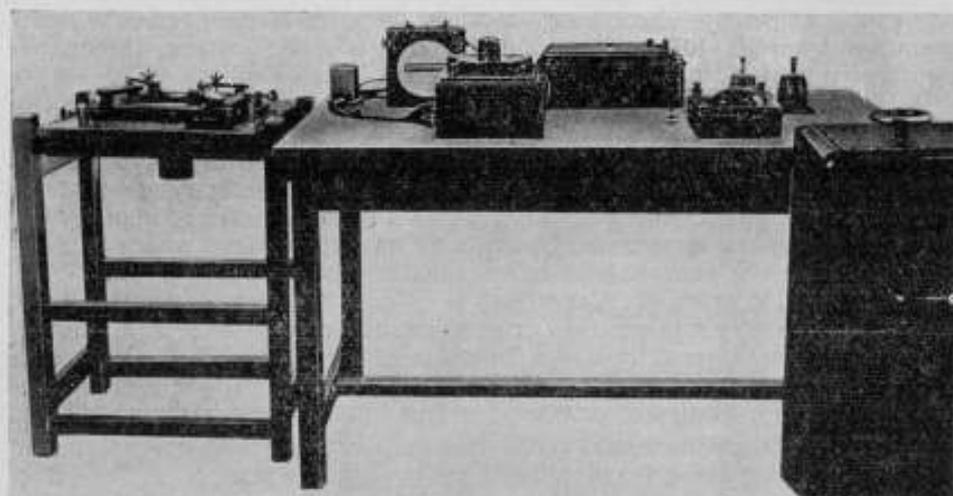


Рис. 1. Ваттметровая установка ВУ-1.

После создания комплекса минимально необходимой отечественной аппаратуры лаборатория смогла перейти в 1953—1957 гг. к обширным методическим исследованиям. Прежде всего следует отметить работы по выбору магнитных характеристик при намагничивании в переменных магнитных полях и при одновременном намагничивании постоянным и переменным полями. В числе характеристик, описывающих поведение магнитных материалов в переменных полях отмечены следующие:

1) основная динамическая кривая намагничивания в виде зависимостей

$$B_{\max} = f(H_{\max})$$

и

$$E = f(H_{\max}),$$

где  $E$  — э. д. с., индуцированная в измерительной обмотке образца (при этом значение  $E$  относится к одному витку измерительной обмотки и к единице площади сечения образца);

2) комплексная магнитная проницаемость

$$\hat{\mu} = |\mu| e^{-j\delta};$$

3) семейство кривых при одновременном намагничивании переменным и постоянным полями

$$B_{\max} + B_{\min} = f(H_{\max} + H_{\min}) \quad \text{при } H_{\pm} = \text{const};$$

4) кривая зависимости средней проницаемости  $\mu_2$  от напряженности постоянного поля при различных значениях  $H_{\max}$  переменного поля.

Лабораторией были проведены большие исследования, которые позволили разработать методику измерений в условиях комбинированного намагничивания постоянным и переменным полем и двумя переменными

полями различных частот звукового диапазона, а также теоретически и экспериментально изучить характер искажения кривых магнитной индукции и напряженности поля. Одновременно была поставлена задача стандартизации динамических характеристик материалов и методов измерений на переменном токе.

Упомянутые исследования позволили в 1957—1962 гг. создать комплекс современной образцовой аппаратуры для выполнения поверочных работ.

Коллективом лаборатории под руководством Е. Т. Чернышева были разработаны следующие установки:

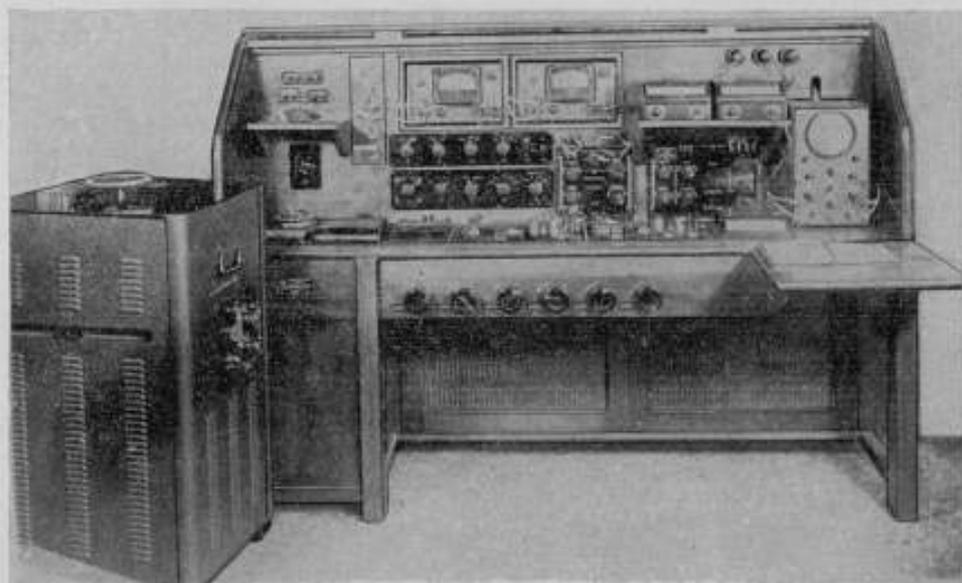


Рис. 2. Установка УМИПТ-2.

1. Установка УМИПТ-2 для испытания нормальных образцов на переменном токе  $50 \text{ гц} \rightarrow 10 \text{ кгц}$  и при одновременном намагничивании в постоянном и переменном полях (рис. 2), позволяющая определять динамическую основную кривую намагничивания и суммарные потери в образце. При этом  $B_{\text{max}}$  находят по средним значениям э. д. с. в измерительной обмотке, а  $H_{\text{max}}$  — по средним значениям э. д. с. во вторичной обмотке катушки взаимной индуктивности, включенной в намагничивающую цепь, либо по амплитудным значениям падения напряжения на небольшом активном сопротивлении.

Для определения зависимости  $B_{\text{max}} = f(H)$  применяется амперметр термоэлектрической системы а, для определения суммарных потерь — малокосинусный ваттметр. Установку можно использовать для измерений с погрешностью  $3 \div 5\%$  при различных режимах намагничивания, в том числе и при наложении постоянного поля на переменное.

2. Для определения суммарных потерь в образцах ферромагнитных материалов с погрешностью  $1 \div 2\%$  были разработаны абсолютный (УКИП-1) и дифференциальный (УКИП-2) калориметры.

Основной частью установки УКИП-1 (рис. 3) является сосуд Дьюара, наполненный трансформаторным маслом, в котором размещается намагничиваемый образец. О потерях судят по подъему температуры масла за определенный промежуток времени. С помощью абсолютного

калориметра измеряют потери  $1 \div 100$  вт в звуковом диапазоне частот.

Калориметр УКИП-2 с автоматическим регулированием постоянной компенсирующей мощности, рассеиваемой в обмотке вспомогательного образца из полистирола, измеряет потери  $10^{-2} \div 1$  вт при более высоких частотах (до 1 Мгц) на небольших образцах. Суммарные потери в образце находят по мощности постоянного тока, рассеиваемой в обмотке вспомогательного образца при условии равенств скоростей изменения температур в обоих сосудах, содержащих вспомогательный и испытуемый образцы.

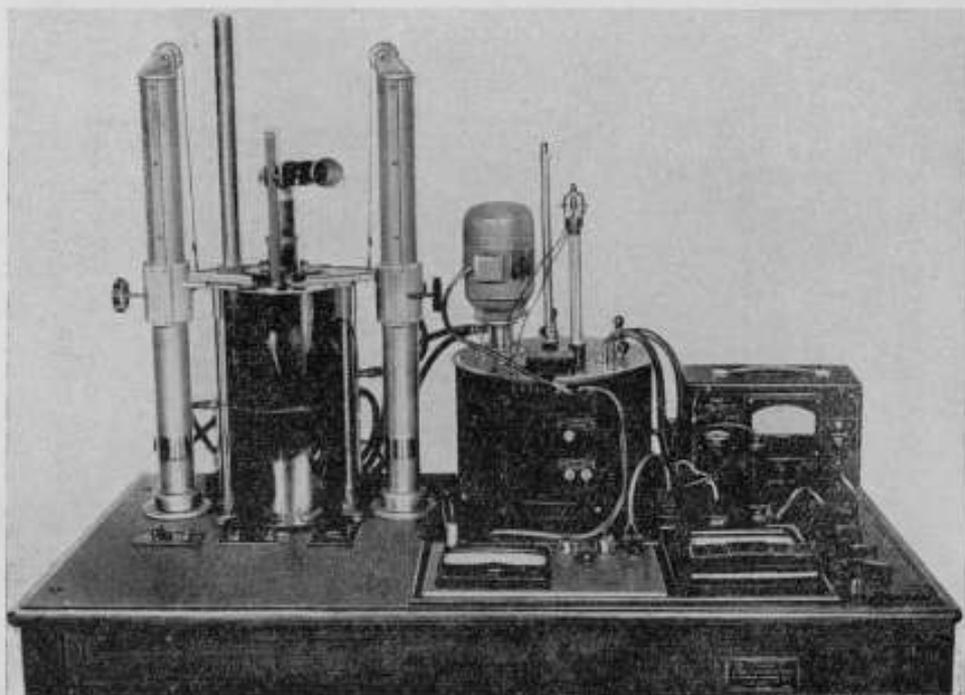


Рис. 3. Установка УКИП-1.

3. Для определения характеристик магнитномягких материалов при частотах ультразвукового диапазона создана мостовая установка УИММ-2 (рис. 4), которой измеряются индуктивности в пределах  $2 \cdot 10^{-6} \div 0,5$  гн с погрешностью 1% и сопротивления потерь  $1 \text{ ом} \div 10 \text{ ком}$  с погрешностью 5%. На основании результатов измерений подсчитываются магнитная проницаемость в области полей  $0,5 \div 100$  а/м и тангенс угла потерь.

В последнее время (1963 г.) коллективом лаборатории созданы установки УВИМ и УИМ повышенной точности для измерения проницаемости и тангенса угла потерь в магнитодиэлектриках, позволяющие измерять индуктивности с погрешностью 0,2% и сопротивления потерь с погрешностью 1%.

4. При исследовании нормальных образцов магнитных материалов, применяемых в автоматике и при производстве трансформаторов постоянного тока, наибольший интерес представляет динамическая петля гистерезиса (которую правильнее называть динамической магнитной петлей) и ее параметры (коэффициент прямоугольности, коэффициент

квadratности, динамическая «коэрцитивная сила»). Для этой цели в 1963 г. на базе вольтметров средних значений с фазочувствительными полупроводниковыми выпрямителями была разработана установка Ф-2, которая позволяет определять в диапазоне частот  $200 \text{ гц} \div 10 \text{ кгц}$  с инструментальной погрешностью  $3 \div 7\%$  мгновенные значения индукции и напряженности магнитного поля.

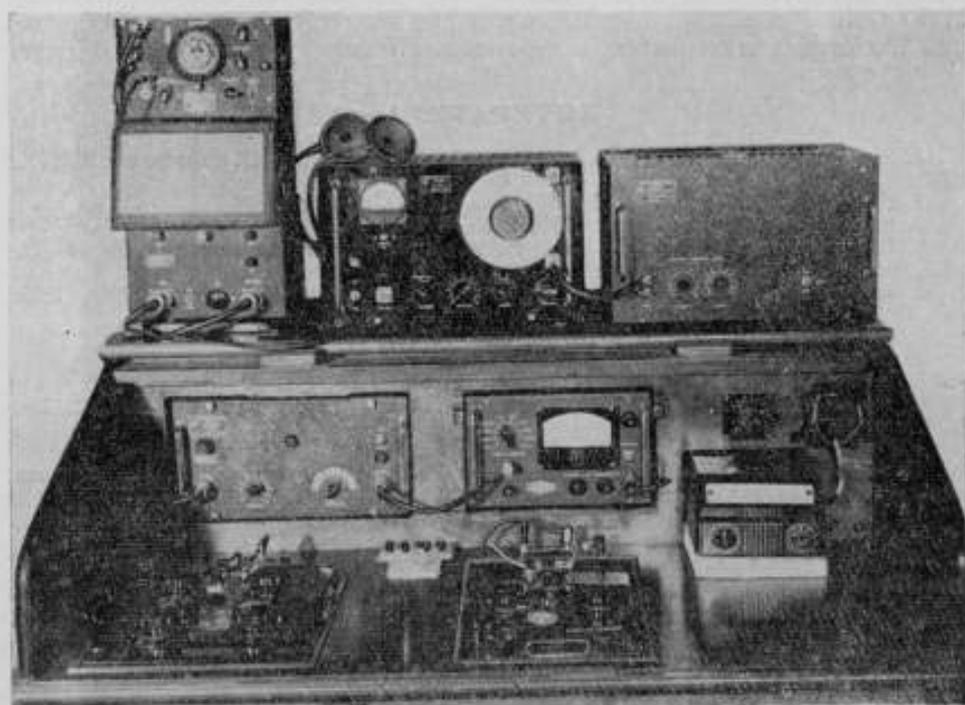


Рис. 4. Установка ВИММ-2.

В дальнейшем работы лаборатории по измерениям магнитных характеристик в динамических режимах намагничивания будут идти в нескольких направлениях.

1. Прежде всего, уже созданная аппаратура позволит разработать методику испытаний новых видов магнитномягких материалов: магнитодиэлектриков, молибденового пермаллоя, сплавов с прямоугольной петлей гистерезиса, ферритов и железо-никелевых сплавов микронного проката. Это, в свою очередь, поможет разработать методические государственные стандарты, крайне важные для прогресса в области создания новых видов магнитных материалов.

2. Предстоит разработать для ряда областей техники методы испытаний магнитных материалов в условиях больших насыщений в широком диапазоне частот.

3. Требуется более глубокое изучение методики измерений при сложном намагничивании постоянным и переменным полями, особенно при более высоких частотах (до  $1 \text{ Мгц}$ ) и больших напряженностях постоянного поля (выше  $3 \text{ кА/м}$ ).

4. Необходимо уточнить методику измерения динамических гистерезисных кривых и особенно измерения дифференциальной проницаемости в любой их точке.

5. В связи с расширяющимся использованием в технике гистерезисных двигателей и магнитной записи предстоит работы по созданию и методике испытаний магнитнотвердых материалов в переменных и эллиптических магнитных полях.

Если все эти задачи будут решаться одновременно с повышением точности измерений основных характеристик до 2÷3%, унификацией самих характеристик и методов их определения, то метрологические организации обеспечат нужды народного хозяйства в области испытательных магнитных материалов в переменных полях на ближайшие 10 лет.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Электрические и магнитные измерения, под ред. Е. Г. Шрамкова, ОНТИ, 1937.
2. Будрин С. П., Труды ВИМС, вып. 1(17), 1932, стр. 77.
3. Шрамков Е. Г., Труды ЛЭМИ, № 4, 1934, стр. 158.
4. Шрамков Е. Г. и Зуева Н. Г., «Вестник стандартизации», № 11—12, 1931, стр. 73.
5. Егоров Г. Е. и Чернышев Е. Т., Труды ВИМС, вып. 7 (23), 1935, стр. 73.
6. Егоров Г. Е., Труды ВНИИМ, вып. 18(34), 1938, стр. 189.
7. Шрамков Е. Г., Труды ВНИИМ, вып. 1(56), 1947, стр. 55.
8. Ягода Г. К., Труды ВНИИМ, вып. 24(84), 1954, стр. 72.
9. Чернышев Е. Т. и Чернышева Н. Г., Труды ВНИИМ, вып. 29(89), 1956, стр. 83.
10. Чернышев Е. Т., Труды ВНИИМ, вып. 29(89), 1956, стр. 36.
11. Чернышев Е. Т., Чернышева Н. Г., Чечурина Е. Н., «Физика металлов и металловедение», вып. 1, 1955, стр. 92.
12. Чернышев Е. Т. и Чечурина Е. Н., Труды ВНИИМ, вып. 29(89), 1956, стр. 51.
13. Чечурина Е. Н., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 43(103), 1960, стр. 90.
14. Чечурина Е. Н., Труды ВНИИМ, вып. 29(89), 1956, стр. 109.
15. Чечурина Е. Н., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 43(103), 1960, стр. 96.
16. Чернышева Н. Г., Труды ВНИИМ, вып. 29(89), 1956, стр. 58.
17. Чернышев Е. Т., «Проблемы производства и применения электротехнических сталей», ЦБТИ, Свердловск, 1960, стр. 131.
18. Чернышева Н. Г., «Заводская лаборатория», № 4, 1959, стр. 437.
19. Чернышева Н. Г., «Заводская лаборатория», № 9, 1962, стр. 1087.
20. Чернышева Н. Г., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 64(124), 1962, стр. 9.
21. Чернышев Е. Т., Чечурина Е. Н., Чернышева Н. Г., Оралова И. А., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 64(124), 1962, стр. 145.
22. Чернышева Н. Г., Чечурина Е. Н., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 43(103), 1960, стр. 82.
23. Оралова И. А., Чернышев Е. Т., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 43(103), 1960, стр. 82.
24. Курти В. Л., Оралова И. А., Чернышева Н. Г., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 72(132), 1963, стр. 39.
25. Чернышева Н. Г., «Измерительная техника», № 2, 1957, стр. 46.
26. Чернышева Н. Г., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 43(103), 1960, стр. 69.
27. Чечурина Е. Н., «Измерительная техника», № 6, 1962, стр. 45.
28. Чернышев Е. Т., Чернышева Н. Г., Чечурина Е. Н., Магнитные измерения на постоянном и переменном токе, Стандартгиз, 1962.

### РАБОТЫ ВНИИМ В ОБЛАСТИ ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

После внедрения в промышленность силовых электрических сетей и установок переменного тока в Главной палате мер и весов, а затем во ВНИИМ начали уделять большое внимание вопросам развития техники измерения электрических величин и их эталонированию на переменном токе.

Первые работы по фазовым измерениям проведены в 40-х годах. В результате исследований разработаны инструкции по поверке однофазных фазометров, оценивающих коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ ) и созданы исходные методы и аппаратура для измерения угловых погрешностей измерительных трансформаторов.

В 50-е годы шла интенсивная работа по созданию образцовой аппаратуры, специально предназначенной для поверки однофазных фазометров.

Быстрое развитие радионавигации, радиолокации, телевидения, телеизмерений, измерений неэлектрических величин ламповыми измерительными устройствами потребовало точной оценки фазовых сдвигов между двумя напряжениями в широком диапазоне частот. Исследования в этой области измерений были начаты в конце 50-х годов и продолжаются до настоящего времени. Во ВНИИМ разрабатываются также точные методы и создается образцовая аппаратура для поверки однофазных фазометров высокой точности.

Создание исходной фазометрической аппаратуры ведется в двух основных направлениях: создание образцовых мер и фазометров высокой точности.

Кроме того, во ВНИИМ разрабатывается метод определения погрешностей электронных фазометров без использования образцовой аппаратуры.

#### Классификация методов измерения сдвига фаз

В зависимости от приемов и технических средств для измерения фазовых сдвигов используются методы непосредственной оценки и методы сравнения.

При использовании методов непосредственной оценки с помощью фазоизмерительных устройств измеряется (оценивается) вся искомая

величина фазового сдвига. При этом в процессе измерения не нужно вводить образцовые элементы, создающие известные фазовые сдвиги. Эти методы, хотя и менее точны, чем методы сравнения, но в измерительной практике распространены наиболее широко.

Сущность методов сравнения заключается в том, что вся искомая величина фазового сдвига или ее часть измеряется путем сравнения с уже известной величиной фазового сдвига.

Способы измерения фазовых сдвигов многочисленны и разнообразны. В настоящее время имеется более тысячи работ, посвященных различным вопросам фазовых измерений. Поэтому при определении признаков, на основе которых могут быть составлены классификации обоих методов, следует выбрать такие, которые раскрывали бы присущие им основные закономерности.

Структурная схема измерения методом непосредственной оценки включает преобразователь для преобразования величины фазового сдвига в некоторую промежуточную пропорциональную ему величину и измерительное устройство. В качестве измерительного устройства используются стрелочные приборы постоянного и переменного токов, приборы, с помощью которых показания записываются на бумагу или пленку, приспособления на экранах электронно-лучевых трубок с нанесенными на них делениями и др.



Рис. 1. Классификация методов непосредственной оценки.

На рис. 1 приведена классификация методов непосредственной оценки, в основе которой лежит принцип преобразования, т. е. выбран признак, определяющий и физическую сущность величины, в которую преобразуется фазовый сдвиг, и модификацию преобразующего устройства\*.

Погрешность измерения методом непосредственной оценки складывается из погрешностей преобразования и измерительного устройства. Погрешность преобразования можно разделить на две части:

\* Методы измерения, основанные на преобразовании величины фазового сдвига в изменение частоты, интенсивности света и др., в классификации не представлены, так как они сложны и в практике фазовых измерений применяются сравнительно редко.

1. Погрешность из-за фактических отклонений от идеальных параметров элементов и происходящих процессов, например конечное время срабатывания полупроводниковых и электронных ключей, нестабильность источников питания и т. п.

2. Погрешность из-за нестабильности частоты и искажений формы кривой сравниваемых по фазе сигналов.

Сопоставляя результаты, полученные в работах советских и зарубежных авторов, можно заключить, что суммарная погрешность измерения при использовании метода непосредственной оценки составляет 1—3°. Исключение представляет метод, при котором в преобразователе осуществляется «усиление фазы», т. е. вводится устройство, изменение фазового сдвига сигналов на выходе которого в определенное число раз (равное коэффициенту «усиления фазы») превышает изменение фазового сдвига сигналов, действующих на его входе. Погрешность измерения в этом случае резко уменьшается [1, 2].



Рис. 2. Классификация методов сравнения.

Структурная схема измерения методом сравнения включает индикатор и образцовое устройство, вырабатывающее сигналы с известными фазовыми сдвигами или с точными интервалами времени (рис. 2). В качестве признака, на основе которого составлена классификация метода сравнения, взят принцип действия образцового устройства.

При использовании методов сравнения устраняются полностью или частично такие недостатки методов непосредственной оценки, как нелинейность характеристик и связанная с этим неточность градуировки приборов, выполнение измерений на экране ЭЛТ и т. д. Точность определяется в основном погрешностью, с которой задается известная величина фазового сдвига или интервал времени, и разрешающей способностью индикатора. Анализ точности методов сравнения показывает, что погрешность измерения не превышает 0,1—1°.

#### Метод «самопроверки»

Сущность метода «самопроверки» заключается в определении поправок посредством самого поверяемого фазометра. Его применяют не только в фазометрии, но также при аттестации многогранной оптиче-

ской призмы, стоящей во главе отечественной поверочной схемы угломерной аппаратуры.

Этот метод принципиально очень прост и не зависит от точности вспомогательной аппаратуры, так как исходным является заведомо известный угол  $360^\circ$ .

Погрешности фазометра определяются с помощью дополнительных неградуированных фазовращателей. На фазометре ПФ (рис. 3) обычным порядком, т. е. при подключении обоих каналов к выходу генератора Г, устанавливается нулевое показание. Затем переключатели К-1 и К-2 переводятся в положения 1 и 1'. При этом фазовращатель НФ-1 регулируется так, чтобы фазометр показал  $180^\circ$ .

Точно так же измеряется фазовый сдвиг между входным и выходным напряжениями фазовращателя НФ-2 (переключатели К-1 и К-2

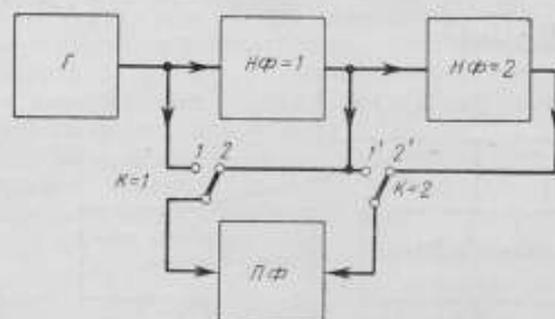


Рис. 3. Схема проверки фазометров методом «самопроверки».

в положениях 2 и 2'), который также регулируется до получения отсчета  $180^\circ$  по фазометру. Затем оба фазовращателя включаются последовательно. Если теперь измерить сдвиг фаз между входным сигналом фазовращателя НФ-1 и выходным сигналом фазовращателя НФ-2 (положение переключателя 1 и 2'), то на фазометре должно получаться  $360^\circ$  или нулевое значение. Если точка  $180^\circ$  определена неточно, т. е. получается не-

которое показание  $\alpha$ , то  $\alpha/2$  и будет погрешностью для точки  $180^\circ$ . Так же, как для  $180^\circ$ , можно получить погрешности для  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $22,5^\circ$  и т. д.

Метод «самопроверки» имеет несколько различных модификаций. Теоретически и экспериментально он был исследован в лаборатории радиотехнических измерений ВНИИМ. Результаты показали, что этот метод 1) применим к группе электронных фазометров с пределами измерения  $0 \div 360^\circ$ , от  $-10$  до  $+200^\circ$  и  $0-200^\circ$ , 2) наиболее целесообразно использовать его при аттестации специально изготовленных образцовых фазометров с пределами  $0-360^\circ$  и обладающих повышенной чувствительностью.

Верхний диапазон частот метода «самопроверки» окончательно не определен. Однако можно предполагать, что использование его при частотах более  $10-30$  Мгц приведет к появлению значительных дополнительных погрешностей, обусловленных влиянием емкостных связей в переключающих устройствах.

Метод «самопроверки» применялся во ВНИИМ при аттестации макета образцовой фазоизмерительной установки на диапазон частот  $100$  кГц —  $3$  Мгц.

### Методы воспроизведения фазовых сдвигов

Сдвиг фаз двух электрических сигналов характеризует задержку одного сигнала относительно другого во времени. Так как частоту и время можно измерить достаточно точно, то в основу образцовых мер, или, как их принято называть, калибраторов фазы, положены методы

оценки фазовых сдвигов выходных сигналов в долях или целых периодах высокостабильного по частоте сигнала исходного генератора.

Под калибратором фазы здесь понимается устройство, на выходе которого воспроизводятся два электрических сигнала с точно известными фазовыми соотношениями. Поскольку это устройство включает системы деления или умножения частоты для получения сигналов, частоты которых относятся как целые числа, верхний диапазон их выходных сигналов ограничен 100 (200) кГц.

На рис. 4 приведена принципиальная схема метода воспроизведения фазовых сдвигов. Этот метод основан на свойствах фигур Лиссажу повторять свою форму периодически через  $180^\circ/n$  (где  $n$  — целое число, характеризующее отношение частот) при изменении фазы низкочастотного сигнала на  $360^\circ$ .

Как видно из схемы, напряжение от генератора  $\Gamma$  с частотой колебаний  $f$  поступает на делитель частоты  $ДЧ$  с коэффициентом деления  $n$ , а также на вертикально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки осциллографа  $\Phi$ . Для получения сигналов, частоты которых относятся как целые числа, можно использовать также

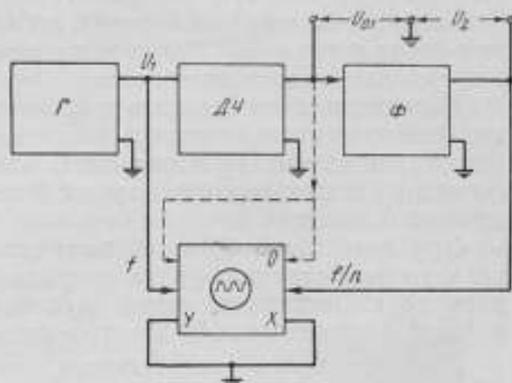


Рис. 4. Принципиальная схема метода воспроизведения фазовых сдвигов с использованием свойств фигур Лиссажу.

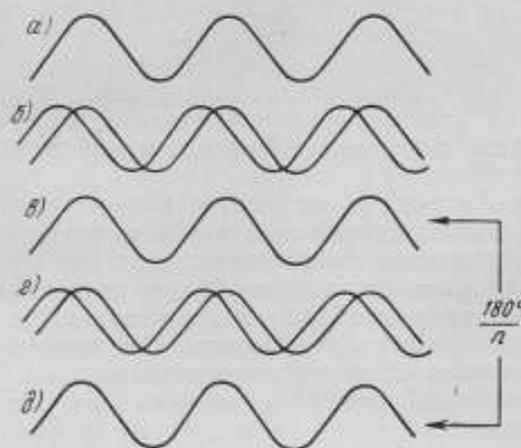


Рис. 5. Осциллограммы фигур Лиссажу при отношении частот  $1:n$ .

умножители частоты. К горизонтально отклоняющим пластинам прикладывается напряжение с выхода фазовращателя  $\Phi$ , частота которого равна  $f/n$ .

Нулевой фазовый сдвиг между выходными напряжениями  $U_{01}$  и  $U_2$  устанавливаются следующим образом. При отношении частот напряжений  $U_1$  и  $U_{01}$ , равным  $1:n$ , с помощью фазовращателя, дополнительно введенного в блок делителя частоты, на экране осциллографа устанавливают исходную разомкнутую фигуру Лиссажу (рис. 5, а). На входы  $X$  и  $Y$  осциллографа подают напряжения  $U_{01}$  и  $U_2$ . Затем фазовращателем устанавливают нулевой фазовый сдвиг с погрешностью  $\pm(1-3)^\circ$  путем сведения ветвей эллипса в прямую линию.

Наблюдая на экране осциллографа фигуру Лиссажу при подключении выхода фазовращателя (рис. 5, б), можно заметить, что она отличается от исходной из-за погрешности установки синфазности выходных напряжений. Чтобы исключить эту погрешность, фазовращатель регулируют так, чтобы фигура Лиссажу, получающаяся при подклю-

чении выхода фазовращателя, превратилась в разомкнутую фигуру (рис. 5, в).

Когда фазовращатель установлен на нуле, легко получить любое другое желаемое значение фазового сдвига между выходными напряжениями  $U_{01}$  и  $U_2$  через интервалы, кратные  $180^\circ/n$  (кривые в, г, д на рис. 5).

Если к рассмотренной схеме добавить дополнительный фазовращатель с пределами  $\pm 180^\circ/n$ , можно установить желаемый фазовый сдвиг в пределах каждого интервала.

Характерная особенность рассматриваемого метода состоит в том, что фазовращатель, делитель частоты и другие элементы схемы не вносят погрешностей. При синусоидальной форме кривых сравниваемых сигналов его погрешность определяется неточностью совмещения ветвей фигуры Лиссажу [3].

При достаточной большой вытянутости фигуры Лиссажу в горизонтальном направлении экрана приращения фазовых сдвигов можно измерять по совмещениям одной-двух ветвей фигуры, получающейся при прямом и обратном ходе электронного луча.

Для снижения погрешности, например до величины порядка  $0,1-0,05^\circ$ , необходимо выбрать коэффициент деления (умножения) 36—90. При этом усилитель горизонтального отклонения электронного луча должен обеспечить такое усиление низкочастотного напряжения, которое позволило бы растянуть центральную ветвь фигуры Лиссажу на 25—30 мм.

Наличие в горизонтально отклоняющем напряжении гармонических составляющих приводит к неравенству скоростей движения электронного луча в прямом и обратном направлениях, а следовательно, и к искажениям фигуры Лиссажу.

Теоретическое исследование влияния гармонических составляющих на точность измерения фазовых сдвигов с помощью фигур Лиссажу показывает, что наличие четных гармоник, находящихся в фазе с основной волной, приводит к значительным дополнительным погрешностям, которые возрастают с увеличением номера гармоники. Наличие нечетных гармоник, находящихся в фазе с основной волной, погрешностей не вносит.

На «фазоустойчивость» фигур Лиссажу существенное влияние оказывает наличие паразитных сигналов и напряжений наводок, частоты которых не когерентны выходным напряжениям фазовращателя.

Если частоты полезного сигнала и наводки соизмеримы, то на экране ЭЛТ можно наблюдать колебания всего изображения, а фигура Лиссажу будет при этом как бы поворачиваться в обе стороны. При периоде колебаний сигнала разностной частоты, превосходящем время измерения, наблюдатель будет воспринимать колебание изображения как постепенный уход «фазового нуля».

Когда частоты полезного сигнала и наводки несоизмеримы, линии изображения утолщаются. Больше влияние оказывают наводки, если они имеются в спектре напряжения низшей частоты. Колебания фазы сигнала высшей частоты в пределах  $\pm (0,2-0,5)^\circ$  практически неощутимы на глаз.

Рассмотренный метод был исследован экспериментально в лаборатории электрических измерений ВНИИМ [4] на макете образцового калибратора фазы (рис. 6). В калибраторе фазы трансформация частоты напряжений фазовращателя была предусмотрена для получения выходных напряжений с калиброванным фазовым сдвигом в плавном диапазоне частот 20 гц — 20 кц. Для этого частота напряжений, поступаю-

ших в каналы преобразования частоты, была выбрана равной 200 кГц, а диапазон частот напряжения вспомогательного генератора — соответственно 180—200 кГц. Напряжения частотой 200 кГц получались удвоением частоты выходных напряжений емкостного фазовращателя, для питания которого в калибраторе фазы применялся кварцевый генератор с частотой колебаний напряжения 100 кГц. Приращение фазы напряжения фазовращателя измерялось на электронно-лучевом индикаторе при соотношении частот 1 : 36. В калибраторе фазы были предусмотрены дополнительные выходы для получения напряжений с заданными фазовыми соотношениями при частотах 100 и 200 кГц. В качестве выходных каскадов калибратора при частоте до 20 кГц применялись двухтактные усилители мощности, которые давали возможность регулировать уровни напряжений с помощью низкоомных делителей напряжения. При частотах 100 и 200 кГц использовались катодные повторители. Погрешность измерения приращений фазы выходного напряжения не превышала 0,1°.

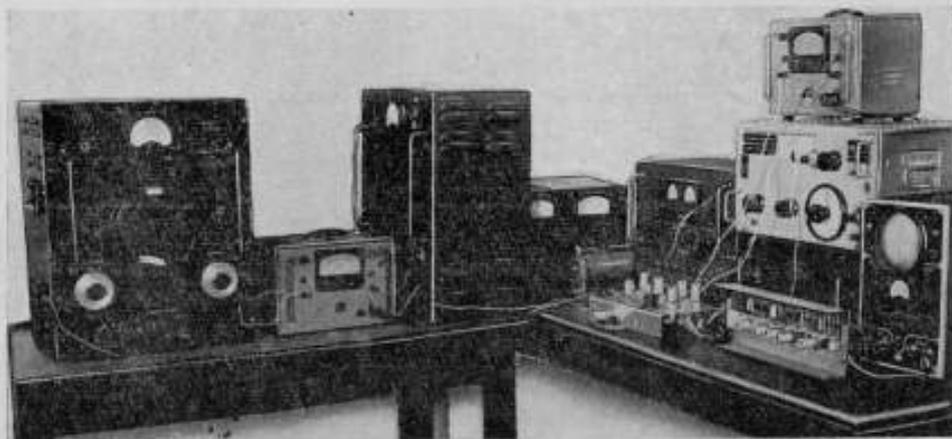


Рис. 6. Общий вид макета калибратора фазы с индикацией приращений фазовых сдвигов на электронно-лучевой трубке.

На рис. 7 показана принципиальная схема метода воспроизведения фазовых сдвигов без индикации их приращений. Этот метод основывается на преобразовании частоты путем ее деления, при этом фаза напряжения на выходе делителя частоты уменьшается пропорционально коэффициенту деления.

Из рис. 7 следует, что напряжения частотой  $n f$  от задающего генератора  $ZГ$  через дополнительный фазовращатель  $ДФ$  поступают на делитель частоты  $ДЧ-1$  и через круговой фазовращатель  $\Phi_0$  — на делитель частоты  $ДЧ-2$  с коэффициентами деления  $n$ , затем напряжения частотой  $f$  поступают на избирательные цепи  $ИЦ-1$  и  $ИЦ-2$  и выходные усилители  $ВУ-1$  и  $ВУ-2$ .

Изменение фазы напряжения частотой  $n f$  на  $360^\circ$  приводит к изменению фазового сдвига выходных напряжений  $U_1$  и  $U_2$  на  $360^\circ/n$ . Например, если значение  $n$  равно 18, то каждому обороту кругового фазовращателя соответствует приращение фазы выходного напряжения  $U_2$  на  $20^\circ$ .

Поочередным сравнением фаз выходных напряжений и фазы напряжения задающего генератора представляется возможность установить нулевой фазовый сдвиг между выходными напряжениями с помощью

дополнительного фазовращателя и индикатора равенства фаз  $H$ . В качестве индикатора равенства может быть использован осциллограф.

Используя круговые фазовращатели сравнительно низкой точности, можно получить достаточно точные значения фазовых сдвигов между выходными напряжениями. Погрешность фазовращателей уменьшается пропорционально выбранному значению коэффициента деления делителей частоты.

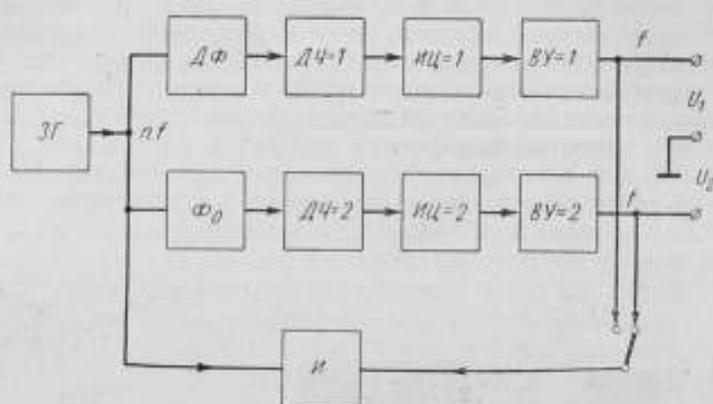


Рис. 7. Принципиальная схема метода воспроизведения фазовых сдвигов с использованием двухканальной системы деления частоты.

На основе метода деления частоты исходного сигнала в двухканальной системе во ВНИИМ создан образцовый калибратор фазы на частоты 20, 50 и 1000 гц [5].



Рис. 8. Внешний вид двухканального калибратора фазы.

В качестве кругового фазовращателя в калибраторе фазы использован кольцевой реостат. Для того чтобы колебания выходного напряжения снизить до 8%, фазовращатель питали через круговой делитель напряжения. Так как его погрешность в диапазоне частот 0,72—36 кгц по экспериментальным данным не превышала  $\pm(2-4)^\circ$ , для снижения

погрешности калибратора до  $\pm 0,1^\circ$  коэффициент деления делителей частоты выбрали равным 36.

Задающим генератором в калибраторе фазы (рис. 8) являлся кварцевый генератор с частотой колебаний 72 кГц. Напряжения частотой 0,72, 1,8 и 36 кГц, питающие круговой фазовращатель, получались соответствующим делением частоты 72 кГц.

В качестве делителей частоты в калибраторе фазы применялись пересчетные цепи, коэффициенты деления которых распределены в каждом из каналов как 2—3—3—2. Такое распределение коэффициентов деления позволило использовать простейшие фильтры нижних частот в качестве избирательных цепей.

Уровни выходных напряжений калибратора фазы в пределах 0,1—40 в изменялись с помощью низкоомных сопротивлений (1000 ом), которые были включены во вторичные обмотки трансформаторов выходных усилителей. Как показали эксперименты, погрешность дискретных приращений фазы выходного напряжения калибратора в диапазоне углов (0—360)° не превышала  $\pm 0,1^\circ$ .

Работы ВНИИМ по созданию точных методов поверки стрелочных фазометров, измеряющих фазовый сдвиг между током и напряжением в сильноточных цепях ( $\cos \varphi$ ), представлены образцовыми установками на основе прямоугольно-координатного компенсатора переменного тока. Широкий диапазон частот (50—8000 гц) этих установок и сравнительно малые погрешности измерений ( $\pm 0,5^\circ$ ) обеспечивают поверку стрелочных фазометров класса точности 1,5 и ниже.

Исходя из общего состояния техники фазовых измерений, можно сделать вывод, что работы в этой области измерений следует продолжить как в направлении освоения новых диапазонов частот, так и в части измерения малых величин фазовых сдвигов. Определенное внимание должно быть уделено также разработке точных методов и аппаратуры для поверки делителей напряжения с малыми фазовыми погрешностями.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Боня-Бруевич А. М., Широков В. И., Некоторые вопросы фазовых измерений, ЖТФ, вып. 10, т. XXV, 1955.
2. Жаботинский М. Е., Сверчков Е. И., Метод измерения малых фазовых углов, «Приборы и техника эксперимента», № 3, 1956.
3. Колтик Е. Д., Новый метод измерения сдвига фаз в  $90^\circ$ , Труды института Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 67(127), 1962.
4. Колтик Е. Д., Получение заданного угла сдвига фаз между напряжениями методом биений, «Измерительная техника», № 6, 1961.
5. Вейсбрут А. Д., Колтик Е. Д., Левенгаген Н. Н., Калибратор фазы, «Новые измерительные приборы и методы их поверки», вып. 1, 1963.

**РАБОТЫ ВНИИМ ПО ВОСПРОИЗВЕДЕНИЮ МЕТРА  
В ДЛИНАХ СВЕТОВЫХ ВОЛН**

Д. И. Менделеев глубоко понимал роль точных измерений в процессе познания человеком окружающего мира. При установлении конкретных физико-химических закономерностей он постоянно сталкивался с необходимостью количественных оценок взаимодействующих в явлениях предметов или связей. «В природе мера и вес суть основные орудия познания», — говорил Д. И. Менделеев. Эти слова никогда не потеряют своей актуальности.

Чем больше накапливается человеческих знаний, тем большее значение приобретают «мера и вес» и тем больше требований предъявляют наука и техника к точности их определения.

Вместе с величайшими открытиями современности появились и новые отрасли измерений совершенно новых физических величин, использующие методы, находящиеся по своей точности на уровне значительно более высоком, чем это было до сих пор.

В основе новых отраслей измерений лежит прежде всего точное измерение длины и времени. Дать соответствующее заключение о характере вновь открытой элементарной частицы можно после измерения длины трека, оставленного частицей в ионизационной камере. Изготовить космический корабль в полном соответствии с расчетом можно лишь при очень высоких точностях обработки каждой детали, что обеспечивается только при строжайшем контроле формы, а следовательно, и линейных размеров деталей в процессе производства. Необходимость взаимозаменяемости деталей машин и точных механизмов при автоматизации производства также требует самого высокого уровня техники измерения длины и углов.

Существующие точности измерения длины уже не удовлетворяют современное производство. Пришло время принять новые принципы в определении единиц измерения и в выборе эталонов для их воспроизведения, а также использовать для этой цели атомные постоянные.

Переход к физической системе единиц, основанной на мировых постоянных, — это единственный путь для повышения точности воспроизведения и хранения единиц измерения. Время и длина являются основой всех современных систем единиц, поэтому наиболее развитыми оказались работы, имеющие своей целью выбор атомных постоянных, именно для определения единиц измерений этих величин. В октябре

1960 г. атомная постоянная — длина световой волны — выбрана как эталон единицы длины.

Мысль об использовании световой волны в качестве неизменного воспроизводимого эталона единицы длины впервые была высказана более 130 лет назад (в 1827 г.) Ж. Бабинне. Однако реальная возможность такого использования длины волны появилась лишь в 1887 г., когда Майкельсон впервые применил явление интерференции световых волн к измерениям длины. Эта работа явилась началом серьезных исследований вопроса определения единицы длины через световую волну.

Воспроизведением метра в длинах световых волн занимались крупные национальные метрологические институты всех стран, причем эта работа всегда шла в двух направлениях, которые отражены в работах ВНИИМ. Первое было связано с определением единицы, выбором эталонной длины световой волны, а следовательно, с исследованием излучения монохроматических источников света, созданием новых источников света, служащих для воспроизведения эталонных длин световых волн. Второе — с передачей значения нового эталона рабочим мерам, с созданием и исследованием приборов для измерений мер длины в длинах световых волн.

Развитие интерференционных методов измерения длины началось в первые годы после Великой Октябрьской революции в ГОИ и в Главной палате мер и весов по инициативе академиков Д. С. Рождественского и А. А. Лебедева.

Исторически сложилось так, что, начиная именно с 20-х годов нашего столетия, основными образцовыми и рабочими мерами в машино-, станко- и приборостроении служат концевые плоскопараллельные меры. Степень доверия к ним как точным мерам длины в промышленности очень высокая, поэтому точность контроля их должна также находиться на высоком уровне. Это заставило Палату мер и весов организовать проверку концевых мер длины с самой высокой для того времени достижимой степенью точности.

С 1925 г. в оптической лаборатории под руководством сначала В. Е. Мурашкинского, а затем М. Ф. Романовой начали осваивать интерференционные методы измерений концевых мер длиной до 100 мм. Одновременно готовился переход на новое определение метра. В 1928 г. В. Е. Мурашкинский [1] предложил провести именно в Палате мер и весов сравнения длины национального эталона метра № 28 с длиной волны красной линии кадмия, принятой тогда в качестве эталона-свидетеля метра. С этого момента исследования в области интерференционных измерений длины стали основной работой оптической лаборатории, созданной В. Е. Мурашкинским в 1922 г.

В 1935 г. под руководством В. Е. Мурашкинского была начата работа по сравнению метра № 28 с длиной световой волны красной линии естественного кадмия. В. Е. Мурашкинский [2] предлагал воспроизвести метод Сирса и Барелла. Однако это не было осуществлено.

В 1940 г. эту работу возглавила М. Ф. Романова, предложив для ее решения совершенно новый оригинальный способ.

Было проведено сравнение длины трубчатого одиометрового эталона Фабри и Перо, в котором помещалась плоскопараллельная концевая стальная мера, с длиной волны красной линии естественного кадмия только через один промежуточный трубчатый эталон длиной 111 мм. Длину последнего определяли непосредственно в длинах волн кадмия и криптона методом совпадения дробных частей порядков интерференции, затем сравнили эталоны друг с другом по наблюдению интерференционных полос в спектре по методу, предложенному А. А. Лебеде-

вым [3]. В этой схеме использовалось изменение давления в малом эталоне для получения малых изменений разностей хода.

Для измерения длины концевой меры в однометровом эталоне Фабри и Перо создали вакуум. Малые расстояния между плоскостями зеркал эталона и поверхностями меры домеряли по полосам равной толщины. Первая часть работы по измерению концевой меры в длинах световых волн была выполнена группой сотрудников оптической лаборатории под руководством М. Ф. Романовой [4, 5]; вторая — сравнение длины эталона № 28 с длиной концевой меры — в лаборатории эталонов длины В. А. Баринным и М. А. Афанасьевым [6].

Значение длины волны красной линии кадмия в нормальном воздухе было получено равным  $\lambda = 0,64384687 \cdot 10^{-6}$  м. Оно впоследствии вошло в вычисление среднего значения этой длины волны, принятого для определения метра до выбора новой первичной эталонной длины световой волны 1960 г. Результатом этой же работы явилась проверка сертификата метра № 28, а следовательно, и состояния эталонов мер длины во ВНИИМ.

К изучению монохроматических источников света с целью применения их излучения для измерений длины оптическая лаборатория приступила еще в 30-е годы. Уже тогда, пользуясь интерферометром Кёстерса, Г. В. Вардих и А. И. Карташев [7, 8] измерили и исследовали воспроизводимость с разностью хода длин волн видимого спектра естественного кадмия и криптона по наблюдению смещения интерференционных полос равного наклона при одновременном перемещении относительного зеркала интерферометра. Метод, который они разработали, применяется и в настоящее время в ФРГ при точных измерениях длин волн излучений одноизотопных источников света.

Одновременно в ХГИМИП был подробно исследован интерферометр Кёстерса [9] и установлены поправки на ширину щели этого прибора при измерении концевых мер.

С развитием крупного машиностроения в нашей стране необходимо было расширить пределы интерференционных измерений длины концевых мер. Эта задача была блестяще решена практически М. Ф. Романовой и А. И. Карташевым. Они предложили принцип построения новой оптической схемы интерференционного компаратора, основанной на соединении многолучевого интерференционного эталона Фабри и Перо длиной в 100 мм и двухлучевого интерферометра Кёстерса. Так была создана установка для измерения концевых мер длиной до 500 мм [10].

Особенно оригинальным в этой схеме является применение новой конструкции трубчатых эталонов Фабри и Перо, созданной в лаборатории. Такая конструкция гарантирует без дополнительных герметизированных камер малые изменения разности хода световых пучков в эталоне Фабри и Перо путем изменения в нем давления воздуха.

В настоящее время метод сканирования интерференционной картины изменением давления, получивший свое начало в оптической лаборатории ВНИИМ, широко применяется в интерференционной спектроскопии и спектрометрии [11, 12].

Принцип, положенный в основу интерференционного компаратора, с некоторыми конструктивными изменениями был использован при создании большого горизонтального интерферометра ВНИИМ, предназначенного для измерения концевых мер длиной до 1 м. В 1941 г. был изготовлен первый вариант этого прибора, разработанный Г. В. Варлихом, А. И. Карташевым и М. Ф. Романовой [13].

Измерение метровой концевой меры на большом горизонтальном интерферометре занимает всего несколько минут. Поэтому для про-

верки эталонного хозяйства ВНИИМ еще раз повторили сличение метра № 28 с длиной волны красной линии кадмия [14].

После этого большой горизонтальный интерферометр (БГИ) был усовершенствован. Вплоть до 1962 г. его использовали для аттестации мер 1-го разряда для всей системы Комитета стандартов, мер и измерительных приборов.

Для того чтобы обеспечить геодезическую службу жезлами, аттестованными с высокой степенью точности, по принципу БГИ в оптической лаборатории был создан универсальный интерферометр для измерения стальных плоскопараллельных концевых мер и геодезических жезлов до 1200 мм [15]. В 1960—1961 гг. была выпущена серия таких интерферометров.

Прибор для измерения концевых мер длиной до 1200 мм был удостоен диплома 1-й степени на Выставке достижений народного хозяйства 1957 г. Точность аттестации мер на этом приборе зависит от качества изготовления стальных и кварцевых трубчатых эталонов Фабри и Перо. Технология изготовления этих эталонов с высокой степенью параллельности (до 0,1 интерференционной полосы) и высоким качеством плоскости торцовых поверхностей была разработана в оптической лаборатории оптиком И. П. Владимировым и внедрена в производство в последние годы [16].

Интерференционные эталоны Фабри и Перо — это основные приборы высокой разрешающей силы, используемые не только при интерференционных измерениях длины, но и при исследованиях контуров спектральных линий для выяснения их метрологических качеств, а также и при измерениях длин волн.

Эталон Фабри и Перо в СССР не изготавливались промышленностью. Производство этих эталонов разных конструкций и разных толщин (от нескольких микрометров для проверки индикаторов до 1 м — для проведения исследований в области интерференционной спектроскопии при больших разностях хода) было освоено сначала в оптической лаборатории, а затем на заводе «Эталон».

Видимость интерференции при больших разностях хода и точность воспроизведения длины волны ограничиваются шириной и строением контура спектральной линии.

Можно воспроизвести узкий симметричный контур и найти его максимум для простой линии значительно точнее, чем определить центр тяжести сложного контура линии со сверхтонкой структурой, положение которого зависит от разности хода световых пучков в интерферометре. Чем больше разность хода, при которой можно наблюдать интерференцию, тем точнее интерференционные измерения больших мер.

В 1941 г. с целью повышения точности интерференционных измерений были начаты работы по получению узких простых спектральных линий. Для этого использовали оптическое фильтрование. В оптической лаборатории удалось создать специальный интерференционный монохроматор, представляющий собой эталон Фабри и Перо, интерференционные порядки в котором сканируются либо изменением давления воздуха в эталоне, либо изменением его температуры [17, 18]. В фокальной плоскости объектива, проектирующего интерференционные кольца, помещается круглая диафрагма. Изменяя разность хода в эталоне так, чтобы в центре был максимум только для одной из разрешенных эталоном составляющих сверхтонкой структуры монохроматизируемой спектральной линии, можно диафрагмой выделить излучение, представляющее собой простую спектральную линию. Схема интерференционного монохроматора до последнего времени применялась главным образом

для фотоэлектрической записи контуров спектральных линий, теперь же ее используют для получения узких линий с шириной, значительно меньше доплеровской.

После IX Генеральной конференции по мерам и весам, учредившей новый Консультативный комитет по определению метра, в оптической лаборатории значительно расширились работы по исследованию строго монохроматических источников света. К этому времени в результате успехов ядерной физики уже были получены четно-четные элементы ртути в США, криптона — в ФРГ и кадмия — в СССР.

К первой сессии Консультативного комитета по определению метра (1953 г.) была выполнена большая работа [19] по изучению четно-четных стабильных изотопов кадмия ( $Cd^{112}$ ,  $Cd^{114}$ ,  $Cd^{116}$ ). Это позволило предложить на рассмотрение сессии красную линию  $Cd^{114}$  в качестве эталонной длины световой волны вместе с зеленой линией  $Hg^{198}$ , предложенной США, и желто-зеленой линией  $Kr^{86}$ , предложенной ФРГ.

В оптической лаборатории были изготовлены безэлектродные лампы, заполненные изотопами кадмия с дополнительным подогревом и без него со специальной теплоизолирующей рубашкой [20]. Были сравнены длины волн видимой области спектра трех изотопов с длиной волны красной линии естественного кадмия в лампе Майкельсона [21, 22]. В связи с тем, что наиболее высокий процент обогащения может быть получен для образцов  $Cd^{114}$ , именно его излучение изучали наиболее тщательно с точки зрения воспроизводимости длины волны при различных разностях хода. С этой целью в лаборатории была создана установка для сравнения длин волн различных источников света.

Известно, что первая сессия Консультативного комитета по метру не нашла возможным остановить свой выбор ни на одном из трех предложенных излучений. В рекомендациях были лишь точно сформулированы требования к будущему эталону единицы длины.

Световое излучение, длину волны которого будет определять метр, должно распространяться в вакууме при состоянии покоя как излучателя, так и наблюдателя. Это излучение должно быть определено двумя спектральными термами атома, спектр которого не имеет сверхтонкой структуры и уровни энергии не подвержены никаким внешним возмущающим воздействиям.

Было также решено, что для установления значения новой первичной эталонной длины волны следует сравнивать ее с красной линией кадмия, длина волны которой в воздухе утверждена на УП Генеральной конференции. Поэтому встал вопрос о дисперсионных формулах для приведения исходной длины волны к вакууму.

В оптической лаборатории была выполнена работа по определению дисперсии воздуха и проверке дисперсионных формул методом непосредственного наблюдения интерференционных полос равного хроматического порядка [23].

В итоге стало ясно, что ни одна из дисперсионных формул не дает достаточно удовлетворительных результатов и что необходимо экспериментально определять показатель преломления при измерениях длины, чтобы реализовать наиболее высокую точность нового определения эталона единицы длины.

В соответствии с требованиями к эталонной длине волны, выдвинутыми рекомендацией Консультативного комитета по определению метра, в оптической лаборатории ВНИИМ были начаты работы по изучению условий возбуждения спектров изотопов  $Cd^{114}$ . Выяснена зависимость смещений длины волны красной линии  $Cd^{114}$  от давления аргона в лампах, возбуждаемых высокой частотой [24], и от изотопического

состава образца [25]. Одновременно с исследованиями излучения  $Cd^{114}$  изучали и излучения других четно-четных изотопов, в частности стабильного изотопа  $Pb^{206}$ . Была также проведена большая работа по исследованию инфракрасных линий  $Kr^{86}$  [26, 27], в результате которой был разработан объективный метод измерения дробных частей порядков интерференции при фотозлектрической регистрации [28]. Метод введен в практику поверки мер 1-го разряда на БГИ оптической лаборатории. Были спроектированы и изготовлены стационарные установки для фотозлектрической регистрации колец равного наклона к пяти интерферометрам для измерения концевых мер длиной до 1200 м.м [29].

В октябре 1957 г. состоялась вторая сессия Консультативного комитета по определению метра. К этому времени в СССР фактически перешли на определение метра через длину световой волны красной линии естественного кадмия. ВНИИМ имел уже большой опыт по интерференционным измерениям длины. Вообще выбор эталонной длины волны из излучений трех четно-четных изотопов, в равной мере имеющих свои преимущества и недостатки, для ВНИИМ никогда не являлся принципиальным вопросом. Важно было перейти на новое определение метра и отказаться от искусственного эталона.

Уже тогда было ясно, что необходимо не только выбрать первичную эталонную длину световой волны, но и установить вспомогательные длины волн для интерференционных измерений — вторичные эталонные длины волн, по своей точности не уступающие первичной эталонной длине волны [30].

После этой сессии стало известно, что переход будет совершен, и метр получит единственное определение через длину световой волны оранжевого излучения  $Kr^{86}$ . Это излучение выбрали именно потому, что для него было легче всего составить спецификацию условий возбуждения, обеспечивающую воспроизводимость длины волны с весьма высокой степенью точности  $1 \cdot 10^{-8}$ .

В оптической лаборатории ВНИИМ была воспроизведена лампа Энгельгарта, рекомендованная Международным комитетом по мерам и весам для воспроизведения первичной эталонной длины волны.

В соответствии со спецификацией и учетом недостатков лампы Энгельгарта, выясненных при ее исследовании, были составлены технические условия лампы новой конструкции. На их основании по проекту Г. С. Попова была изготовлена лампа с  $Kr^{86}$ , отличающаяся от лампы Энгельгарта тем, что в ней предусмотрена возможность освещения интерферометра через плоские смотровые окна так, чтобы на пути светового пучка не было ни жидкого, ни твердого азота [31]. Эта лампа была тщательно изучена и на третьей сессии Консультативного комитета в октябре 1962 г. получила положительную оценку.

Кроме исследований источников света с  $Kr^{86}$ , в лаборатории оптических измерений продолжались работы по усовершенствованию и изучению источников с  $Cd^{114}$  [39] и с полученной к этому времени отечественной  $Hg^{198}$ .

На основании проведенных работ ВНИИМ внес предложение на XI Генеральной конференции по мерам и весам о выборе и утверждении вторичных эталонов длин волн. Это предложение было принято единогласно.

В соответствии с этим была проведена большая работа по измерению длин волн в вакууме линий  $Hg^{198}$ ,  $Cd^{114}$  и  $Kr^{86}$  в различных источниках света [33]. Полученные значения длин волн вошли в средние значения вторичных эталонных длин волн, рекомендованные на сессии Консультативного комитета по определению метра.

Резолюцией XI Генеральной конференции было также рекомендовано проведение дальнейших работ по уточнению нового эталона. Поэтому в оптической лаборатории ВНИИМ продолжают работы, имеющие своей целью получение узких спектральных линий для расширения пределов и повышения точности интерференционных измерений. Была исследована возможность сужения линий с использованием частичного поглощения света и разработана методика по использованию линии поглощения при интерференционных измерениях длины путем применения оптикоэлектронной компенсационной схемы с интерферометром Д. С. Рождественского [34]. Получен также оптический фильтр, представляющий собой подобие атомной щели между двумя линиями поглощения йода [35]. С помощью такого фильтра удалось сузить зеленую линию ртути почти в два раза и наблюдать с нею интерференцию при разности хода, превышающей 700 м. Переход к линиям поглощения особенно желателен потому, что можно выполнить требования Консультативного комитета по определению метра, касающиеся дополнительных внешних возмущений уровней энергии.

К этим же работам следует отнести и сужение линий с помощью интерференционной монохроматизации. В новом интерференционном монохроматоре, созданном в лаборатории, дисперсионная система представляет собой уже не плоский, а сферический эталон Фабри и Перо [36]. Применение сферического эталона позволило повысить светосилу прибора и использовать его для получения линий с шириной порядка  $0,5-0,2 \text{ м}^{-1}$ . Для монохроматизации различных линий в зависимости от их ширины подбирается определенный радиус сферических зеркал эталона. В монохроматизированных спектральных линиях можно наблюдать интерференцию при разности хода, превышающей 2 м [37]. Однако это еще не значит измерить длину меры. Для этой цели важно было решить задачу одновременного определения порядка интерференции, соответствующего измеряемой мере, и положения полосы пропускания интерференционного монохроматора в пределах ширины линии [38]. Это удалось осуществить в схеме БГИ, установив сферический эталон так, чтобы можно было с его помощью одновременно наблюдать интерференцию при большой разности хода и записывать контур линии источника. В момент, когда интерференционная картина соответствует целым порядкам интерференции, для измеряемой меры на регнограммах делается отметка, по которой затем определяется дробная часть.

Таким образом, лаборатория располагает в настоящий момент для измерения концевых мер в 1 м абсолютным интерференционным методом, обеспечивающим измерение с погрешностью, не превышающей  $1 \cdot 10^{-7}$ .

В оптической лаборатории создан интерферометр для измерения мер длиной до 100 м с повышенной точностью, в котором измерение смещения интерференционных полос сводится к измерению разности фаз поляризованных лучей [39].

Для сравнительных измерений плоскопараллельных концевых мер от 200 до 1000 м создан относительный интерферометр, позволяющий сравнивать две горизонтально расположенные меры без контакта и прилегания к ним пластин. В приборе можно наблюдать интерференционные полосы равной толщины по всей рабочей поверхности мер и тем самым контролировать отклонения их от плоскостности и плоскопараллельности, причем средняя квадратичная погрешность измерения составляет  $\pm 0,17 \text{ мк}$  на 1 м [40, 41]. Этот прибор удостоен большой

серебряной медали на Выставке достижений народного хозяйства в 1962 г.

С 1949 г. лаборатория эталонов длины ведет работы по созданию интерферометра для измерения штриховых метровых мер в длинах световых волн [42]. Универсальный интерференционный компаратор (УИК) основан на схеме интерферометра Майкельсона. Однако он отличается от всех зарубежных приборов, основанных на схеме Майкельсона, тем, что подвижным в нем является не каретка с мерой, а микроскоп, с которым связано подвижное зеркало интерферометра. Передвигая микроскоп, можно осуществить поперечное компарирование и значительно сократить габариты прибора, если исключены ошибки, связанные с изменением положения микроскопа при движении. В приборе лаборатории эталонов длины ВНИИМ блестяще решена эта задача: микроскоп связан со специальной интерференционной корректирующей установкой [43], в которой по смещению ахроматической полосы при наблюдении интерференции в белом свете можно заметить малейшие отклонения зеркала от заданного направления при его движении. Прибор снабжен фотоэлектрическим микроскопом для наводки на штрих меры. На нем были проведены сличения штриховых мер друг с другом, сравнение штриховых мер с концевыми и предполагается осуществить абсолютное измерение метра в длинах световых волн оранжевого излучения  $Kr^{86}$  в два приема. На компараторе можно измерять в длинах световых волн отдельные подразделения метровых шкал.

В лаборатории эталонов длины разрабатывается также прибор для эталонирования шкал до 200 мм в длинах световых волн с фотоэлектрическим счетом интерференционных полос [44] и создан интерференционный компаратор И. К. для измерения геодезических проволок в длинах волн [45]. В основе прибора лежит сравнение умноженной  $m$  раз длины проволоки с известной длиной кварцевого жезла (1000 или 1200 мм). Длина умножается путем многократных отражений от зеркал жезла и вспомогательного зеркала. Наблюдая интерференционные полосы в белом свете, можно сравнить длину хода светового пучка, многократно отраженного от зеркал жезла и вспомогательного зеркала с длиной хода светового пучка, отраженного от вспомогательного зеркала и зеркала, удаленного на расстояние, соответствующее длине измеряемой проволоки.

С помощью отсчетных микроскопов сравниваются длины проволоки с расстоянием между зеркалами И. К.

В заключение необходимо отметить, что к моменту принятия нового определения метра во ВНИИМ была проведена очень большая работа как по созданию и исследованию источников света для воспроизведения первичной и вторичной эталонных длин волн, так и по созданию интерферометров для измерения концевых и штриховых мер. В настоящее время имеются все необходимые предпосылки для реализации высокой точности нового эталона единицы длины.

Внедрение в жизнь этих точностей является ближайшей задачей, решение которой осуществляется в верхнем звене поверочной схемы путем создания эталонных установок для измерения длин волн и измерения штриховых эталонов в длинах световых волн.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мурашкинский В. Е., «Природа», № 10, 1929, стр. 15.
2. Мурашкинский В. Е., Сборник работ комиссии по единицам мер, АН СССР, 1938, стр. 57.
3. Лебедев А. А., Сборник работ комиссии по единицам мер, АН СССР, 1938, стр. 37.

4. Романова М. Ф., Варлих Г. В., Карташев А. И. и Батарчукова Н. Р., ДАН СССР, т. XXXVII, № 2, 1954, стр. 54.
5. Романова М. Ф., Варлих Г. В., Карташев А. И. и Батарчукова Н. Р., Труды ВНИИМ, вып. 4(49), 1941, стр. 3.
6. Барinov В. А., Современное состояние эталонов длины и методы точного измерения длины, Стандартгиз, 1941.
7. Варлих Г. В. и Карташев А. И., Труды ВНИИМ, вып. 4(49), 1941.
8. Варлих Г. В. и Карташев А. И., «Оптико-механическая промышленность», № 5, 1938, стр. 3.
9. Дыбский Р. В., Сборник работ по измерительной технике, ОНТИ, Харьков, 1936.
10. Романова М. Ф. и Карташев А. И., «Оптико-механическая промышленность», № 7—8, 1939, стр. 8.
11. Jasnigot J., Opt. Soc. Amer., v. 44, 1954, p. 761.
12. Калитеевский П. И. и Чайка М. П., Вестник ЛГУ, сер. физ. и хим., вып. 1, 1956, стр. 9.
13. Романова М. Ф., Карташев А. И., Труды ВНИИМ, вып. 7(67), 1949, стр. 23.
14. Романова М. Ф., Волкова Е. А. и Каяк Л. К., Труды ВНИИМ, вып. 16(76), 1951, стр. 4.
15. Волкова Е. А., Карташев А. И., Романова М. Ф., Степанов В. С., Труды ВНИИМ, вып. 26(86), 1955, стр. 43.
16. Батарчукова Н. Р., Владимиров И. П., Труды ВНИИМ, вып. 26(86), 1955, стр. 66.
17. Батарчукова Н. Р., ДАН СССР, т. XIII, вып. 6, 1947, стр. 1013.
18. Батарчукова Н. Р., Труды ВНИИМ, вып. 7(67), 1949, стр. 30.
19. Батарчукова Н. Р., Карташев А. И. и Романова М. Ф., ДАН СССР, т. XC, № 2, 1953, стр. 153.
20. Батарчукова Н. Р., УФН, т. VI, вып. 2, 1955, стр. 265.
21. Батарчукова Н. Р., Карташев А. И. и Романова М. Ф., Труды ВНИИМ, вып. 26(86), 1955, стр. 5.
22. Батарчукова Н. Р., Карташев А. И. и Романова М. Ф., Измерение длины волны излучения  $Cd^{114}$  в видимой области спектра, Машгиз, 1954.
23. Коронкевич В. П., «Оптика и спектроскопия», т. I, вып. 1, 1956, стр. 85.
24. Батарчукова Н. Р. и Дубровский Г. Б., «Оптика и спектроскопия», т. I, вып. 3, 1956, стр. 330.
25. Батарчукова Н. Р., Вестник ЛГУ, сер. физ. и хим., № 16, вып. 3, 1959, стр. 10.
26. Ефремов Ю. П., Труды ВНИИМ, вып. 40 (100), 1959, стр. 16.
27. Ефремов Ю. П., «Измерительная техника», № 10, 1959.
28. Ефремов Ю. П., «Измерительная техника», № 12, 1958.
29. Батарчукова Н. Р., Ефремов Ю. П., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 56(116), 1961, стр. 15.
30. Батарчукова Н. Р., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 47(107), 1961, стр. 5.
31. Батарчукова Н. Р., Ефремов Ю. П., Попов Г. С., «Измерительная техника», № 8, 1962, стр. 6.
32. Батарчукова Н. Р., «Измерительная техника», № 6, 1956, стр. 26.
33. Bataritchoukova N. R., Kartachev A. J. et Efreimov S. R., d. XI Conf. Gen. des Poids et Mes., 1960, Annex, 3.
34. Батарчукова Н. Р., Карташев А. И. и Кириченко А. П., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 56(116), 1961, стр. 5.
35. Батарчукова Н. Р., Карташев А. И., Кириченко А. П., «Оптика и спектроскопия», т. 12, вып. 3, 1962, стр. 424.
36. Батарчукова Н. Р., Кириченко А. П., «Измерительная техника», № 8, 1962, стр. 11.
37. Батарчукова Н. Р., Карташев А. И., Кириченко А. П., «Оптика и спектроскопия», т. 14, вып. 2, 1963, стр. 304.

38. Карташев А. И., Кириченко А. П., «Измерительная техника», № 8, 1962, стр. 9.
39. Волкова Е. А., Рефераты научно-исследовательских работ институтов Комитета стандартов, сб. № 3, реферат № 236.
40. Карташев А. И., Труды ВНИИМ, вып. 4(49), 1941, стр. 23.
41. Карташев А. И., Коронкевич В. П., «Измерительная техника», № 5, 1957, стр. 9.
42. Бржезинский М. Л., Труды ВНИИМ, вып. 26(86), 1955, стр. 37.
43. Бржезинский М. Л., «Измерительная техника», № 2, 1963, стр. 16.
44. Трофимова Н. В., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 47(107), 1961, стр. 113.
45. Каак Л. К., Торопин Е. И., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 47(107), 1961, стр. 92.

РАЗВИТИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ  
ТЕМПЕРАТУРНОЙ ШКАЛЫ

## 1

Экспериментальным работам Главной палаты мер и весов в области температурной метрологии предшествовали глубокие теоретические исследования принципов построения температурных шкал, выполненные Д. И. Менделеевым.

Еще в 1873—1875 гг. Д. И. Менделеев опубликовал ряд крупных теоретических работ [1, 2, 3], имеющих прямое отношение к мало разработанным в то время вопросам о теории и методах осуществления термодинамической температурной шкалы. Основное содержание этих теоретических работ, анализу которых посвящена статья Б. И. Пилипчука [4], сводится к следующему.

Д. И. Менделеев развил и конкретизировал закон Бойля-Мариотта об основном соотношении состояния идеального газа и научно обосновал его значение для температурной шкалы, а также развил высказанную ранее В. Кельвином [5] мысль о термодинамической шкале с одной опорной точкой. При этом он убедительно показал метрологические преимущества такой шкалы и ее значение для точных температурных измерений.

Д. И. Менделеев, по-видимому, впервые, во всяком случае, намного раньше Камерлинг Оннеса [6, 7], раньше работ Ван-дер-Ваальса [8] предложил формулу поправок к закону идеального газа в том виде, как она применяется в газовой термометрии до сих пор.

Первые экспериментальные работы по осуществлению температурной шкалы были поставлены в Главной палате мер и весов в начале 90-х годов прошлого столетия. Д. И. Менделеев был инициатором постановки этих работ, их активным участником и в значительной мере руководителем.

В работах Н. Г. Егорова [9] и Н. Н. Георгиевского [10], опубликованных в 1895 г. и посвященных обзору состояния термометрии, исследованиям образцовых ртутно-стеклянных термометров и отчасти перспективам дальнейших работ Главной палаты в области термометрии, упоминается о начатой подготовке к созданию водородного газового термометра. В предисловии к этим работам, написанном Д. И. Менделеевым, указывается, что температурные измерения относятся к области метрологии, имеют широкое значение и поэтому являются «предметом занятия» Главной палаты. Там же указано, что «при измерениях других

метрологических данных неизбежно должны производиться точные температурные определения».

В 1899 г. была опубликована работа И. А. Лебедева [11] о создании и исследовании первого в России газового термометра. Это был водородный термометр постоянного объема с резервуаром из стекла «vette dig» и ртутным манометром с катетометрическим отсчетом высоты ртутного столба. Термометр применялся в диапазоне температур 0—100°С для определения отклонений показаний образцовых ртутных термометров от показаний «нормального» водородного термометра. Шкала такого термометра была принята в качестве исходной («нормальной») Международным комитетом мер и весов в 1887 г.

С этим газовым термометром была достигнута довольно высокая точность — порядка  $\pm 0,005$  град в диапазоне 0—30°С, необходимым для обеспечения точности метрологических исследований Главной палаты мер и весов.

В этой работе И. А. Лебедева, как и в упомянутых выше работах И. Г. Егорова и Н. Н. Георгиевского, содержатся многочисленные указания о том, что в обсуждении основных конкретных методических вопросов принимал активное участие Д. И. Менделеев и многие такие вопросы решались непосредственно им.

Таким образом, Д. И. Менделеев является одним из ведущих основателей температурной метрологии, основателем отечественной тепловой метрологии и ее руководителем в период становления.

## II

Температурная метрология тесно связана с проблемой шкалы, возникающей и в некоторых других областях метрологии; однако эта проблема нигде не стоит так остро, как в области температурных измерений.

В метрологической литературе, как правило, нет четких определений причин возникновения проблемы шкалы в отдельных областях измерений и особенностей практической метрологии и измерительной техники, связанных с этой проблемой. Эта нечеткость в некоторых случаях приводит к недоразумениям, к отсутствию взаимопонимания, а иногда к грубо ошибочным практическим выводам. Поэтому возникает необходимость четкого определения понятия «шкала измеряемой величины», границ применения этого термина и общих практических выводов, связанных с этим вопросом.

Вопрос о шкале измеряемой величины в метрологическом смысле неотделим от выбора системы численных значений, приписываемых этой величине. Проблема шкалы всегда связана с возможностью выбора численных значений измеряемой величины по произвольному закону. Где нет произвольности шкалы, там проблема ее вообще не возникает и термин «шкала» не нужен, не должен применяться и обычно не применяется. Очевидно, что возникновение проблемы шкалы не связано ни с трудностью создания эталонов, ни с точностью измерения, ни с какими-либо другими затруднениями, всегда имеющими место в той или иной степени при всех метрологических работах, но не вызывающими произвольности выбора численных значений измеряемой величины.

Произвольность шкалы, а следовательно, и сама проблема шкалы возникает только в тех случаях, когда измеряемая величина не поддается сложению при метрологическом эксперименте. Такая «неаддитивность» некоторых физических величин является, на наш взгляд, основной причиной возникновения проблемы шкалы.

Так, например, температуры не складываются в эксперименте. Имея два водяных кипятильника, реализующих температуру, равную  $100^{\circ}\text{C}$ , нельзя сложить эти две температуры и получить новую температуру, равную  $200^{\circ}\text{C}$  или какой-либо другой величине; это противоречило бы второму началу термодинамики. Вопрос о том, какой температуре приписать значение  $200^{\circ}\text{C}$ , не решается путем сложения. Температуры принципиально не поддаются сложению при метрологическом эксперименте.

Точно так же, имея две образцовые меры твердости, обладающие, например, одинаковой твердостью, нельзя эти твердости экспериментально сложить и получить удвоенную твердость. То же относится и к сложению не равных между собой твердостей или температур.

Таким образом рассматриваемое свойство некоторых физических величин — невозможность их сложения при метрологическом эксперименте — приводит к произвольности выбора как численных значений, так и шкалы измеряемой величины и является первым, основным условием возникновения проблемы шкалы.

Однако это условие не является единственным. Не поддаются сложению при метрологическом эксперименте также многие величины, которые принято называть «удельными» или «плотностями распределения», и некоторые относительные величины. Сюда относятся, например, давление жидкости или газа, удельная теплоемкость, удельное электрическое сопротивление, оптический коэффициент пропускания и многие другие. Однако проблема шкалы измерения этих величин полностью устраняется тем обстоятельством, что само определение понятия каждой такой величины обязательно (неизбежно) позволяет совершенно однозначно установить для нее производную единицу, основанную на других, четко выбранных единицах измерения. Так, например, давление по определению представляет собой силу, действующую на единицу площади поверхности (плотность поверхностного распределения силы). Так как для измерения силы и площади существуют четко установленные единицы, то произвольность выбора численных значений измеряемого давления полностью устраняется. То же относится ко всем перечисленным и родственным им величинам.

Подчеркнем, что рассматриваемое условие заключается не в самой возможности выбора производной единицы (такая возможность существует всегда), а именно в однозначности этого выбора.

Таким образом, отсутствие однозначности в установлении производной единицы измеряемой величины является вторым непеременимым условием возникновения проблемы шкалы.

Так как два указанных свойства — невозможность как сложения при метрологическом эксперименте, так и однозначного установления производной единицы — являются наиболее характерными свойствами измеряемой величины с точки зрения проблемы шкалы, то представляется целесообразным сформулировать определение понятия «шкала измеряемой величины» с указанием на эти свойства. Тогда формулировка этого понятия получает, например, такой вид:

«Шкала измеряемой величины — это система выбора численных значений, устанавливаемая произвольным, но четко определенным способом для измерения величины, не поддающейся сложению при метрологическом эксперименте, если определение этой величины не позволяет однозначно установить для нее производную единицу».

Интересным примером произвольных шкал являются шкалы спектра периодического пространственного поля, например, спектра теплового излучения. В спектрометрии применяется две шкалы спектра: шкала

частот и шкала длин волн. Спектр как физическая характеристика переменного поля обладает обоими указанными выше свойствами, вызывающими произвольность шкалы, чем и объясняется применение двух шкал спектра.

Наличие некоторых недоразумений, связанных с произвольностью шкалы спектра, отмечалось в литературе. Спектральное распределение энергии излучения можно численно выразить двояко: либо величиной  $dE/d\lambda$  — производной энергии излучения по длине волны, либо величиной  $dE/d\nu$  — производной по частоте. Эти две характеристики связаны между собой однозначно:

$$\frac{dE}{d\lambda} = \frac{dE}{d\nu} \cdot \frac{d\nu}{d\lambda} = -\frac{\nu^2}{c} \cdot \frac{dE}{d\nu}$$

где  $c$  — скорость распространения волн.

Так как в этом выражении численное значение коэффициента пропорциональности между двумя производными зависит от спектра (частоты), то кривые спектрального распределения энергии, рассчитанные по двум шкалам спектра, имеют различный вид. Так например, максимум энергии солнечного излучения, рассчитанный по шкале длин волн (максимум величины  $dE/d\lambda$ ), расположен в видимой части спектра (зеленые лучи), в то время как максимум этого же излучения, выраженный по шкале частот (максимум величины  $dE/d\nu$ ), оказывается расположенным в ближней инфракрасной части спектра. Следует считать, очевидно, что расположение максимума излучения в спектре является в известной мере математической абстракцией, так как для его вычисления приходится рассчитывать производную по спектру, выражаемому произвольной шкалой. Точно так же весьма условное значение имеют некоторые другие понятия, применяемые в оптике и термометрии и связанные с выбором шкалы спектра, например «равноэнергетический спектр».

Нedorазумения, возникающие из-за произвольности шкалы твердости, общеизвестны. Они связаны в первую очередь со стремлением «открыть» универсальную связь между значениями твердости по различным шкалам.

Особым свойством всех произвольных шкал является физическая несравнимость интервалов изменения измеряемой величины, выбранных в различных областях шкалы. Это свойство тесно связано с неаддитивностью рассматриваемых физических величин. Так, например, спектральные интервалы, равные между собой по шкале частот и выбранные в различных областях спектра, оказываются неравными между собой, если их выразить по шкале длин волн. Точно так же, температурный интервал, расположенный вблизи абсолютного нуля и равный 1 град, охватывает огромную область изменений физических свойств и энергетических состояний вещества: в то же время при температуре порядка 10 000° К интервал в 1 град не означает сколько-нибудь ощутимого изменения состояния вещества, особенно если учесть статистический характер распределения частиц по уровням энергии. Естественно, что точно так же физически несравнимы между собой величины погрешностей измерения температуры в разных областях температурной шкалы.

Нedorазумения, связанные с произвольностью температурной шкалы, в настоящее время в значительной мере устранены в связи с большим объемом теоретических и экспериментальных работ, выполненных в разное время в различных странах и относящихся к исследованию темпе-

ратурных шкал. В результате этих работ современные температурные шкалы по своей научной стройности превосходят шкалы твердости, но уступают, например, шкалам спектра. Эти же работы убедительно показывают, что для обеспечения точности температурных измерений, требуемой современной практикой, необходимы метрологические исследования как термодинамической температурной, так и Международной практической (МПТШ) шкалы.

### III

Расхождения МПТШ с термодинамической шкалой приводят к систематической погрешности измерений, одинаковой для термометров любых типов, но разной в различных областях температурной шкалы. Эта погрешность не имеет никакого значения в тех случаях, когда контролируемый температурный режим установлен или уточнен эмпирически, что обычно имеет место при промышленных измерениях температуры: в этом случае пригодна любая условная, но точно воспроизводимая температурная шкала. Иначе обстоит дело в экспериментально-исследовательских работах при измерениях температуры, связанных с физическими закономерностями, при исследовании температурной зависимости физических явлений; здесь результат измерения принципиально должен быть выражен в градусах термодинамической температурной шкалы, так как физические законы связаны только с термодинамической температурой. В этих случаях пределом точности измерения температуры является та точность, с которой градуировка применяемого термометра совпадает с термодинамической температурной шкалой. При этом крайним, физическим пределом точности служит точность экспериментального осуществления этой шкалы.

Таким образом, в связи с требованиями повышения точности измерения температуры при научных исследованиях возникают две метрологические задачи, касающиеся температурных шкал:

1) повышение точности экспериментального осуществления термодинамической температурной шкалы;

2) по результатам исследования термодинамической шкалы корректировка практической температурной шкалы.

При появлении новых исследовательских работ, превосходящих по научному уровню предшествующие и потому повышающих уровень метрологической точности, с которой осуществляются температурные шкалы, выявляются расхождения между термодинамической шкалой и МПТШ. В принципе эти расхождения можно устранить, внося соответствующие коррективы в положение о МПТШ. Однако нецелесообразно устранять их сразу по мере обнаружения. Причина этого заключается не только в том, что частые изменения МПТШ затрудняли бы градуировку измерительных приборов. Устранение обнаруживаемых расхождений между шкалами усложняется необходимостью соблюдать единство практической температурной шкалы, отдельные участки которой тесно связаны между собой. Нельзя изменять численные значения температур в отдельных точках шкалы, не согласуя эти изменения с другими ее участками. Если, например, изменить значение одной реперной точки, сохранив для остальных прежние значения и оставив без изменения методы интерполяции температур между реперными точками, то градуировочные кривые эталонных и других измерительных приборов получат совершенно недопустимые изломы в месте стыков независимо интерполируемых участков шкалы. Кроме того, можно легко показать на основе теории функций влияния, разработанной Б. И. Пи-

липчуком [12], что при уточнении значения одной реперной точки, расхождения между шкалами в промежутках между реперными точками, как правило, увеличиваются.

По указанным соображениям температурную шкалу следует рассматривать как единую стройную систему, отдельные участки которой нельзя изменять независимо. Следовательно, уточняться могут не отдельные точки шкалы, а, по крайней мере, отдельные области, причем должны быть согласованы между собой все изменения, должен быть обеспечен плавный переход от уточняемого участка к неизменяемому и не должно быть изломов интерполяционных кривых и роста расхождений в промежутках между реперными точками. Так, например, хотя к 1960 г. в ряде стран (СССР, ФРГ, Япония) были выполнены с помощью газовых термометров новые точные измерения термодинамической температуры затвердевания золота [13—16] и результаты показали необходимость корректировки МПТШ, но эти результаты не дали возможности сформулировать какие-либо конкретные предложения: получился бы разрыв с остальными неисправленными участками шкалы. По этим же соображениям группой газовой термометрии ВНИИМ с самого начала был взят курс на разработку газового термометра, способного обеспечить высокую точность в широком диапазоне температур. Только после выполнения с помощью нового газового термометра исследований термодинамической шкалы в области от точки олова  $231,94^{\circ}\text{C}$  (терм.) до точки золота  $1064,4^{\circ}\text{C}$  (терм.), с опорой на тройную точку воды, появилась возможность представить конкретные рекомендации об уточнении МПТШ во всей области температур выше  $0^{\circ}\text{C}$ . Такие рекомендации были составлены и доложены советской делегацией на 6 сессии Консультативного комитета по термометрии в 1962 г.

В таблице приведены результаты измерений термодинамической температуры реперных точек, рассмотрение которых позволило составить эти рекомендации.

Температура $^{\circ}\text{C}$ (межд.)	Температура $^{\circ}\text{C}$ (терм.) по данным			
	Ойши и др. (Япония)	Мозер и др. (ФРГ)	ВНИИМ, газовый, термометр	
			№ 1	№ 3
231,91	—	—	—	$231,94 \pm 0,01$
321,03	—	—	—	$321,11 \pm 0,02$
419,505	—	$419,58 \pm 0,02$	—	$419,57 \pm 0,02$
630,48	—	630,65	—	—
778,3	—	779,1 <sub>1</sub>	—	—
960,8	$961,2_4 \pm 0,05$	961,9 <sub>1</sub>	—	—
1063,0	$1063,6_0 \pm 0,05$	$1064,4_8 \pm 0,1$	$1064,5_4 \pm 0,2$	$1064,2_0 \pm 0,2$

Погрешности даны в таблице по оценкам авторов работ.

Положение, подобное указанному выше, возникло и в области низких температур. Применение температурной шкалы, построенной во ВНИИФТРИ в области от  $90^{\circ}\text{K}$  и ниже, при градуировке термометров сопротивления приводит к излому градуировочной кривой (разрыв первой производной) в точке кислорода, т. е. в точке сопряжения с МПТШ. Для устранения этого излома необходимо расширить фронт работ, поставив новые исследования термодинамической шкалы от точки кислорода и выше, что и намечено выполнить во ВНИИМ.

Таким образом, в силу объективно действующего закона единства температурной шкалы для целеустремленности температурной метрологии исследования необходимо проводить комплексно, в большом температурном диапазоне.

В настоящее время во ВНИИМ в основном закончены новые измерения термодинамической температуры затвердевания золота, выполненные с газовым термометром № 3. Резервуар термометра, так же как при измерении в других реперных точках, погружался в тигель с чистым золотом. Предварительное значение измеряемой температуры на 0,15 град выше полученного ранее с газовым термометром № 3 и близко к значению, полученному с газовым термометром № 1 в 1959 г.

В лаборатории линейных и угловых измерений ВНИИМ создан абсолютный интерференционный dilatометр, с помощью которого выполнены ориентировочные измерения коэффициентов теплового расширения материалов резервуаров всех газовых термометров ВНИИМ [17]. Для повышения точности результатов намечено провести с помощью этого dilatометра дополнительные измерения. Для измерения термодинамических температур во ВНИИМ разработана новая аппаратура [18—20]: 1) газовый термометр, работающий по методу двух резервуаров; 2) импульсный термостативный термометр; 3) электроакустический газовый термометр и 4) ядерный квадрупольный термометр. Применение этих новых приборов для исследования термодинамической температурной шкалы имеет большие перспективы, так как при абсолютных измерениях только применение принципиально различных методов позволяет надежно исключить систематические погрешности, присущие каждому методу. Кроме того, точность новых приборов приближается к точности применяемых, а использование новых научно-технических средств открывает пути неограниченного повышения точности и расширения пределов измерения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Менделеев Д. И., ЖРФХО, часть хим., т. VI, отд. 7, вып. 1, 1874.
2. Менделеев Д. И., ЖРФХО, часть физ., т. VI, отд. 1, вып. 1, 1874.
3. Менделеев Д. И., Об упругости газов, СПб, 1875.
4. Пилипчук Б. И., Труды ВНИИМ, вып. 25(85), 1955, стр. 5.
5. Kelvin W., Phil. Mag., (3), 33, 313, 1848.
6. Kamerlingh Onnes H., Commun. Leiden, № 71, 1901.
7. Kamerlingh Onnes H., Zakrzewsky C., Commun. Leiden, № 92, 1904.
8. Van-der-Waals, Ober die Continuität des gasförmigen und flüssigen Zustandes, Leipzig, 1881.
9. Егоров Н. Г., «Временник Главной палаты мер и весов», ч. 2, 1895.
10. Георгиевский Н. Н., «Временник Главной палаты мер и весов», ч. 2, 1895.
11. Лебедев И. А., «Временник Главной палаты мер и весов», ч. 4, 1899.
12. Пилипчук Б. И., Труды ВНИИМ, вып. 4(64), 1948.
13. Oishi, Awano, Mochizuki, J. Phys. Soc. Japan, v. 11, 1956, p. 313.
14. Moser, Otto, Thomas, Zeitsch. Phys., Bd. 147, № 1, 1957.
15. Гордов А. Н., Аржанов А. С., Дийков У. В., ДАН СССР, т. 133, № 4, 1960.
16. Киренков И. И., «Измерительная техника», № 6, 1960, стр. 26.
17. Королева А. Н., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 51(111), 1961, стр. 224.
18. Бродский А. Д. и Саватеев В. В., «Измерительная техника», № 5, 1960, стр. 21.
19. Бродский А. Д., «Измерительная техника», № 6, 1961, стр. 31.
20. Соловьев В. И. и Бродский А. Д., «Приборы и техника эксперимента», № 2, 1962.

## РАЗВИТИЕ ПЛАТИНОВОЙ ТЕРМОМЕТРИИ

В области температур от 0 до 630,5°С Международная практическая температурная шкала (МПТШ) воспроизводится с помощью эталонного платинового термометра сопротивления. К чистоте и физическому состоянию платины термометра предъявляются определенные требования.

Для интерполяции в этой области температур служит уравнение

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2),$$

постоянные которого определяются по сопротивлению платинового термометра в точках плавления льда, кипения воды и серы. В настоящее время вместо точек плавления льда и кипения серы применяются соответственно тройная точка воды и точка затвердевания цинка, воспроизводимые с большой точностью.

Первые метрологические работы по термометрии в России были начаты в 1886 г., когда ртутный термометр французского мастера Тонелло, приобретенный В. С. Глуховым, стал первым эталоном для измерения температуры. Его пределами измерения были 3,5 ÷ 103,7°С.

В 1894 г. у фирмы Голац в Париже был приобретен водородный термометр, который стал первым и основным русским эталоном для измерения температуры. Изучение и установка этого термометра закончились в 1898 г. первыми русскими учеными в области научной термометрии. Тогда же в Главной палате мер и весов была организована термометрическая лаборатория.

В этот период метрологические лаборатории других стран начали применять термометры сопротивления. Об их применении для измерения температуры впервые упоминал Сименс в 1871 г. Однако результаты его работ показали, что из-за нестабильности термометры сопротивления непригодны для точного измерения температуры.

В 1887 г. Каллендаром была разработана конструкция платинового термометра, обеспечивающая высокое постоянство сопротивления. В этой конструкции на зубчатый слюдяной каркас платиновая проволока была намотана так, что при изменениях температуры она могла свободно расширяться и сокращаться. Укрепленные на слюде выводы термометра исключили возможность натяжения проволоки при их движении. В дальнейшем конструкция термометра Каллендара несколько

видоизменилась. Однако эти изменения коснулись главным образом способов крепления проволоки на каркасе.

Основным недостатком термометров Каллендара были значительные размеры чувствительного элемента. На их уменьшение было обращено большое внимание на следующих этапах развития платиновой термометрии. Наряду с этим, поскольку возрастали требования к точности температурных измерений, были приняты меры, обеспечивающие повышение стабильности термометров сопротивления.

В 1912 г. в термометрической лаборатории Главной палаты мер и весов начали применять платиновые термометры сопротивления, приобретенные в Кембриджском обществе. После изучения Н. А. Марениным два из них были приняты в 1924 г. в качестве эталонных.

Первые крупные работы, которые определили основное направление в дальнейшей работе термометрической лаборатории, были выполнены Н. А. Марениным и В. А. Яковлевой, а также А. Н. Георгиевским и Г. М. Коидратьевым. (Они были руководителями лаборатории в советское время.).

В 1929 г. лаборатория получила три платиновых термометра сопротивления фирмы Гереус, которые были изучены В. А. Яковлевой и в 1938 г. утверждены как новые эталоны. Однако из-за значительных изменений их основных характеристик, не подчинявшихся никакой закономерности, особенно при температурах, близких к  $600^{\circ}\text{C}$ , от применения этих термометров в качестве эталонов в дальнейшем пришлось отказаться. В 1950 г. они были заменены термометрами типа ХГИМИП, так как преимущество последних (с точки зрения стабильности) к этому времени стало очевидным.

К изучению новых платиновых термометров сопротивления, изготовленных в Харьковском государственном институте мер и измерительных приборов (ХГИМИП) из отечественной платины, имеющей коэффициент сопротивления несколько больший  $3,92 \cdot 10^{-3}$ , термометрическая лаборатория приступила в 1947 г. Эти термометры по конструкции и размерам чувствительного элемента аналогичны термометрам фирмы Гереус, но токовые и потенциальные выводы у них изготовлены из платины, а не золота.

Необходимость усовершенствования конструкции и повышения стабильности платиновых термометров диктовалась возрастающими требованиями, предъявляемыми к точности измерений температуры в научных и промышленных организациях. Поэтому начиная с 1954 г., в лаборатории приступили к изучению новых термометров сопротивления конструкции П. Г. Стрелкова. Эти термометры имеют ряд преимуществ по сравнению с термометрами ХГИМИП в том числе и большую стабильность. В термометрах сопротивления Стрелкова на кварцевый геликондальный каркас монтируется платиновая проволока диаметром 0,1 мм предварительно свитая в спираль диаметром 0,7 мм. Для повышения точности измерений было очень важно иметь номинальные значения сопротивления термометров близкими к значению сопротивления образцовых мер и, кроме того, повысить стабильность термометров. Поэтому во ВНИИМ несколько усовершенствовали конструкцию термометров Стрелкова, предусмотрев возможность подгонки их сопротивления под номинальное, с точностью  $\pm 0,1\%$ .

Для улучшения условий теплообмена между чувствительным элементом и измеряемой средой термометры были заполнены гелием, содержащим около 10% кислорода, или сухим воздухом и герметизированы.

По такой усовершенствованной конструкции во ВНИИМ изготовлены и исследованы 20 новых платиновых термометров сопротивления, из числа которых отобраны в качестве эталонных семь наиболее стабильных.

Высокое качество новых эталонных термометров сопротивления предъявляет особые требования и к аппаратуре, применяемой при воспроизведении постоянных точек температурной шкалы, к чистоте вещества этих точек и точности электронизмерительных приборов и барометра.

С 1954 г. лаборатория провела ряд исследований, в результате которых был осуществлен переход от температуры плавления льда к тройной точке воды, от чашечного барометра и открытого кипятильника к точному барометру с интерференционным отсчетом уровня ртути и кипятильнику с маностатом, от точки кипения серы к температуре затвердевания цинка. Кроме того, были несколько усовершенствованы техника и методика измерения электрического сопротивления платинового термометра.

#### Тройная точка воды ( $+0,01^{\circ}\text{C}$ )

Тройная точка воды была осуществлена и исследована в 1954—1955 гг. Исследования показали, что на воспроизведение ее влияют три фактора: время установления равновесия самой точки, нагревание измерительным током чувствительного элемента термометра и гидростатическое давление столба воды в сосуде тройной точки. Чтобы учесть их необходимо начинать измерения в тройной точке воды спустя сутки после намораживания рубашки, а результаты приводить к нулевому измерительному току и нулевому гидростатическому давлению.

Выполнение указанных условий опыта и применение точной электронизмерительной аппаратуры позволяют воспроизвести основную постоянную точку температурной шкалы — тройную точку воды  $\pm 0,01$  град с погрешностью, не превышающей  $\pm 0,0001$  град.

#### Точка кипения воды ( $100^{\circ}\text{C}$ )

Для воспроизведения точки кипения воды применяется усовершенствованный кипятильник нового типа, разработанный во ВНИИМ. Градиент температуры в его рабочем пространстве не превышает  $1 \cdot 10^{-5}$  град/см. Давление паров воды измеряют с помощью ртутного барометра с интерференционным отсчетом уровня ртути. Действие отсчетного приспособления основано на использовании явления интерференции света, которое дает возможность определить с точностью до 2—3 мкм разность положений двух уровней при совмещении их изображений в одной плоскости.

Водяной кипятильник соединен с барометром через маностат, поддерживающий постоянное, не зависящее от атмосферного, давление паров воды и представляющий собой герметизированный цилиндр емкостью приблизительно  $90 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>.

Суммарная погрешность воспроизведения точки кипения воды не превышает  $\pm 0,0006$  град.

#### Точка затвердевания цинка ( $419, 505^{\circ}\text{C}$ )

Две постоянные точки Международной температурной шкалы (МПТШ) из трех, а именно  $0^{\circ}$  и  $100^{\circ}\text{C}$ , обеспечивают достаточно высокую точность измерений. Однако третья репера — температура кипения

серы — по своей физической сущности не может быть воспроизведена с погрешностью меньшей  $0,001 \text{ град}$ . При этом равновесное состояние, воспроизводимое с такой погрешностью, наступает не сразу после начала кипения серы, а лишь спустя 24 ч. Естественно, что в лабораториях трудно создать такие условия, при которых для ежедневной практики пользовались бы точкой серы только после суточного кипения. Поэтому она обычно воспроизводится с погрешностью, доходящей до  $\pm (0,01 \div 0,02) \text{ град}$ . Этот недостаток третьей постоянной точки и преимущества точек затвердевания чистых металлов навели на мысль пересмотреть эту реперу. Целесообразнее всего, очевидно, было исследовать температуру затвердевания цинка, поскольку она близка к температуре кипения серы. Опыт практического использования точки цинка в качестве вторичной постоянной точки показал, что она хорошо воспроизводима и стабильна.

На заседании Консультативного комитета по термометрии в 1948 г. представитель советской делегации А. К. Колосов внес соответствующее предложение. Комитет, одобрив это предложение, рекомендовал провести необходимые исследования по стабильности температуры затвердевания цинка в наиболее крупных метрологических лабораториях. Такие исследования были проведены во ВНИИМ, Канадском исследовательском совете и в НФЛ (Англия).

Во ВНИИМ температура затвердевания цинка была воспроизведена с погрешностью, не превышающей  $\pm 0,0005 \text{ град}$ , для образцов цинка чистотой 99,9998% в печи с градиентом температуры  $0,04 \text{ град/см}$ . Приблизительно такой же результат был получен в Канаде и Англии. После взаимного обмена образцами чистого цинка было установлено, что цинк, очищенный во ВНИИМ К. Я. Брегман, оказался наиболее чистым и обеспечил воспроизведение температуры затвердевания с наименьшей погрешностью. Об этом сообщалось в статье канадского ученого Макларена в канадском журнале «Физика» (т. 36 за 1958 г.).

На XI Генеральной конференции по мерам и весам (1960 г.) температура затвердевания цинка была включена в состав первичных постоянных точек МПТШ со значением  $419,505^\circ\text{C}$  как точка, которую можно применять наравне с точкой кипения серы.

### Электроизмерительная аппаратура

Во ВНИИМ сопротивления платиновых термометров измеряются мостовым и компенсационным методами. При этом используется новый мост-компаратор типа МКС-1, разработанный в лаборатории эталонов электрических единиц ВНИИМ.

В мосте-компараторе, который может работать по схеме как двойного, так и одинарного моста, применяется метод уравнивания по частям. Благодаря этому влияние сопротивлений зажимов и соединительных проводов на результат измерения исключается.

Мост-компаратор используется для измерений сопротивления платиновых термометров сопротивлением главным образом в тех случаях, когда требуется наиболее высокая точность ( $\pm 0,0001 \div 0,0002 \text{ град}$ ). Несколько меньшая точность до  $(2 \div 3) \cdot 10^{-4} \text{ град}$  была получена при измерениях на компенсаторе с помощью специальных золото-хромовых мер, термостатированных в тройной точке воды. При этом значения сопротивления золото-хромовых мер должны быть определены на мосте-компараторе с высокой точностью. Номинальные значения сопротивления этих мер близки к сопротивлению платинового термометра в реперных точках.

Применение новых мер сопротивления вместо обычных образцовых катушек, кратных 10, повышает точность измерения сопротивления платиновых термометров на компенсаторе на один порядок: относительная погрешность снижена до  $\pm 2 \cdot 10^{-5}$ . Температура в тройной точке воды измеряется на компенсаторе с погрешностью  $\pm 0,0002 \div 0,0004$  град.

#### Международные сличения платиновых термометров сопротивления

В 1952 г. Консультативный комитет по термометрии рекомендовал провести сличения платиновых термометров сопротивления в точках плавления льда и кипения воды, реализованных в различных национальных лабораториях. Эта работа представляла интерес с точки зрения оценки достигнутой степени единства температурных измерений в различных странах. Выбор указанных реперных точек обусловлен тем, что точность измерения температур в любом диапазоне в известной степени зависит от точности воспроизведения основного интервала МПТШ.

По результатам измерений, сообщенных каждой национальной лабораторией, можно было сделать вывод о степени сходимости для выбранных платиновых термометров полученных значений температурных коэффициентов сопротивления  $\alpha$  в интервале  $0 \div 100^\circ \text{C}$ . Сравнение абсолютных значений сопротивлений термометров  $R_0$  и  $R_{100}$  также представляло интерес, так как по ним можно было судить о достигнутой точности не только температурных, но и электрических измерений.

В круговом международном сличении (в 1952—1959 гг.) трех платиновых термометров сопротивления: советского № 109, английского R-13 и американского S-167 приняли участие национальные лаборатории СССР, Англии, США, Канады, Японии, Австралии, ФРГ и Голландии. В результате было установлено, что в интервале  $0 \div 100^\circ \text{C}$  все лаборатории получили значения, совпадающие в пределах  $\pm 0,001$  град. При этом результаты ВНИИМ за 1959 г. отличались от полученных в НФЛ (Англия) за 1958 г. по трем термометрам в среднем не более чем на  $\pm 0,0005$  град.

В настоящее время во ВНИИМ точность воспроизведения МПТШ с помощью платиновых термометров сопротивления достаточно высока и находится приблизительно на одном уровне с результатами наиболее развитых метрологических лабораторий зарубежных стран. Но этого добились не сразу. Так, в сообщениях, опубликованных в 1924 г. Н. А. Марениным, говорится, что два платиновых термометра фирмы Кембридж, отградуированных в Англии и в Главной палате в точке  $0^\circ \text{C}$ , дали расхождения 0,04 и 0,01 град. При этом Маренин считал, что это совпадение «достаточно удовлетворительное».

По мере развития науки и техники требовалось повышать точность измерений температуры, и термометрическая лаборатория систематически вела исследования в этой области. К 1941 г. погрешность воспроизведения шкалы была значительно снижена, о чем можно судить по работам А. В. Тарховой. После войны работы в этом направлении возобновились. К. И. Несмачным опубликованы данные, согласно которым погрешность воспроизведения шкалы в 1947 г. в точке  $0^\circ \text{C}$  составляла  $0,003 \div 0,004$  град, а в точке кипения серы  $0,01 \div 0,02$  град. Эти значения погрешностей сохранялись приблизительно до 1954 г. В настоящее время погрешность воспроизведения шкалы характеризуется следующими цифрами: в точке  $0,01^\circ \text{C}$  она составляет  $0,0001 \div 0,0003$  град, в точках  $100^\circ \text{C}$  и  $419,505^\circ \text{C}$  эта погрешность —  $0,0005 \div 0,0008$  град.

### Перспективы дальнейшего развития платиновой термометрии

Развитие науки и техники предъявляет высокие требования к точности измерений в области средних температур. Для этого необходимо проводить работы, связанные с дальнейшим повышением точности воспроизведения Международной практической шкалы температур, приближением ее к термодинамической, а также по повышению точности передачи шкалы. Кроме того, важно исследовать возможности повышения верхнего предела применения платиновых термометров. Это поможет решить такие проблемы, как разработка новых эталонных приборов (например, высокотемпературные термометры сопротивления); изучение новых постоянных точек; разработка новых термостатов, обеспечивающих высокую однородность температурного поля; метрологическое исследование новых методов и новой аппаратуры, применяемой в промышленности для измерения средних температур; исследование условий теплообмена при измерении температуры в твердых, жидких и газообразных средах; изучение изоляционных свойств материалов, применяемых при высоких температурах; определение точек фазовых превращений ферромагнитных и диэлектрических материалов при высоких температурах.

## ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

Глубокие метрологические исследования Д. И. Менделеева в значительной мере определили дальнейшие пути развития различных областей измерений. Прогресс ряда отраслей техники вносил свои коррективы в характер развития отдельных областей измерений, создавая новые направления. Одним из таких новых направлений были исследования методов измерений переменных температур.

Несмотря на большую историю, совершенствования различных областей метрологии в Главной палате мер и весов, в последнее десятилетие развитие новой техники потребовало создания таких разделов метрологии, в которых исследуются методы оценки и учета погрешностей, возникающих при измерении физических величин в динамических режимах.

Появилась также необходимость организовать специализированные лаборатории по изучению динамических погрешностей измерений. Так, была создана лаборатория динамических методов измерения температур.

Работы по созданию и исследованию методов измерения меняющихся во времени температур были развернуты во ВНИИМ в течение последних 8 лет.

Методы корректировки показаний измерительных приборов на влияние термической инерции термометрических элементов при измерениях меняющихся температур в условиях постоянной теплоотдачи в общих чертах были разработаны ранее.

До недавнего прошлого, при сравнительно небольших скоростях протекания процессов и невысоких требованиях к точности тепловых расчетов, можно было применять методы расчетов, основанные на предположении постоянства теплоотдачи. В современной технике все чаще приходится встречаться со случаями, когда это предположение принципиально неверно. Поэтому возникает необходимость использовать новые методы расчета, учитывающие специфику действительно наблюдаемых условий теплообмена. Таковы, например, условия нагрева стенок камер сгорания реактивных и ракетных двигателей в момент перехода на форсированный режим, когда на стенки камеры действует газовая струя с быстро возрастающими температурой и скоростью теплообмена. Таковы условия, сопутствующие движению баллистического тела в атмосфере с меняющейся температурой и плотностью. К этой группе

явлений, кроме того, относится теплообмен термодатчика с выхлопными газами двигателя внутреннего сгорания, когда температура и скорость выхлопных газов периодически меняются.

Аналогичные явления наблюдаются на поверхности термодатчика при измерениях температуры турбулентных пламен. Пульсация температуры и коэффициента теплоотдачи в этом случае происходит в широком спектре частот.

Таким образом, на практике встречаются случаи, когда изменение температуры газа, окружающего данное тело, сопровождается изменением коэффициента теплоотдачи. Более того, изменение температуры газовой среды, как правило, влечет за собой изменение ее плотности, а следовательно, и коэффициента теплоотдачи от газа к термодатчику. Поэтому нестационарные температуры газовых сред при постоянной теплоотдаче измеряют контактными методами довольно редко.

Несомненно то, что изучение особенностей нагрева или охлаждения тел в условиях изменения не только температуры окружающей среды, газа или жидкости, но и теплоотдачи очень важно для практических целей. В связи с этим поставлена задача теоретически и экспериментально исследовать характер изменения температуры тела, введенного в поток газа или жидкости с изменяющейся температурой и скоростью, и проследить закономерности изменения температуры тела (термодатчика) при заданных характерах изменения температуры окружающей среды и коэффициента теплоотдачи.

Результаты теоретического исследования позволяют либо разработать методы расчета фактической кривой изменения температуры газового потока, исключая искажающее влияние переменной теплоотдачи, либо оценить те погрешности измерения температур газового потока, которые возникают только из-за специфически изменчивого характера теплоотдачи.

В большинстве случаев температура среды и теплоотдачи одновременно изменяется в зависимости от времени  $\tau$ :

- 1) линейно,
- 2) экспоненциально,
- 3) по гармоническим законам синхронно.

Все теоретические исследования проведены для неограниченного цилиндра (форма, к которой приближаются многие термодатчики). При этом берется однородный и изотропный цилиндр и считается, что тепловые характеристики материала цилиндра — коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , удельная теплоемкость  $C$  и плотность  $\gamma$  — в заданном интервале температур изменяются настолько мало, что ими практически можно пренебречь.

Коэффициент теплоотдачи на поверхности тела является функцией только времени. Наконец, предполагается равенство начальных температур тела  $t_0$  и среды  $\theta_0$ , а потому задача сводится к решению уравнения теплопроводности для разных точек цилиндра  $r$  с радиусом  $R$ :

$$\frac{\partial \theta(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left[ \frac{\partial^2 \theta(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta(r, \tau)}{\partial r} \right], \quad (1)$$

$$\tau > 0, \quad 0 < r < R,$$

где  $a = \frac{\lambda}{C\gamma}$ , с начальным условием

$$\theta(r, 0) = \theta_0 = t_0.$$

условием конечного значения температур на оси цилиндра и граничным условием 3-го рода.

$$\left. \frac{\partial \theta(r, \tau)}{\partial r} \right|_R - f_1(\tau) [f_2(\tau) - \theta(R, \tau)] = 0, \quad (2)$$

где  $f_1(\tau)$  и  $f_2(\tau)$  — функции, характеризующие изменение по времени соответственно «внешней теплопроводности»  $h(\tau) = \frac{\alpha(\tau)}{\lambda}$  ( $\alpha(\tau)$  — меняющийся во времени коэффициент теплоотдачи) и температуры  $t(\tau)$  внешней среды.

Полученные приближенные решения уравнения (1) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характер изменения		Форма решения для квазистационарной стадии процесса
температуры среды	коэффициента теплоотдачи	
$t(\tau) = t_0 + \sigma\tau$	$h(\tau) = h_0 + b\tau$	$\theta(\tau) = A + B\tau + C\tau^2$
$t(\tau) = t_k + (t_0 - t_k)e^{-k\tau}$	$h(\tau) = h_k + (h_0 - h_k)e^{-k\tau}$	$\theta(\tau) = A + Be^{k\tau} + Ce^{k^2\tau} + De^{-(k+\kappa)\tau}$
$t(\tau) = t_{cp} + A_1 \sin \omega\tau$	$h(\tau) = h_0 + A_2 \sin(\omega\tau - \varphi)$	$\theta(\tau) = A + B \sin(\omega\tau - \varphi_1) + C \sin(2\omega\tau - \varphi_2)$

Из табл. 1 видно, что в первых двух решениях изменение температуры тела в квазистационарной стадии характеризуется произведением функций, определяющих изменение со временем как температуры среды, так и коэффициента теплоотдачи. При синхронных пульсирующих колебаниях температуры среды и коэффициента теплоотдачи в колебаниях температуры тела возникает вторая гармоника кратной частоты.

Следовательно, в условиях непостоянной теплоотдачи кривая изменения показаний инерционного термомприемника принципиально не соответствует кривой изменения температуры среды. По-видимому, это положение распространяется и на тела произвольной формы.

Из первого и второго решений табл. 1 непосредственно следует соотношение между скоростями изменений температур тела  $t$  и среды  $t(\tau)$

$$\frac{d\theta(\tau)/d\tau}{dt/d\tau} = A + Bf_1(\tau), \quad (3)$$

где  $A$  и  $B$  — постоянные.

Таким образом, отношение скоростей изменения температуры среды и температуры тела линейно связано с функцией, определяющей изменение со временем коэффициента теплоотдачи. Соотношение (3) справедливо как для отдельных точек тела, расположенных на расстояниях  $r$  от оси цилиндра, так и для средней объемной температуры цилиндра.

При теплоотдаче, линейно меняющейся со временем, для постоянных  $A$  и  $B$  справедливы следующие соотношения:

$$A = 1 - \frac{bR^2}{4ah_0} \left( 1 + \frac{4}{h_0R} \right), \quad (4)$$

$$B = 2 \frac{b}{h_0} = \frac{2}{\alpha} \frac{d\alpha}{d\tau}. \quad (5)$$

Можно показать, что выражение (3) сохраняет силу при монотонных изменениях температуры внешней среды и коэффициента теплоотдачи, выражающихся либо полиномом от  $\tau$ , либо суммами экспоненциальных функций от  $\tau$ .

Значит, соотношение (3), выведенное теоретически, позволяет найти действительную скорость изменения температуры среды  $dt/d\tau$  по скорости  $d\theta/d\tau$  изменения показаний инерционного термодатчика. Для этого из вспомогательного эксперимента необходимо определить вид функции  $f_1(\tau)$ , характеризующей изменение во времени коэффициента теплоотдачи и значения постоянных  $A$  и  $B$  для данного термодатчика.

Исследование третьего решения в табл. 1 показывает, что при синхронном и синфазном характере колебаний температуры среды и коэффициента теплоотдачи температура всех точек инерционного тела совершает периодические колебания около среднего уровня, отличающегося от среднего уровня колебаний температуры среды. Для чисто синусоидальных колебаний температуры и теплоотдачи смещение  $M$  среднего уровня колебаний температуры термодатчика определяется выражением

$$M = \frac{A_1 A_2 R}{2(h_0 R - A_2 R \operatorname{bei} HR)}, \quad (6)$$

где  $A_1$  — амплитуда колебаний температуры среды,

$\frac{A_2 R}{h_0 R}$  — относительная амплитуда колебаний критерия Био,

$HR$  — критерий, характеризующий инерционность тела при данной частоте  $\omega$ .

Следовательно, если при измерении периодически меняющихся температур газового потока с пульсирующими скоростями не учитывать влияние изменения коэффициента теплоотдачи, то возникает систематическая погрешность измерений, определяемая величиной  $M$ .

Из формулы (6) вытекает, что величина смещения  $M$  температуры меняется в зависимости от инерционности цилиндра, определяемой критерием  $HR = R\sqrt{\omega/a}$ . Так как функция  $\operatorname{bei} HR$  по мере увеличения аргумента возрастает медленно, то повышение частоты  $\omega$  колебаний температуры или увеличение инерционности тела  $R^2/a$  должны привести к большим расхождениям средних уровней колебаний температур тела и внешней среды.

Эксперименты должны были проверить основные теоретические выводы, установить границы их применимости и исследовать особенности динамических погрешностей, возникающих при измерениях нестационарных температур в условиях меняющейся теплоотдачи.

Для этого были созданы четыре экспериментальные установки. Три из них позволили осуществить монотонное изменение температуры газовой или жидкой среды при монотонном изменении коэффициента теплоотдачи.

В рамках такой статьи невозможно привести все результаты экспериментов. Важно только сказать, что исследования помогли разработать метод расчета кривой изменения температуры среды по показаниям инерционного термодатчика и термоанемометра. Погрешность расчета ординат этой кривой в среднем составляет около 3% диапазона изменения температуры среды и обуславливается погрешностями измерения мгновенных значений коэффициента теплоотдачи.

Экспериментальные исследования особенностей динамических погрешностей, возникающих при измерении пульсирующих температур

в условиях пульсирующей теплоотдачи, заключались в изучении эффекта смещения среднего уровня колебаний температуры инерционного термометрического приемника по отношению к уровню колебаний температуры среды [формула (6)], предсказанного теоретически. Опыты проводились на установке типа ПИТТ, схема которой представлена на рис. 1.

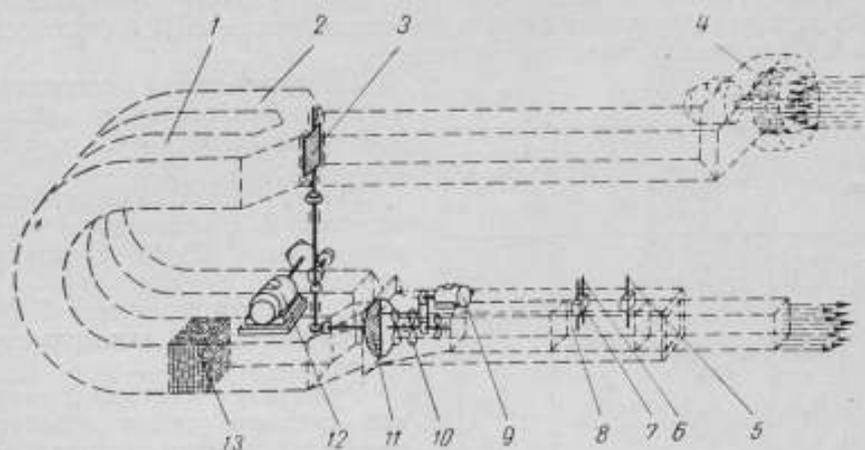


Рис. 1. Схема установки типа ПИТТ.

Нагнетаемый с помощью вентилятора 4 воздух поступает в трубу квадратного сечения. Вблизи ее входа внутри установлена равномерно вращающаяся вокруг вертикальной оси заслонка 3, которая периодически перекрывает доступ потока воздуха в трубу и тем самым создает периодические синусоидальные изменения скорости воздушного потока. В течение полного оборота заслонки 3 происходят два полных цикла синусоидальных колебаний скорости воздушного потока. Пройдя заслонку 3, воздушный поток разветвляется по двум симметричным каналам 2 и 1. В одном из них установлен нагреватель 13 из многовитковой нихромовой спирали, рассчитанной на расходуемую мощность до 10 квт.

Нагретый и холодный потоки воздуха опять смешиваются, пройдя через заслонку 11, равномерно вращающуюся вокруг горизонтальной оси. Эта заслонка представляет собой расположенный в вертикальной плоскости полукруг, при вращении которого вокруг горизонтальной оси, проходящей через центр круга, в рабочее пространство трубы 8 поступает то горячий, то холодный поток, то их смесь в периодически меняющемся соотношении.

Обе заслонки 3 и 11 приводятся в движение одним двигателем, поэтому они вращаются синхронно и притом так, что частота вращения заслонки 3 вдвое меньше частоты вращения заслонки 11. В этом случае можно обеспечить синхронность колебаний температуры и скорости потока.

Между двигателем и осями обеих заслонок установлен редуктор 12 с переключателем, позволяющим, по мере надобности, менять частоту пульсации температуры и скорости потока в пределах 0,1—1,0 гц ступенями через 0,1 гц. Предусмотрена также возможность менять взаимную фазу вращения заслонок.

Далее поток поступает в сужающийся конус. По его оси установлена вращаемая внешним вспомогательным двигателем 9 горизонтальная ось, на которой жестко закреплены три трехлопастные пропеллера-

мешалки 10. Перемешанный ими поток поступает в рабочее пространство 8 с постоянным сечением  $90 \times 90$  мм, в котором имеется три гнезда для установки малоинерционного 7 и инерционного 6 термометров и термоанемометра 5.

Для того чтобы определить характер динамических погрешностей, возникающих при измерении пульсирующих температур газового потока при пульсирующей теплоотдаче, на установке типа ПИТТ было испытано 10 различных термоприемников:

Таблица 2

Обозначение	Диаметр, мм		Постоянная термической инерции $\tau$ , сек
$T_1$	0,1	проволоки	0,03
$T_2$	0,3	"	0,09
$T_3$	0,5	проволоки, наружный	0,14
$T_4$	0,8	То же	0,25
$T_5$	1,8	"	0,6
$T_6$	3,6	"	2,9
$T_7$	5,2	"	4,0
$T_8$	0,5	электрода	0,3
$T_9$	4,0	переборки, наружный	3,6
$T_{10}$	7,0	резервуара, наружный	14,0

Примечание. Постоянная термической инерции термоприемников с измерена методом регулярного теплового режима в спокойной воде.

Термически одним и тем же относительным смещением. Небольшой наклон кривых для этих термоприемников при частотах 0,1—0,3 гц, по-видимому, объясняется неучтенными систематическими погрешностями измерений, которые в общем невелики и не выходят за пределы указанных случайных погрешностей результатов измерений.

Так как наличие термической инерции у термоприемников является основной причиной возникновения наблюдаемого смещения среднего уровня колебаний температур, то в качестве рабочей можно принять следующую гипотезу: аналогично тому, как степень гашения амплитуды гармонических колебаний температуры в инерционном теле определяется величиной произведения  $\omega\tau$ , так и характер смещения среднего уровня колебаний  $M/A_1$  зависит от критериальной величины этого произведения  $\omega\tau$ . Термоприемники  $T_6 - T_8$  и  $T_{10}$  во всем исследуемом диапазоне частот имеют следующие пределы произведения  $\omega\tau$ : 1,8 ÷ 18 — для  $T_6$ , 2,5 ÷ 25 для  $T_7$ , 2,3 ÷ 23 — для  $T_8$ , 8,8 ÷ 88 для  $T_{10}$ .

В эту область максимальных смещений необходимо включить кривую термоприемника  $T_5$  на участке, где  $\omega > 0,4$  гц (причем величина  $\omega\tau$  меняется в пределах 1,5 ÷ 9,4), а также участок кривой при  $\omega > 0,8$  гц для термоприемника  $T_9$  (величина  $\omega\tau$  меняется в пределах 1,5 ÷ 1,9).

1) термометры сопротивления:  $T_1$  и  $T_2$  с оголенной платиновой проволокой,  $T_3 - T_7$  с остеклованной;

2) термопары платинородий-платина:  $T_8$  с оголенными термоэлектродами;  $T_9$  в стеклянной пробирке;

3) ртутный термометр  $T_{10}$ .

Результаты экспериментов приведены в табл. 2.

Результаты измерений смещения среднего уровня колебаний температуры, выраженные в процентах от амплитуды  $A_1$  для всех исследованных типов термоприемников, приведены на рис. 2, причем для каждого термоприемника по экспериментальным точкам проведена плавная кривая, характеризующая частотную зависимость относительного смещения среднего уровня колебаний температуры. Из рисунка видно, что термоприемники  $T_6 - T_8$  и  $T_{10}$  во всем диапазоне частот 0,1—1 гц обладают прак-

Таким образом, если для термодатчика  $\varepsilon\omega > 1,5$ , то относительное смещение среднего уровня колебаний температуры достигает своего максимального значения и при дальнейшем росте частоты остается практически неизменной. Этот вывод основан на экспериментальных данных, полученных на термодатчиках различной структуры (остеклованные термометры сопротивления, термопара, ртутный термометр), и поэтому имеет достаточно общий характер.

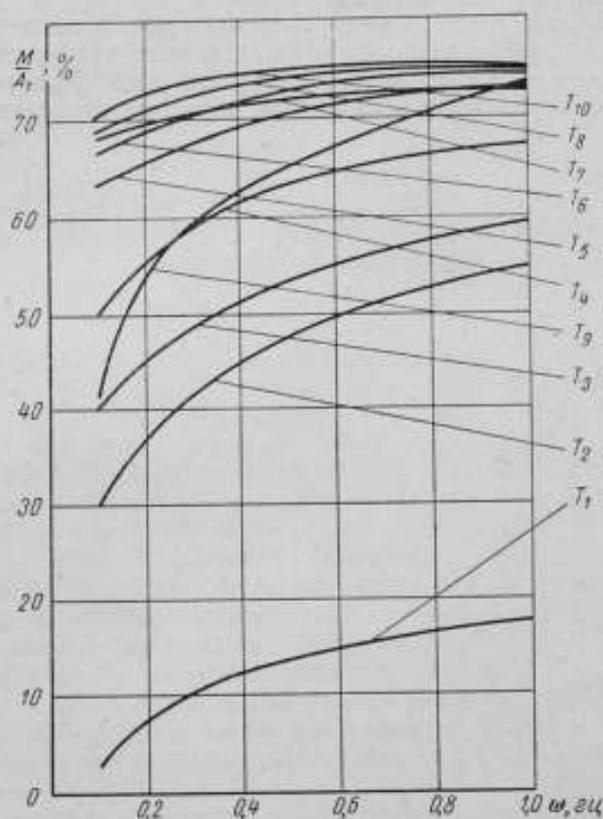


Рис. 2. Результаты измерений смещения среднего уровня колебаний температуры.

Для области  $\varepsilon\omega < 1,5$  существует заметная частотная зависимость наблюдаемых относительных смещений. Нижней границей этой области, по-видимому, следует считать начальное значение для термодатчика  $T_1$  (при  $\omega = 0,1$  гц), равное  $\varepsilon\omega = 0,02$ . При  $\varepsilon\omega < 0,02$  относительные смещения средних условий колебаний температур термодатчиков настолько малы, что ими можно пренебречь.

Изучение характера гашения амплитуд колебаний температуры в инерционном теле показывает, что снижение регистрируемой амплитуды колебаний температуры, вызванное термической инерцией термодатчика, начинает сказываться ощутимо (в 1%) только при значении критерия  $\varepsilon\omega = 0,06$ . Поэтому и влияние термической инерции термодатчика на регистрируемое смещение среднего уровня температуры при синхронных и синфазных колебаниях температуры и теплоотдачи обнаруживается при значениях критерия  $\varepsilon\omega$  того же порядка,

что и в случае занижения регистрируемого колебания температуры потока.

Большие относительные смещения среднего уровня температуры, полученные в работе, доходят до 70—75% амплитуды колебаний температуры потока. Это вызвано несинусоидальной формой теплоотдачи, которая, в свою очередь, обусловлена нелинейностью связи коэффициента теплоотдачи и скорости потока и является типичной для потока с синусоидальными колебаниями скорости.

Таким образом, проведенные теоретические и экспериментальные исследования по измерению переменных температур создали базу для учета динамических погрешностей измерений нестационарных температур в условиях переменной теплоотдачи в разных отраслях промышленности.

РАБОТЫ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ  
ТЕПЛОВЫХ ВЕЛИЧИН

Из многообразия физических величин, характеризующих тепловые свойства вещества, можно выделить такие, как коэффициенты температуропроводности и теплопроводности и удельную теплоемкость, значение которых в связи с развитием многих отраслей промышленности возросло в последние два—три десятилетия. Для новых технологических процессов требуются материалы, устойчивые как к низким (до  $-270^{\circ}\text{C}$ ), так и к высоким (до  $3000-4000^{\circ}\text{C}$ ) температурам. В результате теплофизических испытаний различных материалов (теплоизоляторов, полупроводников и металлов) в широком диапазоне температур создано значительное число методов измерения, для которых используются главным образом единичные уникальные установки. Для серийного выпуска пока еще не подготовлено ни одной подобной установки.

Вторая межвузовская конференция по методам и приборам для измерения тепловых величин материалов (декабрь 1960 г.) отметила отставание в развитии теплофизического приборостроения, а также отсутствие единства измерений в стране [1].

Основы метрологии тепловых измерений были заложены еще работами Д. И. Менделеева в области термометрии, но только в 30-е годы во ВНИИМ были поставлены первые исследования по определению теплофизических коэффициентов. В термометрической лаборатории ВНИИМ на основе теории регулярного теплового режима, созданной Г. М. Кондратьевым, экспериментально разрабатывались методы акалориметра, двух точек, лямбдакалориметра, а также другие методы, которые в дальнейшем получили признание всех теплофизиков страны [2].

Г. М. Кондратьев провел большую работу по изысканию образцовых веществ для теплофизических определений [3]. Лаборатория тепловых измерений, созданная по его инициативе в 1958 г., для обеспечения единства измерений должна была решить следующие задачи:

- а) создать образцовые установки для аттестации нормальных образцов температуропроводности, теплопроводности и теплоемкости,
  - б) изыскать образцовые вещества для теплофизических испытаний.
- Обеспечение единства измерений посредством образцовых веществ обусловлено тем, что существующие приборы, принцип действия которых основан на сравнительных измерениях, имеют в качестве конструктивного элемента образцовое вещество. Приборы для абсолютных

измерений могут иметь значительные неучтенные систематические погрешности, вызванные искажениями температурных полей в калориметрической системе и несоответствиями теоретических тепловых режимов реально осуществляемым. Некоторые приборы градуируются с помощью нормальных образцов.

Периодическая поверка приборов необходима из-за возможных необратимых или случайных изменений в их схемах, возникающих в процессе эксплуатации. Наиболее полному исследованию подвергаются тепловые свойства теплоизоляторов. Поэтому лаборатория тепловых измерений решает в первую очередь задачу обеспечения единства измерений в области плохих проводников тепла, для которой характерен диапазон измеряемых значений коэффициентов теплопроводности  $0,05 \pm 1 \text{ вт/(м}\cdot\text{град)}$  в широком интервале температур от  $-180$  до  $+1000^\circ\text{C}$ .

По инициативе ВНИИМ в 1962 г. было организовано совместное определение рядом организаций теплофизических коэффициентов полиметилметакрилата. В работе приняли участие ВНИИМ, Ленинградский химико-технологический институт им. Ленсовета, Ленинградский институт точной механики и оптики (ЛИТМО) и др.

Коэффициент температуропроводности был измерен методами акалориметра, радиальных температурных волн в цилиндре, непрерывного нагрева и др. Отклонения от усредненной зависимости коэффициента температуропроводности в интервале  $20-80^\circ\text{C}$  для определений по отдельным методам не превышают 15%. Максимальное различие усредненных значений в отдельных методах составляет 20%. Результаты определений коэффициентов температуропроводности во ВНИИМ отличаются от усредненных значений не более чем на 3%.

Коэффициент теплопроводности был измерен во ВНИИМ методом стационарного потока тепла и в ЛИТМО методом непрерывного нагрева. Расхождения полученных результатов достигают 11%.

По результатам группового определения теплофизических коэффициентов полиметилметакрилата следует сделать два вывода: 1) коэффициенты температуропроводности можно измерить во ВНИИМ с относительно высокой точностью (до  $3-5\%$ ), 2) погрешности определения теплофизических коэффициентов могут достигать  $\pm 10-20\%$ . Все это говорит о том, что для аттестации образцовых веществ необходимо обеспечить единство измерений, а также определить оптимальный уровень точности (около 3%).

Для измерения коэффициентов температуропроводности в диапазоне от  $-180$  до  $+700^\circ\text{C}$  во ВНИИМ разработан метод радиальных температурных волн в цилиндре и создана образцовая аппаратура для испытания материалов в интервале  $10^{-8}-10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}$  с погрешностью  $\pm 3\%$  [4-6]. Метод температурных волн имеет ценные метрологические особенности и позволяет проверить абсолютные измерения практически при любой температуре в интервале от  $-200$  до  $+1500^\circ\text{C}$ . Кроме того, возможны многократные измерения при фиксированной температуре.

Для измерения коэффициентов теплопроводности плохих проводников тепла в области  $0,05 \pm 1 \text{ вт/(м}\cdot\text{град)}$  при температурах  $20-100^\circ\text{C}$  была изготовлена аппаратура, основанная на методе стационарного потока тепла [7]. Погрешность измерений достигает  $\pm 3\%$ . Отличительной особенностью осуществления этого метода является вынужденная стабилизация теплопередачи с поверхности испытываемого образца путем пропускания по трубкам, помещенным на образце, воды из термостата, поддерживающего температуру в пределах  $\pm 0,05 \text{ град}$ .

На установках ВНИИМ были определены тепловые коэффициенты некоторых полимеров. Результаты обработаны методом наименьших квадратов. Коэффициент температуропроводности полиметилметакрилата ( $\gamma = 1179 \text{ кг/м}^3$ ) найден для трех образцов из двух партий материала методами температурных волн и акалориметра. При этом сравнение коэффициентов температуропроводности материалов из одной партии показывает, что расхождения между ними не превосходят 2% при 20°С и 4% при 85°С. Эти расхождения находятся в пределах систематических погрешностей обоих методов. Усредненная зависимость коэффициента температуропроводности по результатам всех определений (68 экспериментальных точек) может быть представлена в следующем виде:

$$a = 1,17(1 - 0,0019t) \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{сек.}$$

Это уравнение справедливо для температур в интервале 20—80°С. Отклонения прямых, полученных для отдельных образцов, от усредненной зависимости для всех образцов не превышает 3%. Среднее значение абсолютных отклонений экспериментальных точек от прямой для каждого из образцов составляет около 1%.

Коэффициент теплопроводности полиметилметакрилата для двух образцов связан с температурой линейной зависимостью:

$$\lambda = 0,184(1 + 0,00031t) \text{ вт/(м} \cdot \text{град)}.$$

Данное уравнение получено по 34 экспериментальным точкам в интервале температур 9÷81°С. Среднее значение абсолютных отклонений отдельных точек от сглаженной прямой составляет 1%.

Коэффициент температуропроводности политетрафторэтилена ( $\gamma = 2180 \text{ кг/м}^3$ ) был измерен в интервале от -180 до +315°С методом радиальных температурных волн и методом акалориметра. В интервале 40÷315°С измерения выполнены на четырех образцах из различных партий материала, а при более низких температурах — на одном образце. В температурном интервале 90÷315°С справедливо уравнение

$$a = 1,27(1 - 0,0012t) \text{ м}^2/\text{сек.}$$

полученное по 36 экспериментальным точкам. Среднее значение абсолютных отклонений экспериментальных точек от сглаженной прямой составляет 2%.

Коэффициент теплопроводности политетрафторэтилена, определенный по 29 экспериментальным точкам в интервале температур 26÷143°С, равен

$$\lambda = 0,216(1 + 0,00102t) \text{ вт/(м} \cdot \text{град)}.$$

Среднее значение абсолютных отклонений отдельных экспериментальных точек от сглаженной прямой составляет 1,5%.

Тепловые коэффициенты были найдены также для эбонита, полистирола, полиэтилена высокого давления и других веществ.

Определение тепловых коэффициентов пластических масс имело целью выбрать образцовое вещество для плохих проводников тепла в области средних температур. В качестве такого образцового вещества можно рекомендовать полиметилметакрилат, тепловые коэффициенты которого являются линейной функцией температуры с небольшим температурным коэффициентом. Для окончательного вывода о пригодности политетрафторэтилена для градуировки и поверки приборов в более широком интервале температур (50÷250°С) необходимо исследовать

зависимость его тепловых коэффициентов от степени кристалличности и других физико-химических параметров.

Ближайшие работы лаборатории тепловых измерений в области плохих проводников тепла будут направлены на изыскание образцовых веществ для температур до  $1000 \div 1500^\circ\text{C}$  и создание образцовой аппаратуры для измерений при этих температурах.

Работы лаборатории в области полупроводников пока находятся в начальной стадии. Существующие методы измерения тепловых коэффициентов полупроводников основываются главным образом на закономерностях стационарного теплового поля. Созданная аппаратура в своей основе имеет стационарный метод в модификации «двух пластин» [8]. Температурный интервал измерений от  $-180$  до  $+700^\circ\text{C}$ . В настоящее время в лаборатории исследуются новые варианты аппаратуры и изучается вопрос об образцовых веществах для полупроводниковых материалов. Кроме того, уже созданы первые типы приборов для измерения коэффициентов теплопроводности плохих проводников с  $\lambda = 0,1 \div 1,5 \text{ вт/(м} \cdot \text{град)}$  [9].

В дальнейшем необходимо решить ряд метрологических вопросов в области измерения теплопроводности и температуропроводности металлов и сплавов, обеспечить единство измерений теплоемкости, разработать точные методы и создать соответствующие приборы для теплофизических измерений и внедрить их в практику.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дульнев Г. Н., Олейник Б. Н., Платунов Е. С., Современное состояние и основные задачи теплового приборостроения, Изв. высших учебных заведений (Приборостроение), т. 4, № 6, 1961.
2. Кондратьев Г. М., Регулярный тепловой режим, Гостехиздат, 1954.
3. Кондратьев Г. М., О теплоизоляторах с устойчивыми тепловыми свойствами, Сб. работ ЛИТМО, вып. 12, 1954, стр. 124.
4. Кириченко Ю. А., Измерение температуропроводности методом радиальных температурных волн в цилиндре, «Измерительная техника», № 5, 1960.
5. Кириченко Ю. А., Метод и аппаратура для измерения коэффициента температуропроводности с помощью температурных волн, Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 51 (111), 1961.
6. Кириченко Ю. А., Определение теплофизических коэффициентов методом температурных волн, ИФЖ, т. 4, № 5, 1961.
7. Олейник Б. Н., Аппаратура для измерения коэффициента теплопроводности плохих проводников тепла, «Новые измерительные приборы и методы их поверки», вып. 10, 1962.
8. Лейкум В. И., Олейник Б. Н., Созинов Г. Я., Об измерении теплопроводности полупроводников, Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 51 (111), 1961.
9. Ипатов Ю. С., Лейкум В. И., Олейник Б. Н., Патоянская З. К., Приборы для измерения теплопроводности, Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 63 (123), 1962.

## ДИЛАТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

В метрологической практике проблема дилатометрических измерений может быть разделена на две части:

1) исследования с целью определения значений температурных коэффициентов удлинения эталонов длины, от степени знания точности которых зависит точность измерения эталонов;

2) разработка методов и приборов для определения температурных коэффициентов удлинения образцов различных материалов при изучении физических свойств этих материалов в широком диапазоне температур.

В первом случае дилатометрические измерения играют вспомогательную роль при решении других метрологических задач, во втором случае исследования представляют самостоятельный интерес. Поэтому возникает важная метрологическая задача поддержания единства дилатометрических измерений.

До последнего времени исследованиям в области дилатометрии во ВНИИМ уделялось мало внимания. В основном была решена лишь задача определения температурных коэффициентов удлинения штриховых эталонов длины.

Первые наиболее точные определения температурных коэффициентов платино-иридиевых эталонов длины были произведены в Международном бюро мер и весов Бенуа и Гильомом в 1888 г. В Главной палате мер и весов первые определения температурных коэффициентов удлинения проводились в 1897 г. Ф. И. Блумбахом и Н. И. Адамовичем под руководством Д. И. Менделеева при выполнении работ по возобновлению русских прототипов мер [1, 2].

Позднее выполнялись работы по определению температурных коэффициентов удлинения штриховых эталонов длины. Для концевых или геодезических мер большой длины были проведены лишь отдельные исследования, частично решавшие задачу разработки методов и средств определения температурных коэффициентов удлинения этих мер. Практически ВНИИМ не занимался дилатометрическими исследованиями образцов материалов в широком диапазоне температур. Некоторые работы в этой области были выполнены во ВНИИФТРИ П. Г. Стрелковым или под его руководством [3, 4].

К концу 60-х годов оказалось необходимым решить несколько задач, связанных с созданием

- 1) специальной дилатометрической установки для исследования образцовых плоскопараллельных концевых мер длиной до 1 м;
- 2) 24-метровой дилатометрической установки для исследования геодезических проволок, применяемых при измерении базисов;
- 3) дилатометра для исследования образцов различных материалов абсолютным методом в широком диапазоне температур (20 ÷ 850° С).

#### Дилатометрические исследования эталонов и образцовых мер длины

Длина меры  $l_t$  есть некоторая функция ее температуры  $t$ :

$$l_t = f(t).$$

Если длина меры равна  $l_0$  при некоторой начальной температуре  $t_0$ , то

$$l_t = f[t_0 + (t - t_0)],$$

и, ограничиваясь первыми членами ряда, имеем

$$l_t = l_0 + \left(\frac{df}{dt}\right)_0 (t - t_0) + \frac{1}{2} \left(\frac{d^2f}{dt^2}\right)_0 (t - t_0)^2.$$

Обозначая через  $\alpha$  и  $\beta$  коэффициенты при переменных  $(t - t_0)$ , получим

$$l_t = l_0 + \alpha(t - t_0) + \beta(t - t_0)^2.$$

Задача дилатометрических исследований эталонов длины сводится к опытному определению значений коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  их температурных формул. Температурные коэффициенты можно определять при статическом или динамическом температурных режимах.

Определяя  $\alpha$  и  $\beta$  в статических температурных условиях, длину исследуемой меры или образца измеряют после длительной (в течение нескольких часов) выдержки при заданной программой температуре.

В случае исследования в динамическом режиме длину меры или образца измеряют в процессе непрерывного изменения их температуры. Из-за некоторого температурного запаздывания погрешности определения  $\alpha$  и  $\beta$  у мер, найденных динамическим методом, будут несколько больше, чем статическим.

При этом штриховые эталоны исследуют на однометровом универсальном или четырехметровом геодезическом компараторах абсолютным либо относительным методом.

В случае абсолютного метода длину исследуемой при различных температурах (обычно в интервале 0—35° С) меры сличают с длиной образцовой меры. Температуру образцовой меры поддерживают примерно постоянной в течение всего процесса исследования.

В относительном методе разность длин образцовой и исследуемой меры измеряют при различных температурах.

Температурные коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  образцовой меры должны быть известны с соответствующей точностью.

Обычно производятся 5—7 серий измерений длины при различных температурах, и значения коэффициентов вычисляют, решая систему уравнений, по способу наименьших квадратов.

Погрешность определения температурных коэффициентов удлинения эталонов длины компараторным методом не превосходит  $\pm 3 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup>, что удовлетворяет самым высоким требованиям точности измерения длины.

Попытки применить компараторный метод для определения температурных коэффициентов удлинения концевых мер длины не увенча-

лись успехом, так как «боковички», притираемые к мере, не позволяют помещать ее в воду, а исследования в воздухе значительно снижают точность результатов измерений.

В настоящее время в связи с высокими требованиями к точности измерения длины концевых эталонов и образцовых мер высших разрядов необходимо иметь специальные dilatометрические установки для исследования плоскопараллельных концевых мер.

В 1947 г. Е. А. Волковой во ВНИИМ создан прибор для исследования интерференционным методом в динамическом режиме концевых мер длиной до 100 мм. На этом приборе значение коэффициента  $\alpha$  определяется с погрешностью порядка  $\pm 2 \cdot 10^{-7} \text{ град}^{-1}$ .

В 1961 г. М. Ф. Гречко, Л. И. Смирновой и О. Ю. Шошиной во ВНИИМ была создана dilatометрическая установка для определения абсолютным методом температурных коэффициентов удлинения плоскопараллельных концевых мер длиной 100—1000 мм в интервале температур  $10 \div 30^\circ \text{C}$ .

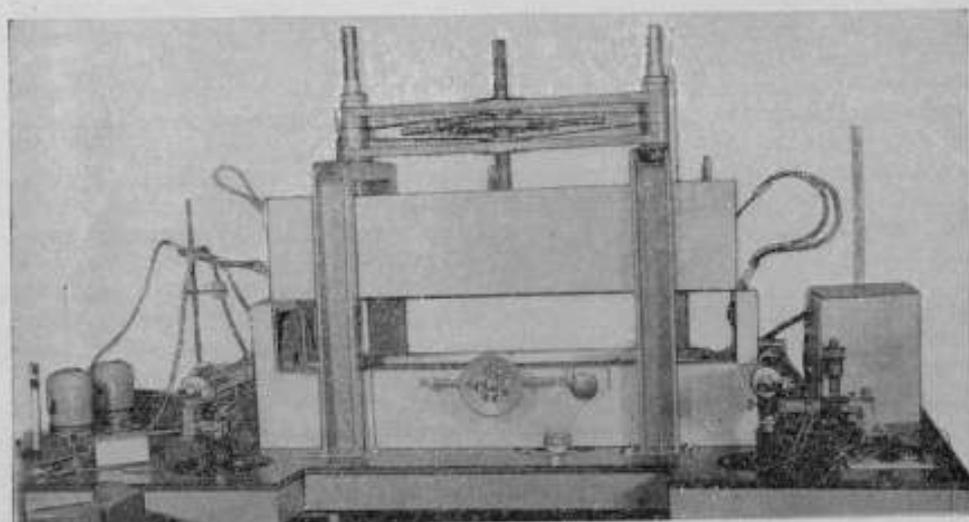


Рис. 1. Установка для определения температурных коэффициентов удлинения концевых мер длины 100—1000 мм.

Установка (рис. 1) состоит из термокамеры и устройств для измерения изменений длины и температуры исследуемой меры.

Камера изготовлена в виде двух concentrically расположенных герметичных красно-медных полуцилиндров. В наружном цилиндре размещены тонкостенные трубы, а во внутреннем — имеются каналы-пазы.

При исследованиях по обеим системам каналов непрерывно циркулирует вода, температура которой задается ультратермостатом типа ТС-15 с погрешностью  $\pm 0,05 \text{ град}$ .

Исследования показали, что задаваемую температуру внутри термокамеры можно поддерживать в течение нескольких часов с колебаниями  $\pm (0,01—0,02) \text{ град}$ . При этом температурный градиент вдоль меры равен  $0,002—0,003 \text{ град}$ . Температуру меры измеряют с помощью двух медь-константановых дифференциальных термпар. Изменение длины меры при изменении температуры внутри камеры измеряют автоколлимационным методом следующим образом.

Два подвижных блока зеркал крепятся на инварном направляющем стержне, расположенном внутри камеры. Измерительные наконечники зеркал левого и правого блоков соосны, перпендикулярны измерительным поверхностям меры и находятся в контакте с ними. Мера свободно лежит на двух вращающихся роликах.

При изменении температуры внутри камеры изменяются длина меры и угол между подвижным и неподвижным зеркалами блоков.

С помощью автоколлиматоров (в установке их два) типа ПКГ-2 с ценой деления окулярного микрометра  $0,25''$  измеряют учетверенные углы поворота подвижных зеркал. Как показали исследования, суммарная предельная погрешность измерения удлинения меры длиной 1 м не превышает  $\pm 0,3$  мкм.

При изменении температуры внутри камеры длина инварного стержня и, следовательно, расстояние между точками крепления блоков зеркал будут изменяться, что может исказить результаты измерения длины.

Для компенсации изменения длины стержня рамка неподвижного зеркала изготовлена из латуни, а точка закрепления рамки на стержне смещена в сторону от оси рычага так, чтобы изменение размера латунной рамки компенсировало (по величине и направлению) изменение длины инварного стержня.

Исследования показали, что температурные коэффициенты удлинения  $\alpha$  концевых мер на установке могут быть определены с погрешностью порядка  $\pm 5 \cdot 10^{-8}$  град $^{-1}$ .

Ввод в действие однометрового дилатометра позволяет повысить точность поверки образцовых концевых мер 1-го разряда, поскольку можно определить точные значения их температурных коэффициентов удлинения.

Следующая задача, которую необходимо было решить, относится к исследованиям температурных коэффициентов удлинения мер большой длины, таких, как 24-метровые геодезические проволоки и шкаловые ленты. Возможности повышения точности компарирования геодезических проволок ограничивались тем, что очень часто были неизвестны точные значения их температурных коэффициентов. Это снижало и точность линейных измерений, выполняемых с помощью проволок.

Необходимость создания дилатометрической установки большой длины вызывается тем, что значения температурных коэффициентов удлинения 24-метровых проволок могут значительно отличаться от значений коэффициентов, вычисленных по результатам исследования коротких отрезков, как это делалось прежде в Международном бюро мер и весов [6]. Более того, по литературным данным известно, что коэффициенты инварных проволок с течением времени значительно изменяются [7] и вследствие этого погрешности измерений геодезических базисов возрастают. Экстраполяция значений коэффициентов для температур вне интервала их определения также является источником дополнительных погрешностей [8].

Дилатометрическая 24-метровая установка (рис. 2), созданная во ВНИИМ в 1961 г. (основные исполнители С. И. Торопин и Л. К. Каяк), служит для исследования абсолютным методом 24-метровых геодезических проволок и 20-метровых шкаловых лент в диапазоне температур от  $-5^{\circ}\text{C}$  до  $+35^{\circ}\text{C}$ . Длина исследуемых на установке ВНИИМ проволок или лент, помещенных внутри термокамеры под натяжением и при свободном провисе, измеряется сличением с длиной образцовой инварной проволоки, имеющей известный температурный коэффициент. Эта проволока подвешена на блоках вне камеры и находится во время исследования при относительно постоянной температуре.

Сличения проводятся с помощью специальных микроскопов  $60\times$  с двумя объективами и окулярным микрометром. Конструкция микроскопов позволяет одновременно (или поочередно) наблюдать штрихи шкал образцовой и исследуемой проволоки и с помощью спирального микрометра измерить разность их длин. Температуру проволок измеряют дифференциальными термометрами.

Термокамера установки состоит из трех, концентрично расположенных, металлических труб. В пространство между стенками средней и внутренней труб по специальному воздухопроводу подается нагретый или охлажденный воздух.

Установка имеет два вентилятора: один для подачи воздуха в термокамеру, а другой для откачки его из пространства между наружной и средней трубами. Для подогрева воздуха имеется нагревательная печь с автоматическим терморегулятором, а для охлаждения — холодильник. Термокамера и трубопроводы имеют снаружи тепловую изоляцию. Циркуляция воздуха в замкнутой системе: нагреватель (холодильник) — трубопровод — термокамера внутренняя — термокамера наружная — трубопровод — нагреватель (холодильник) во время исследования может происходить непрерывно.

На установке ВНИИМ коэффициенты удлинения 24-метровой проволоки на всю длину меры определяются с погрешностью не более  $\pm 1 \text{ мкм} \cdot \text{град}^{-1}$  для  $\alpha$  и не более  $\pm 0,02 \text{ мкмк} \cdot \text{град}^{-2}$  для  $\beta$ .

#### Дилатометрические исследования материалов

До последнего времени во ВНИИМ не проводились систематические исследования, связанные с определением температурных коэффициентов удлинения материалов. Лишь эпизодически они определялись компараторным методом для метровых образцов (инвар или сталь) в интервале температур  $0 \div 30^\circ \text{C}$  и на относительном дилатометре Цейсса определялось значение  $\alpha$  в интервале  $20 \div 100^\circ \text{C}$ .

Необходимого оборудования для исследований температурных коэффициентов абсолютным методом в широком интервале температур (до  $850^\circ \text{C}$ ) во ВНИИМ не было, хотя методы и приборы для таких работ уже имелись [9—11].

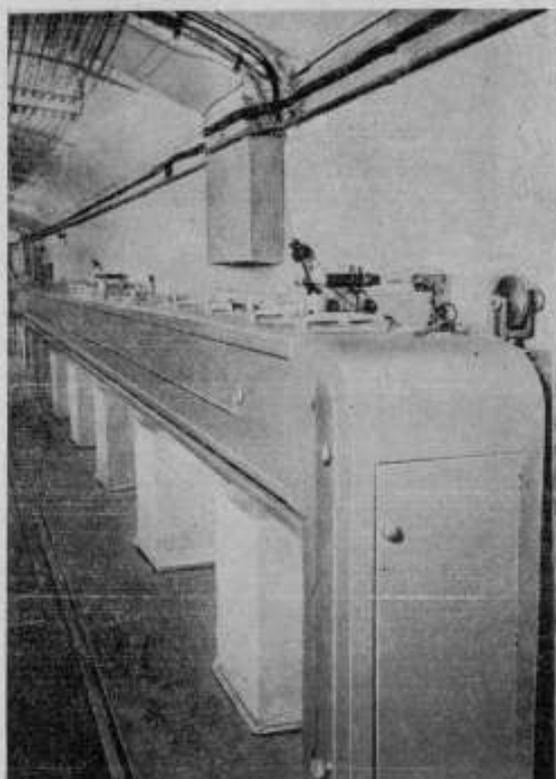


Рис. 2. Дилатометрическая 24-метровая установка.

В промышленности для исследования образцов материалов применяют dilatометры различных конструкций. Обычно — это относительные dilatометры, и в них температурный коэффициент исследуемого материала определяется сравнением с известным температурным коэффициентом исходного образца.

По литературным данным, погрешности определения  $\alpha$  на различных относительных dilatометрах колеблются в широких пределах  $1 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-5}$ .

Исходные образцы для относительных dilatометров чаще всего изготавливаются из плавленного кварца, пирокса и специальных сортов стекла.

В связи с отсутствием приборов для измерения  $\alpha$  исходных образцов их значения, как правило, берутся из литературных данных, что не может обеспечить возросшие в последнее время требования прецизионного приборостроения, станко- и машиностроения к точности определения физических характеристик материалов и, в первую очередь, их температурных коэффициентов удлинения. Когда требования к точности определения  $\alpha$  значительно повысились, стали обнаруживаться расхождения между результатами определения его для одного и того же материала разными методами на различных приборах, а это потребовало обеспечить единство dilatометрических измерений в стране на высоком уровне. Во ВНИИМ было решено, в первую очередь, создать dilatометры для определения  $\alpha$  образцов материалов абсолютным методом с погрешностью не более  $5 \cdot 10^{-8} \text{ град}^{-1}$ .

Такой прибор дает возможность определить  $\alpha$  материалов, из которых изготавливаются образцы для относительных dilatометров. Для определения  $\alpha$  с погрешностью порядка  $5 \cdot 10^{-8} \text{ град}^{-1}$  необходим метод, позволяющий измерять удлинение образца с погрешностью, не превышающей 0,1 мкм. Максимальные разности температур  $\Delta t$  по длине образца не должны превышать 0,2 град при 200°С, 0,5 град при 600°С и 1,0 град при 800°С.

Погрешности измерения абсолютного значения температуры образца не должны превышать значений, приведенных в таблице.

Температура образца °С	Погрешность измерения температуры, град
20	0,01
100	0,05
200	0,10
300	0,15
400	0,20
500	0,25
600	0,30
700	0,35
800	0,40

В 1961—1962 гг. во ВНИИМ был создан интерференционный dilatометр (основной исполнитель А. Н. Королева), позволяющий определять  $\alpha$  образцов различных твердых материалов, абсолютным методом в стационарных температурных условиях.

Основные части его (рис. 3): труба с автоколлимационным приспособлением 1, интерферометр, электрическая печь 2, терморегуляторы 3.

Интерферометр (рис. 4) состоит из двух кварцевых пластин 2 и 4, между которыми помещается исследуемый образец 3, изготовленный так, что он соприкасается с каждой из пластин в трех точках. Так как опорные поверхности образца не параллельны, то при освещении интерферометра параллельным пучком монохроматического света можно наблюдать интерференцию равной толщины. Длина образца при заданной температуре определяется по разности хода

двух интерферирующих пучков монохроматического света, отражающихся от верхней поверхности нижней пластины и нижней поверхности верхней пластины. Целый порядок интерференции устанавливается по

совпадению дробных частей порядков интерференции в нескольких спектральных линиях, лежащих в различных частях спектра.

Для создания минимальных перепадов температур по высоте образца, установленного между пластинами, его заключают в металли-

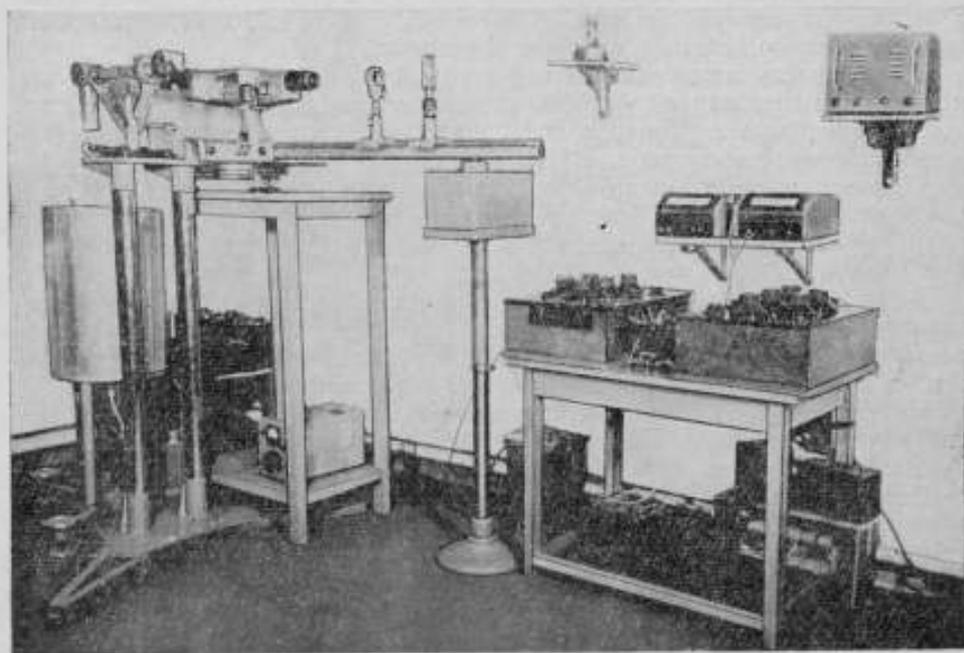


Рис. 3. Интерференционный dilatометр.

ческий блок *I* и помещают в электрическую шахтную печь *5*, являющуюся в то же время и термостатом. Печь имеет три обмотки: основную — *II*, служащую для нагрева образца и расположенную по всей высоте печи, и две дополнительные *I* и *III*, служащие для выравнивания температуры по высоте печи и расположенные соответственно в верхней и нижней ее частях.

В печи длительное время может поддерживаться постоянная температура. При этом используется метод двухпозиционного регулирования неполным притоком [12] по схеме фотоэлектрического терморегулятора.

В установке имеются три терморегулятора. Один действует от изменения т. э. д. с. платиновой-платиновой термопары, размещенной в канале металлического блока, и управляет включением и выключением нагрузки основной обмотки *II* печи. Два других регулятора управляют работой дополнительных обмоток *I* и *III* печи, действуя в том случае, когда неодинаковы температуры спаев дифференциальных термопар, размещенных в каналах металлического блока и включенных на гальванометры.

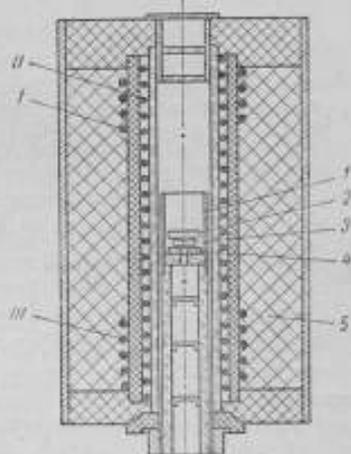


Рис. 4. Схема печи-термостата.

Термопара, регулирующая работу основной обмотки печи, включается в компенсационную схему с высокочувствительным низкоомным потенциометром.

Температура образца измеряется при помощи двух платино-родий-платиновых высокоточных термопар, которые при работе размещаются в непосредственной близости от образца; т. э. д. с. их измеряется на компенсационной схеме с высокой точностью.

Погрешность измерения температуры термопарой в нашем случае можно положить равной  $\pm 0,05\%$  перепада температуры вдоль электродов. Градуировка термопар производилась по эталонным приборам термометрической лаборатории ВНИИМ.

Совместная работа печи и терморегуляторов исследовалась при различных температурах. Было установлено, что при заданном значении температура печи в течение всего периода работы терморегуляторов изменяется не более, чем на  $\pm 0,05$  град.

Температурное поле печи в зоне, лежащей вблизи образца, исследовалось с помощью специальной дифференциальной платино-родий-платиновой термопары. Исследования показали, что разность температур на длине 30 мм не превосходит 0,2—0,3 град.

На установке с целью экспериментального ее исследования были определены коэффициенты образцов плавленного кварца, платино-придия, инвара и стекла сорта 23.

Есть основания считать, что установки, созданные в результате выполненных во ВНИИМ в 1959—1962 г. работ в области дилатометрии, будут способствовать не только успешному решению задачи повышения точности линейных измерений, но и проведению новых исследований, которые дадут возможность обеспечить единство и правильность измерений в области дилатометрии.

В настоящее время во ВНИИМ ведутся работы по созданию дилатометра для определений температурных коэффициентов удлинения материалов абсолютным методом в интервале температур от  $+20$  до  $-190^\circ\text{C}$ . Кроме того, предполагается создать установку для определения  $\alpha$  материалов в интервале температур  $+800$  :  $+1500^\circ\text{C}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Адамович Н. И., Временник, вып. 1(13), 1925.
2. Афанасьев М. А., Труды ВНИИМ, вып. 22 (38), 1939.
3. Стрелков П. Г., ЖЭТФ, т. 5, 1935, стр. 1502.
4. Стрелков П. Г., Косоуров Г. И., Самойлов Б. И., Изв. АН СССР, т. XVII, № 3, 1953.
5. Волкова Е. А., Труды ВНИИМ, вып. 7 (67), 1949.
6. Бариннов В. А., Труды ВНИИМ, вып. 14 (30), 1936.
7. Бариннов В. А., Труды ВНИИМ, вып. 22 (38), 1939.
8. Ларян Б. А., Труды ЦНИИГАиК, вып. 94, Геодезиздат, 1953.
9. Saunders I. V., J. Research NBC, v. 35, 1945.
10. Kishi T., Travaux du 4-e Congrès international du verre. Paris, 2 au 7 juillet, 1956. (Paris, impr. chaix, 1957).
11. Chevenard, Trav. et Mém. VJPM, t. XVII, 1927.
12. Кампе-Немм А. А., Динамика двухпозиционного регулирования, Госэнергоиздат, 1955.
13. Moser H., Temperature. Its measurement and control in science and industry, v. 3, pt. 1, p. 167.

### О СОСТОЯНИИ И ПЕРСПЕКТИВАХ РАБОТ В ОБЛАСТИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Физическая химия была обоснована более 200 лет назад нашим гениальным соотечественником М. В. Ломоносовым, однако утверждение физической химии как науки сделано трудами Д. И. Менделеева и Н. Н. Бекетова. Первый курс физической химии прочитан в Харьковском университете Н. Н. Бекетовым в 1864 г. и только около двух десятков лет спустя за рубежом — Оставальдом.

Периодическая система элементов, открытая в 1869 г. Д. И. Менделеевым, послужила основой возникновения и развития ряда важнейших областей физической химии. Сам Д. И. Менделеев выполнил ряд работ, составляющих фундамент этой науки.

В 1860 г. в результате исследования поверхностного натяжения жидкостей Д. И. Менделеев предсказал существование критической точки за 9 лет до опубликования экспериментальных работ Эндрюса.

Фундаментальное уравнение состояния газов — уравнение Менделеева — Клапейрона  $pV = nRT$  — составляет основу учения о газах и растворах и такой важной науки, как химическая термодинамика. Оно выведено Д. И. Менделеевым в 1874 г. при сочетании законов Бойля — Мариотта, Гей-Люссака и Авогадро.

Клапейрон в 1834 г. предложил лишь более частное уравнение на основе сочетания законов Бойля — Мариотта и Гей-Люссака без учета закона Авогадро. Оно содержало индивидуальную постоянную, зависящую от вида и количества газа, в то время как в уравнении, выведенном Д. И. Менделеевым, эта постоянная не зависела ни от вида газа, ни от его количества.

Найденная Менделеевым величина  $R$  стала известна как универсальная газовая постоянная и является теперь одной из важнейших величин в науке.

Д. И. Менделеев провел крупные работы в области теории растворов. Вплоть до 20-х годов XX в. положение Аррениуса о том, что сильные электролиты лишь частично диссоциируют в растворе, не подвергалось сомнению. Заслуга Д. И. Менделеева заключается в том, что уже в 1902 г. он указал на ряд фундаментальных противоречий с опытом, возникающих при приложении теории Аррениуса к сильным электролитам. Дальнейшие исследования в этой области подтвердили правильность заключения Менделеева.

Менделеев был сторонником так называемой химической теории растворов. Он рассматривал растворы как химическое соединение растворяемого вещества с растворителем (сольваты или гидраты). Последующее развитие науки показало плодотворность этой идеи. Современную протолитическую теорию кислот и оснований можно считать развитием идей Д. И. Менделеева в теории растворов.

Значительную научную ценность представляют исследования Д. И. Менделеева в области катализа. В 1886 г. он правильно объяснил явление контактного катализа деформаций адсорбированных молекул на поверхности катализатора и гетерогенного катализа, т. е. катализа в объеме. Менделеев считал, что на поверхностях соприкосновения изменяются расположение и состояние движения атомов в молекулах, благодаря чему нарушается стойкое равновесие в последних. Это объяснение весьма близко к современному. Таким образом, можно сказать, что Д. И. Менделеев заложил фундаментальные основы физической химии и его работы во многом способствовали развитию этой науки.

Фактически Д. И. Менделеев впервые в России начал исследования по применению физико-химических явлений для измерений. Он считал, что главным свойством жидкости является ее плотность. В своих классических работах по плотности жидкостей он искал такие характеристики, которые отражали бы индивидуальные их свойства в форме общих закономерностей. Так, еще в 1860 г. Д. И. Менделеев установил, что выражение  $dp/dt$  проще зависит от состава, чем  $dV/dt$ .

Позднее, в 1880—1883 гг., Д. И. Менделеев дал выражение для расширения жидкостей

$$V_t = (1 - kt)^{-1},$$

в котором, как писал, он, « $k$  есть особый постоянный коэффициент, характеризующий каждую отдельную жидкость, подобно удельному весу, температуре кипения, капиллярной постоянной и т. п., основным данным» и, далее, «сжимаемость от давления, сцепление, удельный вес, температура кипения, равно как и вес частиц, оказываются в очевидной связи с величиною этого коэффициента».

Классические работы Д. И. Менделеева по плотности не потеряли своей ценности, и полученные им результаты и высказанные идеи были использованы при изготовлении плотномеров для определений состава жидкостей.

Во времена Д. И. Менделеева еще не было условий для возникновения физико-химических измерений. Однако с тех пор в нашей стране произошли коренные изменения: повысился уровень техники и были созданы условия для быстрого развития новой отрасли измерений — физико-химических.

Особенностью современного технического развития является повышение требований к качеству материалов (сырье и продукция).

Удовлетворительное решение проблемы качества означает не только повышение надежности изделий в работе, но и возможность получения материалов с особыми свойствами, необходимыми для ряда новых областей техники.

Особенно важное значение этот вопрос приобретает в связи с намеченным широким развитием синтетической химии и использованием больших количеств полимерных материалов в машиностроении, электро-технической и других областях промышленности.

Практическое решение этой проблемы зависит прежде всего от осуществления надлежащего контроля за качеством сырья и продукции

в разных стадиях их переработки, т. е. от уровня и состояния измерительной техники.

Путь технического развития показал, что не только повысились требования к самой измерительной технике, но и появилась необходимость в создании ее новых форм, что особенно заметно на примере развития химической промышленности.

До настоящего времени центральной фигурой на химическом производстве является химик-аналитик, осуществляющий контроль производства. Классическое понятие об анализе вещества как о сумме последовательных процедур, выполняемых аналитиком для получения сведений о составе или свойствах вещества, полностью отвечало существу заводского контроля производства. На современном этапе, однако, классические формы контроля тормозят техническое развитие, так как они не могут стать основой современных высокоэффективных форм организации и оптимизации производства, достигаемых при помощи их автоматизации. Появилась необходимость в специальных аналитических приборах для получения объективной и непрерывной информации о составе и свойствах перерабатываемого материала и для обеспечения работы системы автоматического регулирования и саморегулирования процессов с применением счетно-решающих устройств.

При конструировании первых автоматических анализаторов было естественно стремление использовать разработанные аналитические процедуры, механизировав и автоматизировав производство отдельных аналитических операций. Однако первые автоматические анализаторы были довольно грубыми приборами, а их конструирование можно было сравнить с попытками установить современный мотор на шасси старомодного автомобиля. Значительный прогресс в аналитическом приборостроении произошел после того, как стали использовать связи между составом смесей и их физическими или физико-химическими свойствами. За последние 10—20 лет аналитическое приборостроение достигло высокого уровня: созданы приборы более чувствительные, дающие такую точность, какой нельзя было достигнуть классическими методами анализа.

Сейчас нет такого классического анализа, который в принципе невозможно было бы выполнить при помощи приборов. Аналитические приборы все больше входят в практику заводского контроля, вытесняют труд химика-аналитика и становятся неотъемлемой частью современного химического производства. Более того, контроль при помощи аналитических приборов оказался настолько эффективным, что он получает очень широкое распространение практически во всех областях техники, в сельском хозяйстве, технике безопасности, санитарии, биологии и медицине. Хотя это и становится теперь очевидным, вряд ли большинство специалистов ясно представляет себе, какие принципиальные изменения внес этот процесс в аналитическую технику.

Химик-аналитик на химическом предприятии в своей деятельности объединяет все основные элементы контроля: он выбирает метод анализа, проводит все операции с пробой, обрабатывает данные и устанавливает их точность. Он обеспечивает контроль технологии производства и отвечает за его правильность.

Ничего общего с этим не имеют определения на современных аналитических приборах, где данные о составе или свойствах исходного или перерабатываемого продукта непосредственно считываются со шкалы аналитического прибора или в виде электрического сигнала поступают на регулирующие устройства. В таких анализах химик-аналитик не принимает никакого участия. Приборы обслуживают специалисты совер-

шенно другой квалификации, в обязанности которых входит соблюдение установленных норм эксплуатации приборов и в случае необходимости их текущий ремонт.

Таким образом, на современных предприятиях, оборудованных специальными аналитическими контрольно-измерительными приборами, химик-аналитик как бы отстранен от функций контроля, поэтому должны быть найдены другие пути обеспечения правильности этого контроля. Действие современных аналитических приборов основывается на принципах сличения испытуемой пробы с образцом, которым в данном случае являются градуировочные смеси, что составляет характерный признак изменений вообще.

Таким образом, аналитические приборы являются измерительными и, следовательно, правильность показаний этих приборов, так же, как и всяких других измерительных приборов, должна быть обеспечена государственной метрологической службой.

Для существующей метрологической службы, однако, аналитические измерения оказались совершенно новыми. К ним она не была подготовлена историей своего развития; не создано было ни метрологических основ для такого рода измерений, ни необходимой образцовой аппаратуры. Широкое использование аналитической измерительной техники и расширение химических производств определяют большую важность и развитие этой новой области метрологии.

Речь, следовательно, идет не о необходимости проведения каких-то частных работ, пусть даже более или менее значительных, а о создании теоретических и практических основ новой отрасли метрологии и о создании в нашей стране новой отрасли метрологической службы. Это огромная работа, требующая исключительной мобилизации сил и средств. Именно эта цель и поставлена перед вашим старейшим в стране и созданным Д. И. Менделеевым метрологическим институтом. Мы считаем, что только продолжаем дело Д. И. Менделеева в рамках новых требований.

Остановимся теперь кратко на некоторых частных проблемах, разрабатываемых сейчас ВНИИМ.

Для современной техники измерение кислотности, или рН сред, имеет большое значение. Активность, степень кислотности, или рН, водных растворов является главным условием для поддержания оптимальных условий протекания реакций и обеспечения максимальных выходов и качества продукции. В США, например, около 20% выпускаемых рН-метров используются на предприятиях целлюлозной промышленности.

Поддержание определенной рН-среды чрезвычайно важно также для выращивания антибиотиков. Точное измерение рН раствора в аппарате «искусственная почка» помогает сохранить жизнь больному. Измерение рН имеет большое значение в области химизации социалистического земледелия, в том числе при нейтрализации (известковании) кислых почв, занимающих сотни тысяч гектаров в зонах избыточного увлажнения. Известно, что направление почвенных биохимических процессов меняется в зависимости от степени кислотности почвы. В сильно кислых почвах органические и минеральные удобрения мало эффективны. Для химизации таких почв проводится известкование, т. е. доведение их до слабокислой реакции с помощью соответствующих доз известковых материалов  $[CaCO_3, Ca(OH)_2]$ . Контроль кислотности в этом процессе крайне важен, так как внесение излишних доз извести может снизить эффективность органико-минеральных удобрений. На окультуренных

известкованием кислых почвах урожайность повышается иногда в 2—3 раза.

До недавнего времени измерения рН у нас в стране проводились бесконтрольно. Не была даже утверждена шкала рН.

В течение нескольких последних лет проводились работы по воспроизведению методов и аппаратуры, позволившие в качестве образцовых средств первого разряда получить буферные растворы с погрешностями в значениях рН не более  $\pm 0,01$ . Были выполнены точные измерения рН в цепях без переноса, создана система передачи значений рН к буферным растворам, употребляемым для настройки и поверки рабочих рН-метров.

На основе этих работ утверждены государственная шкала рН (ГОСТ 10170—62) и образцовые буферные растворы (ГОСТ 10171—62) для ее воспроизведения.

Производство этих образцовых растворов должно быть налажено на Киевском заводе чистых реактивов. Так как применяемые в прецизионной рН-метрии цепи без переноса не могут быть основой контроля производства из-за сложности и длительности самих определений, то буферные растворы первого разряда явились средством контроля качества поступающих в продажу образцовых растворов по ГОСТ 10171—62. При этом для контроля с применением цепей с переносом потребовалось и создание образцового рН-метра, имеющего определенную метрологическую характеристику. Надобность в таком рН-метре появилась также с внедрением в практику автоматических рН-метров для стандартизации потенциалов электродов или э. д. с. электродных систем.

Образцовый рН-метр был создан во ВНИИМ. Измеренные на нем значения э. д. с.  $E$  для эталонных буферных растворов с температурой  $25^\circ$  определяют угловой коэффициент  $\theta$  уравнения

$$E = E_0 + \theta \text{ рН},$$

отличающийся от теоретического только на 0,01%. Кроме того, отклонения  $E$  от линейной зависимости для всех эталонных растворов с рН от 1,63 до 9,18 определяются отклонениями, не превышающими значение, эквивалентное 0,01 рН. Создание рН-метра способствовало упорядочению в стране измерений рН. Требования развития науки и промышленности, однако, значительно расширяют объем необходимых метрологических работ. Имеется постоянная необходимость в уменьшении погрешностей измерений рН до 0,001—0,002 в расширении шкалы рН для температур растворов выше  $95^\circ\text{C}$ , в создании шкалы, поверочных средств и образцовой аппаратуры для измерений рН неводных растворов, в решении проблемы измерения рН концентрированных растворов, расширении шкалы ниже 1,1 рН или выше 9,18 рН, а также в разработке метрологических основ редоксиметрии.

Следует отметить, что проблемы создания единой шкалы рН и измерений рН в неводных средах должны найти свою плодотворную разработку на почве идей Д. И. Менделеева, рассматривающего растворы как гидраты и сольваты. Это подтверждается измерением энергии гидратации растворов и попытками применить эти данные при создании единой шкалы рН.

Весьма распространенным, если не самым главным, химическим сырьем являются естественные и технические газы. Газы — продукты многих технических процессов в металлургии, коксовании угля, переработки нефти и др. Определение содержания различных токсических или взрывоопасных газов или паров в воздухе является основным вопросом техники безопасности промышленных предприятий.

Неудивительно, что газоаналитические измерения относятся к числу важнейших. Газоанализаторы градуируются и поверяются по градуировочным или поверочным газовым смесям, использование которых для этих целей в значительных количествах становится весьма распространенным. Наиболее простым и в настоящее время доступным методом установления состава поверочных газовых смесей является их анализ. Однако при этом аналитический метод определения состава как бы становится в разряд средств, более высоких по точности, чем градуируемые аналитические приборы, а самому анализу придается несвойственный ему характер общей меры. Кроме того, в действительности аналитические приборы могут иметь точность, превышающую точность аналитических методов определения состава газа (т. е. точности состава поверочных или градуировочных смесей, аттестованных аналитическими методами).

При использовании аналитических методов для определения состава градуировочных или поверочных газовых смесей появляются и более серьезные затруднения.

Поверочные газы необходимо аттестовывать во многих поверочных лабораториях страны. В этих лабораториях потребуется специально организовать новые химические аналитические подразделения, что усложнит поверочные работы. Кроме того, аттестация будет производиться во многих лабораториях специалистами разной квалификации. Эти аттестации не являются рядовыми анализами, так как они будут определять правильность показаний множества измерительных приборов на многих предприятиях. Как же установить согласованность и правильность всех аттестаций, если в любом анализе заложены субъективные и скрытые систематические ошибки?

Опыт показывает, что в многообразии условий анализа какого-либо интересующего нас компонента газа, определяемых границами концентраций и составом газов-спутников, нельзя выбрать для этого газа какой-либо один «образцовый» метод анализа. Многие методы при хорошей воспроизводимости анализов могут давать значительные ошибки. Каким же образом можно установить действительно верный метод аттестации состава газа?

Чтобы упростить и упорядочить систему поверок газоаналитических приборов, необходимо отказаться от применения в контрольных лабораториях обычных аналитических методов аттестации поверочных газовых смесей и перейти к использованию образцовых газоанализаторов. Подобные образцовые приборы могут быть созданы, но для их градуировок и поверок требуются средства, имеющие точность на метрологический порядок выше, а аналитические методы этим средством быть не могут. Каким же образом и при помощи каких средств можно поверить и настроить такие приборы?

Выше отмечены только главные проблемы газоаналитических измерений, возникающие при внедрении этой новой измерительной техники, которые должны быть разрешены метрологической службой страны.

Во ВНИИМ, так же как и для рН-метрии, была разработана поверочная схема для газоанализаторов. По этой схеме в качестве первичных средств поверки приняты образцовые газы и газовые смеси первого разряда, степень чистоты и состав которых устанавливаются не обычными аналитическими, а более точными физическими методами на основе некоторых фундаментальных фактов и соотношений.

В институте в настоящее время создается образцовая установка, включающая в себя установки: по низкотемпературной ректификации газа, сорбционному разделению газовых смесей, по определению сте-

пени чистоты газа по постоянству давления насыщенных паров в разных частях пробы, по получению газовых смесей и секции для осуществления различных форм дистилляции и для запайки образцов в ампулы. Разрешение сформулированной задачи в аспекте высшего метрологического звена и выпуск в ампулах чистых газов и газовых смесей известного состава в качестве образцовых мер состава или свойств позволит:

- 1) произвести поверку и настройку образцовых газоанализаторов,
- 2) осуществить контроль точности аттестации поверочных и градуировочных газов разными лабораториями, а также контроль качества работы химиков-аналитиков,
- 3) установить действительные возможные погрешности определений при использовании разных аналитических методов,
- 4) выбрать для каждого данного случая анализа наиболее точный метод аттестации состава смеси,
- 5) осуществить в дальнейшем полный переход на инструментальный путь поддержания единства газоаналитических измерений методами сличения.

Таким образом, выпуск образцовых мер или рабочих эталонов газов и газовых смесей создает главную метрологическую базу для решения всех основных проблем газоаналитических измерений.

Намечено изучение поведения газов при смешении, что очень важно с метрологической точки зрения. Для этой цели разрабатывается соответствующая точная измерительная аппаратура. Последние работы можно также считать продолжением работ, начатых Д. И. Менделеевым.

Несколько иначе решается проблема поверок и градуировок газоанализаторов на макроконцентрации газов и паров. Здесь возможные примеси к газам даже при обычном методе их получения представляются величиной второго порядка по сравнению с количеством самого газа в воздухе. При этом проблема определения остаточных газов отсутствует, а задача получения поверочных или градуировочных смесей решается разработкой и применением образцовых дозаторов динамического типа надежнее и проще, чем с помощью аналитических методов. ВНИИМ и его Свердловский филиал приступили к практическому разрешению этой задачи.

Одной из первоочередных и важнейших задач общего характера в области других аналитических измерений мы считаем разработку прецизионной аппаратуры для определения степени чистоты кислотно-щелочных веществ. Для этой цели разрабатывается образцовая кулонометрическая установка. Мы считаем также плодотворной работу в развитие идеи о применении кулона как электрохимического эквивалента массы для стандартизации ряда химических веществ.

Здесь было упомянуто только о трех основных направлениях работы в области физико-химических измерений, которые в настоящее время уже ведутся в институте. Запросы и требования промышленности, однако, таковы, что область исследований в этом направлении должна быть значительно расширена.

Необходимо создать метрологическую базу для масспектрометрических и других спектроскопических измерений. Требуют разработки и другие разделы аналитических измерений. К весьма важным относятся также стандартизация свойств и качества синтетических полимерных материалов и составление официальных справочников физических, физико-химических и технических характеристик этих материалов.

## ИЗМЕРЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии им. Д. И. Менделеева работы по измерениям ионизирующих излучений проводятся в отделе, состоящем в настоящее время из трех лабораторий: радиометрической (организованной в 1918 г.), рентгенометрической (1924 г.) и нейтронной (1947 г.). Лаборатории отдела были организованы в разное время, в различной исторической и научно-технической обстановке, и их возникновение отражало потребность в развитии соответствующего вида измерений.

Естественно, что при жизни Д. И. Менделеева измерения ионизирующих излучений не могли входить в число основных проблем метрологии. Круг знаний в этой области был еще совершенно недостаточен, а практическое применение их слишком ограниченным. Однако развитие науки и техники уже в ближайшие годы после смерти Д. И. Менделеева привело к необходимости иметь более совершенные методы измерения ионизирующих излучений.

На рубеже XIX и XX вв. возникла новая наука — физика микромира. Успешно развиваясь, эта наука вызвала к жизни ряд новых технических дисциплин, приобретающих постепенно огромное значение. Сюда, прежде всего, следует отнести техническую электронику, включающую также и рентгенотехнику и ядерную технику (40-е годы XX в.).

Метрологической предпосылкой для организации радиометрической лаборатории явилось решение Международного конгресса по радиологии и электричеству (Брюссель, 1910 г.) об изготовлении эталона для измерений радия по его  $\gamma$ -излучению. В 1911 г. М. Кюри изготовила подобный эталон, а в 1912—1913 гг. в ряде стран (Франция, Германия, Англия, США, Швеция, Япония и др.) были получены вторичные эталоны радия. Таким образом, измерения радия вошли в круг вопросов, которыми занимаются национальные метрологические институты.

В дореволюционной России общее количество радия было очень мало, и поэтому сколько-нибудь существенных физических работ по радиоактивности не велось. Лишь отдельные русские ученые (Бородавский, Антонов, Коловрат-Червинский), находясь в длительных зарубежных командировках, проводили там экспериментальные исследования по отдельным вопросам радиоактивности. Один из крупнейших естествоиспытателей первой половины XX в., В. И. Вернадский, при-

ступил к глубоким и плодотворным исследованиям по минералогии, геологии и геохимии радиоактивных элементов. Он стремился организовать работу по систематическим поискам радиоактивных элементов на территории России с целью накопления достаточных запасов радия. В дореволюционной Академии наук В. И. Вернадский создал небольшую радиевую лабораторию, в которой начинали свою деятельность первые сотрудники радиометрической лаборатории Главной палаты мер и весов: Л. С. Коловрат-Червинский (1882—1921 гг.) и Л. Н. Богоявленский (с начала 1921 г.).

В первые годы после Великой Октябрьской социалистической революции при содействии Академии наук было организовано производство радия и уже в 1922 г. были получены первые отечественные препараты его. Главная тяжесть работы при этом легла на плечи молодого химика радиевой лаборатории В. Г. Хлопина — впоследствии академика и директора Радиевого института.

Производство радия потребовало соответствующих измерений, и в 1918 г. в Главной палате мер и весов была организована радиометрическая лаборатория, перед которой стали следующие основные задачи: приобретение вторичных международных эталонов и рабочих эталонов радия, создание и исследование аппаратуры для измерений. Параллельно с эталонными работами радиометрической лаборатория в 1925—1940 гг. проводила также исследования геофизического и биофизического характера. Хотя эти работы часто были не безошибочны, но они свидетельствовали о широте научных взглядов Л. Н. Богоявленского.

В 20-е годы широкое развитие получила медицинская радиология. Число рентгеновских установок, большей частью диагностических, измерялось уже тысячами. Рентгенотерапия нуждалась в развитии методов измерения, и в 1924 г. по инициативе А. Н. Бойко была основана рентгенометрическая лаборатория. Надо отметить, что тогда еще не существовало официально установленной единицы измерения, не было также единого мнения о том, какая физическая величина должна измеряться. Пожалуй, наиболее перспективным уже и тогда казался ионизационный метод измерений, однако технические средства его осуществления были несовершенны.

Приборы с ионизационными камерами появились с 1913 г. Ионизационный метод измерений наибольшее развитие получил в Германии, где за единицу измерения был принят «рентген» (очень похожий на ныне существующую единицу измерения). В 1924 г. в Германии имелись довольно хорошие дозиметры, градуированные в рентгенах. Всеобщее признание в качестве единицы измерения «рентген» получил лишь в 1928 г. на 2-ом Международном радиологическом конгрессе. В это время И. В. Поройков заканчивал исследование первой эталонной установки для воспроизведения рентгена. Сходные установки существовали в Москве и Киеве.

В 20-е годы в Главной палате мер и весов были организованы отделы, объединявшие родственные лаборатории. Радио- и рентгенометрические лаборатории вошли в состав отдела электрических единиц. При этом глубокая аналогия между рентгеновским и  $\gamma$ -излучением оставалась в то время в тени. Лишь только начиная с середины 30-х годов она привлекла пристальное внимание метрологов.

Период 30-х годов характеризуется успешной деятельностью рентгенометрической лаборатории в области исследования рентгеновских лучей, возникающих при напряжениях 60—200 кВ. В послевоенный период этот диапазон расширился до 5—25 000 кВ. В эти же годы

усиленно исследуются методы измерений дозы других видов ионизирующих излучений.

Около 1937 г. во ВНИИМ был создан отдел измерений лучистой энергии. Совершенно естественно в этот отдел была включена рентгенометрическая лаборатория. Сюда вошла также и радиометрическая лаборатория, хотя испускание радиоактивными веществами лучистой энергии ( $\gamma$ -излучения) — вторичное и вовсе не обязательное их свойство. (Это замечание, впрочем, не распространяется на самый важный в те годы радиоактивный элемент — радий.)

Наконец, в 1947 г., в период широкого развития работ по ядерной физике, возникли новая, нейтронная, лаборатория и отдел измерений ионизирующих излучений, объединивший радиометрическую, рентгенометрическую и нейтронную лаборатории.

На развитие радио- и рентгенометрических работ огромное влияние оказали идеи, связанные с периодической системой химических элементов, созданной Д. И. Менделеевым.

Для радиометрии прежде всего основное значение имеют свойства элементов, позволяющие их идентифицировать т. е. установить их природу. Распределение возникающих в детекторах ионизирующих излучений продуктов радиоактивного распада и различных ядерных реакций по соответствующим клеткам Периодической Системы — процесс обычный и обязательный в радиометрической практике. Не менее важным является вопрос о структуре отдельных клеток системы, т. е. идентификация уже не элементов, а изотопов данного элемента. Этот процесс приобрел решающую роль при нейтронных измерениях.

В рентгенометрии приходится учитывать иные явления: равномерное изменение каких-либо свойств по мере изменения атомного номера вещества, например, частоты характеристических рентгеновских спектров или коэффициентов взаимодействия излучения с веществом.

Последние десятилетия в науке ознаменованы бурным ростом успехов ядерной физики. Первостепенную важность поэтому приобрели ионизирующие излучения.

Отметим следующие обстоятельства, заставляющие с особым вниманием в настоящее время относиться к вопросам измерений ионизирующих излучений.

Развитие ядерной энергетики привело к созданию атомных электростанций, кораблей с ядерно-энергетическими установками. Первая атомная электростанция успешно эксплуатируется с 1954 г., первый в мире атомоход «Ленин» уже несколько лет бороздит льды Арктики. Производство искусственных радиоактивных изотопов для нужд народного хозяйства, промышленности, медицины достигло огромных размеров.

Чрезвычайно обогатились и наши знания по радиобиологии и радиационной медицине, в частности, довольно детально разработаны не только вопросы о вредном действии ионизирующих излучений на здоровье человека, но и эффективные способы контроля и защиты от излучений.

Немаловажным является вопрос о радиоактивных загрязнениях атмосферы продуктами ядерных испытаний. Так, к августу 1961 г. на поверхности земного шара выпало около  $5 \cdot 10^6$  кюри  $\text{Sr}^{90}$  и  $10 \cdot 10^6$  кюри  $\text{Cs}^{137}$ ; количество  $\text{C}^{14}$  в атмосфере увеличилось к середине 1963 г. приблизительно на 100%.

Исследования по физике элементарных частиц связаны с созданием гигантских ускорителей частиц с энергией в десятки миллиардов электрон-вольт.

За последние годы в связи с успехами в освоении космоса возникла и успешно развивается космическая дозиметрия, изучающая поле излучения в космическом пространстве вокруг Земли.

Чтобы охватить все области применения ионизирующих излучений, оказалось необходимым значительно расширить круг метрологических проблем. Отметим основные проблемы современной научной и прикладной метрологии:

1. Расширение диапазона измерений по энергии квантов или частиц.

В настоящее время приходится иметь дело с измерениями заряженных частиц и квантов с энергией от 1 кэв и до многих мегаэлектрон-вольт, а нейтронов — от тепловых (0,025 эв) и также до многих мегаэлектрон-вольт.

2. Расширение диапазона измерений по мощности дозы от природного фона или ниже, т. е. от 0,1 мкрад/ч до  $10^7$  рад/сек, и по дозе — до  $10^{10}$  рад.

3. Развитие методов измерений в смешанных полях, особенно « $\gamma$ -излучение + нейтроны».

4. Развитие методов измерений препаратов с очень низкими как активностью, так и удельной активностью, т. е. повышению чувствительности методов этих измерений.

Характерная черта многих научных и практических задач в области измерений ионизирующих излучений — необходимость одновременных измерений различных параметров в поле излучения: дозы различных видов излучения, активности радиоактивных источников, плотности нейтронных потоков, а также энергетического и углового распределения частиц или квантов. Это часто требует участия в измерениях всех трех лабораторий отдела.

Неизбежно возникает и крайняя необходимость в расширении экспериментальных методов, которыми широко пользуется метрология ионизирующих излучений. Особенно большое значение приобрели методы ядерной спектроскопии и ядерной электроники.

Задача исследования спектра  $\gamma$ -излучения всегда возникает при рассмотрении протяженных источников и процесса прохождения  $\gamma$ -излучения через вещество — ни одна задача, связанная с неточечным источником, по существу, не может решаться без учета спектра в поле излучения. Кроме того, с помощью спектральных исследований возможно наиболее точно идентифицировать изотопный состав излучателя.

Спектральные исследования  $\beta$ -излучения позволили установить простую зависимость между активностью источника и создаваемой им дозой.

Спектральные исследования  $\alpha$ -излучения дают возможность решить важнейшую задачу техники безопасности: идентифицировать в воздухе количества  $\text{Pu}^{239}$ , в 100—200 раз меньше по активности, чем фон от естественно радиоактивных веществ.

Исследования в области нейтронных измерений (спектральные измерения) открывают пути для решения основных задач техники безопасности при работе с нейтронами, так как довольно хорошо известна доза, приходящаяся на один нейтрон данной энергии.

Возможности, которые открывают перед нами успехи ядерной электроники, кажутся безграничными. Особенно важны они при конструировании измерительных приборов и установок и при исследовании смешанных полей излучения, так как форма и длительность импульсов в детекторе определяются природой вызвавшего этот импульс излучения.

Метрология ионизирующих излучений не может оставить без внимания и успехи в разработке таких теоретических вопросов, как тщательное исследование процессов взаимодействия излучения и вещества, применение к полям ионизирующих излучений общих законов векторного поля и, наконец, развитие метода операторов для сопоставления поведения в поле излучения измерительного прибора и облучаемой среды.

Партия и Правительство придают работам по мирному использованию атомной энергии огромное значение. Это обязывает метрологов приложить все усилия для разрешения тех задач, которые перед ними поставлены.

---

## НЕЙТРОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Слова Д. И. Менделеева о том, что «Посев научный взойдет для жатвы народной», очень хорошо подтверждаются в наше время, когда все достижения науки, а физики и химии в первую очередь, используются для создания материальных благ нашего общества.

Д. И. Менделеев предвидел бурное развитие физики и не только оставил в своей таблице ряд незаполненных клеток для элементов, которые еще не были известны в то время, но даже в конце таблицы предусмотрел место для элементов, которые получили название трансурановых.

Развитие ядерной физики вообще и нейтронной в частности дало возможность искусственно получать новые элементы. Как правило, это связано с бомбардировкой исходных веществ интенсивным пучком нейтронов и образованием нового компаунд-ядра в результате захвата одного или нескольких нейтронов или даже при взаимодействии с многозарядными ионами. В настоящее время уже получено 10 новых элементов, которые в таблице Д. И. Менделеева заполнили клетки с 93-й по 102-ю. Дань своего уважения величайшему ученому века отдали физики и в наши дни, назвав 101-й элемент *менделевием*.

Лаборатория нейтронных измерений — одна из самых молодых в отделе ионизирующих излучений ВНИИМ. Номинально образование лаборатории относится к 1947 г. С этого времени, вплоть до 1956 г., ее возглавлял Б. С. Джелепов. Вначале, практически почти 10 лет, лаборатория собственно нейтронными измерениями занималась очень мало и в основном проводила работы по некоторым применениям наиболее чувствительных методов детектирования нейтронов для решения задач ядерной спектроскопии. В этот период были разработаны два варианта делительных камер (плоскопараллельная многослойная и спиральная с использованием зеленой окиси урана  $U_3O_8$  [1]), изготовлены и исследованы борные счетчики различной конструкции, исследованы активационные методы (серебро, индий, родий и др.) с использованием как непосредственно измеряемой в них наведенной активности, так и активности с последующим обогащением (растворы перманганата калия  $KMnO_4$  и йодистого этила  $C_2H_5I$ ) для обнаружения и изучения по фотонейтронному эффекту жестких  $\gamma$ -лучей малой интенсивности некоторых радиоактивных изотопов. Такая методика давала возможность продвигаться на два порядка от  $10^{-3}$  до  $10^{-5}$  кванта на распад при обнаруже-

нии жестких  $\gamma$ -лучей [2] по сравнению с возможностями магнитных спектрометров того времени. В 50-е годы в лаборатории были созданы два магнитных спектрометра: «элотрон», позволяющий изучать  $\gamma$ -спектры радиоактивных веществ по электронам отдачи в диапазоне энергий  $\gamma$ -квантов от 600 кэв до 3 Мэв с разрешающей способностью 2,8% в районе 1 Мэв [3] и фотоэлектронный спектрометр типа «апельсин» для изучения  $\gamma$ -спектров радиоактивных веществ в более мягкой области 200–700 кэв [4].

В 1956 г. лаборатория ядерной спектроскопии выделилась в отдельную лабораторию; нейтронной лабораторией с 1956 по 1959 г. руководил А. С. Карамян.

К тому времени атомная энергетика нашла широкое применение в народном хозяйстве страны. Уже была введена в строй первая в мире атомная электростанция, строился атомный гигант «Ленин». Предстояло в короткий срок обеспечить народное хозяйство образцовыми нейтронными излучателями для всякого рода нейтронных исследований и градуировки нейтронных радиометров. В 1956 г. лаборатория нейтронных измерений располагала только одним  $\text{RaMsTh} + \text{Be}$  нейтронным источником, изготовленным в 1949 г. Следовало прежде всего оснастить лабораторию нейтронными источниками типа  $\text{Ra}-\alpha\text{-Be}$ ,  $\text{Ra}-\gamma\text{-Be}$ ,  $\text{Pu-Be}$  и рядом других, а также иметь источник быстрых монохроматических нейтронов. В связи с этим была разработана и изготовлена (на заводе «Эталон») ускорительная трубка для получения быстрых монохроматических нейтронов.

Уровень абсолютных нейтронных измерений в нашей стране в конце 50-х годов не был достаточно высоким, о чем говорят результаты международных сличений, проведенных Ларссоном [5]. Следовало разработать методы и создать как соответствующую аппаратуру для измерения абсолютного числа нейтронов, испускаемых источником, так и установки для передачи единицы плотности нейтронного потока образцовым мерам и приборам.

В результате предпринятых исследований в настоящее время в лаборатории разработаны три независимых метода абсолютных нейтронных измерений, каждый из которых может быть успешно использован для измерения числа испускаемых излучателем нейтронов.

В основу первого метода, предложенного А. С. Карамяном, положено сравнение потока от исследуемого излучателя с потоком нейтронов, получаемых по реакции  $\text{T}(\text{D}, \text{n})\text{He}^4$ . Так как в этой реакции каждому вылетающему нейтрону сопутствует одна  $\alpha$ -частица, то абсолютный счет этих частиц в данном телесном угле однозначно определяет число вылетающих из источника нейтронов. Реакция  $\text{T}(\text{D}, \text{n})\text{He}^4$  удобна также и тем, что угловое распределение получаемых быстрых монохроматических нейтронов изотропно в системе центра инерции, а вылетающие  $\alpha$ -частицы с энергией 3 Мэв можно легко зарегистрировать.

В среде, для которой длина замедления нейтронов меньше длины диффузии, можно найти такое расстояние от источника до детектора тепловых нейтронов (называемое расстоянием постоянной эффективности), на котором плотность нейтронов не зависит от их энергии, а определяется только интенсивностью источника. В работе лаборатории в качестве такой среды использовался графитовый шар, диаметром 4 м, собранный из большого числа (около 3000) деталей из графита. В центре шара имеется сферическая полость диаметром 40 см для тритиевой мишени с ионопроводом, которая вводится через горизонтальный канал диаметром 175 мм. Два наклонных

канала взаимно-перпендикулярны и пересекают шар вблизи центральной полости по хорде, близкой к диаметру. Эти каналы служат для измерения распределения нейтронов в шаре путем перемещения в канале детектора тепловых нейтронов. Для измерения распределения нейтронов в радиальном направлении используют вертикальный канал. Как вертикальный, так и оба наклонных канала (диаметр 90 мм) заполняются графитовыми вкладышами специальной конструкции. Для передвижения вкладышей, а следовательно, и детектора в наклонных каналах служит специальное измерительное устройство, состоящее из подающих и приемных частей.

Для детектирования нейтронов в графитовом шаре изготовлены счетчики, наполненные трехфтористым бором, обогащенным  $B^{10}$  до 83%. Специально рассчитанная конструкция мишенного узла и  $\alpha$ -счетчиков дает возможность измерять с высокой точностью абсолютное число  $\alpha$ -частиц. Расстояние постоянной эффективности, определенное по точке пересечения нормированных кривых пространственного распределения для нейтронов  $T(D, n)He^4$ ,  $Po-Be$  и  $Ra-Be(\alpha, n)$  источников в установке составляет 82 см. После градуировки графитового шара по быстрым монохроматическим нейтронам с энергией 14 Мэв и определении расстояния постоянной эффективности можно измерять число нейтронов, испускаемых  $Ra-Be(\alpha, n)$ ,  $Ac-Be$  и другими нейтронными источниками, просто помещая детектор на расстоянии постоянной эффективности. Ускорительную трубку при этом выводят из шара, а измеряемый нейтронный источник помещают в центре сферической полости шара. Тогда выход нейтронного источника находят просто путем относительных измерений.

Для того чтобы мишень облучалась равномерно, была рассчитана и исследована система отклонения пучка дейтонов в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. Равномерность облучения мишени достигалась воздействием на пучок заряженных частиц двух взаимно-перпендикулярных магнитных полей с различными частотами. Диапазон измерения на этой установке находится в пределах  $10^4 \div 10^9$  нейтр/сек, погрешность 1,5%. (Основные исполнители: В. Т. Шеболев, Ю. С. Силин, Г. М. Стуков, Р. П. Кресс и Б. И. Кузаев.)

В настоящее время применяется также другой метод абсолютных измерений — метод активации марганца. Он основан на измерении активности  $Mn^{56}$ , наведенной нейтронным излучателем, который помещается в центре большого бака, наполненного раствором сернистого марганца. Активность раствора измеряется сцинтилляционным счетчиком, погружаемым в раствор, или системой из  $\beta$ -счетчиков. Так как удельная активность  $Mn^{56}$ , полученная путем активации нейтронными излучателями, очень мала, для градуировки аппаратуры применялись препараты  $Mn^{56}$ , полученные при облучении его в реакторе. Активность  $Mn^{56}$  измерялась на  $4\pi\beta$ -счетчике [6] с погрешностью 1%. Диапазон измерений  $10^5 \div 10^9$  нейтр/сек, погрешность 1,5%.

Основные исследования при осуществлении этого метода выполнили В. И. Фоминих и А. Г. Котик.

В третьем абсолютном методе при помощи миниатюрных борных счетчиков изучается распределение нейтронов в воде, а методом  $\beta-\gamma$ -совпадений измеряется активность золотой фольги, полученная под действием нейтронов. Метод  $\beta-\gamma$ -совпадений проверен по измерениям на  $4\pi\beta$ -счетчике, диапазон измеряемых этим методом излучателей находится в пределах  $10^5 \div 10^9$  нейтр/сек, погрешность 2%. (Основные исполнители: О. Л. Андреев и Г. М. Стуков.)

С помощью указанных трех абсолютных методов в конце 1962 г. и начале 1963 г. во ВНИИМ были проведены международные сличения канадского Ra- $\alpha$ -Be нейтронного источника № 200—1. В настоящее время он измерялся уже более чем в 10 странах — Канаде, США, ФРГ, Швеции, Бельгии, Англии, Японии, Голландии, Франции, Израиле и СССР. Полученные во ВНИИМ результаты находятся в удовлетворительном согласии с результатами других национальных лабораторий и точность их — наивысшая.

В настоящее время лаборатория располагает также возможностью определять абсолютное число испускаемых излучателем нейтронов методом нейтрон-гамма-совпадений. Этот метод используется главным образом для измерения абсолютного числа нейтронов, испускаемых мультиплицирующими излучателями.

Для измерения выхода излучателя методом нейтрон-гамма-совпадений используется схема быстро-медленных совпадений с разрешающим временем  $10^{-6}$  сек. Преимущество этого метода для измерения мультиплицирующих излучателей заключается в том, что измерение производится только по быстрым нейтронам без применения замедлителя, что устраняет некоторую неопределенность, возникшую при измерениях мультиплицирующих излучателей в замедляющих средах. (Работа выполнена Ю. В. Ивановым.)

Чтобы сделать возможной передачу единицы плотности нейтронного потока от эталонных к образцовым мерам, создана установка (В. И. Фоминых) для сравнения нейтронных излучателей одинакового спектрального состава [7]. Основной ее частью является бак высотой и диаметром 120 см, заполненный парафином. В центре бака имеется канал, в который помещается измеряемый излучатель. В специально предусмотренных каналах расположены 8 счетчиков диаметром 35 мм и длиной 1 м каждый, наполненных трехфтористым бором. Счетчики можно располагать по радиусу 15 и 45 см. Все каналы, не занятые счетчиками, а также канал над излучателем, заполняются парафиновыми вкладышами. С помощью этой установки можно сравнивать с погрешностью в 1% нейтронные излучатели одинакового спектрального состава, испускающие от  $10^2$  до  $10^7$  нейтр/сек.

Для сравнения нейтронных излучателей различного спектрального состава в лаборатории создан так называемый всеволновой счетчик, изготовленный из полиэтилена и имеющий борный счетчик. Для изменения расстояния от излучателя до детектора от 5 до 300 см предусмотрена скамья, а для изучения углового распределения испускаемых излучателем нейтронов имеется специальное автоматическое устройство, вращающее излучатель на определенное количество градусов. На этой установке можно сравнивать с погрешностью 1—10% излучатели различного спектрального состава, испускающие от  $10^4$  до  $10^9$  нейтр/сек.

В январе 1962 г. во ВНИИМ было проведено Всесоюзное межведомственное совещание по разработке технических условий на образцовые нейтронные излучатели. В качестве образцовых приняты Ra- $\alpha$ -Be, Ra- $\gamma$ -Be, Pu—Be и Ac—Be нейтронные излучатели и согласованы их параметры, материал и толщина оболочки, способ герметизации, а также количество нежелательных примесей в исходном сырье.

В 1957—1959 гг. в лаборатории проводились работы по нейтронной дозиметрии. А. С. Карамян совместно с М. Ф. Юдиным сконструировали, создали и исследовали тканезквивалентный нейтронный дозиметр [8].

Таким образом, в результате выполненных за последние годы в лаборатории нейтронных измерений работ создано верхнее звено повероч-

ной схемы — эталонные установки для воспроизведения единицы плотности нейтронного потока, а также установки для передачи этой единицы образцовым мерам. ВНИИМ располагает также аттестованными наборами нейтронных излучателей.

Ближайшими задачами, которые следует разрешить лаборатории нейтронных измерений, является изучение спектров нейтронных излучателей, завершение уже развернутых в настоящее время работ по созданию калиброванного потока тепловых нейтронов, определение некоторых необходимых в нейтронной физике констант и уточнение основных поправок для повышения точности абсолютных методов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ярицна И. А., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 69(129), 1963, стр. 81.
2. Дзедзепов Б. С. и Ярицна И. А., Изв. АН СССР, сер. физ., 1956, стр. 343.
3. Дзедзепов Б., Жуковский Н., Карамян А., Шестопалова С., Изв. АН СССР, сер. физ., т. 17, 1953, стр. 518.
4. Карамян А. С. и Прокофьев П. Т., «Измерительная техника», № 3, 1960, стр. 39.
5. Larsson K. E., J. Nucl. Energy, v. 6, 1958, p. 322.
6. Константинов А. А., Труды ВНИИМ, вып. 30 (90), 1957, стр. 9.
7. Фомных В. И., Ярицна И. А., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 69(129), 1963, стр. 75.
8. Юдин М. Ф. и Филиппов О. А., «Измерительная техника», № 4, 1961, стр. 37.

## ДОЗИМЕТРИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

В 1895 г. В. К. Рентген открыл  $x$ -лучи, названные впоследствии рентгеновскими. В своих трех сообщениях [1] он описал свойства рентгеновских лучей, например, их способность проходить через вещества, непрозрачные для обычного света, ионизационное и фотографическое действие и др. За короткий промежуток времени работами многих ученых была установлена электромагнитная природа рентгеновского излучения.

В настоящее время рентгеновское излучение, наряду с  $\gamma$ -излучением, находит применение почти во всех отраслях народного хозяйства [2]. Оно имеет важное значение для медицины и биологии [3], так как дает возможность наблюдать за работой различных органов человека и определять их патологическое отклонение от нормы. Кроме того, в медицине рентгеновское излучение используется для лечения различных заболеваний.

В первые же месяцы после открытия рентгеновского излучения было обнаружено воздействие его на живые организмы. Среди первых биологических реакций наблюдались эритема и эпиляция, что предопределило выбор эритемной, или кожной, дозы в качестве первой единицы дозы рентгеновского излучения.

Однако применение рентгеновского излучения в терапии требовало выбора такой единицы, которая давала бы возможность на основании результатов измерений количественно определять энергию поглощенного рентгеновского излучения. Такие приборы, как цветовой радиометр Хольцкнехта, таблеточный радиометр Сабуре и Норие, фотографический радиометр Штерна, селеновый радиометр Фюрстенау, не отвечали практическим запросам.

В период с 1924 по 1928 г. советские ученые, П. И. Лукирский, Д. Н. Наследов, В. М. Дукельский, заложили базу для оценки доз рентгеновского излучения в результате измерения ионизации, создаваемой излучением в различных газах. В 1928 г. II Международный конгресс радиологов рекомендовал для всеобщего использования новую единицу измерения рентгеновского излучения — рентген, обозначаемый  $p$  ( $r$ ). Хотя определение рентгена, предложенное Конгрессом, страдало рядом существенных недостатков, однако эта единица выгодно отличалась от всех ранее предложенных единиц для измерений рентгеновского излучения.

В 1924 г. в Главной палате мер и весов (ныне ВНИИМ) А. Н. Бойко была организована рентгенометрическая лаборатория, которую с 1925 по 1929 г. возглавлял С. Н. Усатый. В этот период в рентгенометрической лаборатории проводились исследования, связанные с изучением предложенных в разное время единиц и методов измерений рентгеновского излучения.

С 1929 по 1942 г. лабораторией руководил И. В. Поройков. С этого времени в ней ведутся работы по выполнению основной метрологической задачи — разработке методов и средств наиболее точного воспроизведения рентгена и передачи его размера рабочим рентгенометрам и дозиметрам. Под руководством И. В. Поройкова в 1930 г. в результате завершения тщательных исследований была впервые в институте воспроизведена единица «рентген». Эталонная ионизационная камера первой эталонной установки СССР была цилиндрического типа с внутренним диаметром 25 см. Ионизационный ток измерялся по компенсационному методу Таунсенда. Заряд, собираемый с измерительного объема ионизационной камеры, компенсировался с помощью тока уранового ионизатора. Для контроля режима излучения рентгеновской трубки использовалась камера-свидетель, по своему устройству идентичная устройству эталонной камеры. Результаты исследований показали, что созданная установка воспроизводит рентген с погрешностью  $\pm 0,7\%$  [4]. Одновременно абсолютные измерения доз рентгеновского излучения были осуществлены в рентгенологических институтах в Москве (ГРИ) — Я. А. Шехтманом и в Киеве — В. К. Роше. В 1933—1934 гг. были сличены эталоны рентгена ВНИИМ с устройством ГРИ (Москва), воспроизводящим рентген, а также с прибором Кюстнера, градуированным в Физико-техническом институте (PTR) в Берлине. Результаты этих сличений показали, что в пределах погрешности  $\pm 7\%$  размер рентгена, воспроизведенного в различных учреждениях СССР, одинаков [5].

Для повышения точности и особенно надежности воспроизведения рентгена в 1934 г. под руководством И. В. Поройкова [6] во ВНИИМ была создана эталонная групповая рентгенометрическая установка. Она состоит из трех идентичных эталонных цилиндрических ионизационных камер со свободным воздухом и трех электроизмерительных устройств. Любая из этих камер может быть сочленена с любым электроизмерительным устройством и может применяться также в качестве единичного рабочего эталона рентгена. Все камеры укреплены на одном горизонтальном валу, имеющем опору на специальном каркасе, и смещены одна относительно другой на  $120^\circ$ . Камеры при вращении вала последовательно и автоматически занимают одно и то же рабочее место. Для измерения ионизационных токов применяются три электроизмерительных устройства, собранных по компенсационной схеме Таунсенда. Исследование этой установки показало [7], что она воспроизводит рентген с погрешностью  $\pm 0,3\%$ .

Постоянство режима излучения в установке во время сличения контролируется с помощью камеры-свидетеля [8, 9] и результаты измерений приводятся к одним и тем же ее показаниям. Система диафрагмирования рабочего пучка лучей (количество и место расположения диафрагм и их размеры) выбирается и фокусировка камер в нем производится так, чтобы по возможности исключить афокальное излучение и рабочий пучок лучей получить с наибольшей однородностью как по интенсивности, так и по спектральному составу [10, 11].

Одновременно с созданием эталонных установок рентгенометрическая лаборатория, начиная с 1930 г., проводит большую работу по раз-

работке физических основ и понятий дозиметрии рентгеновских лучей и по наиболее точному и рациональному определению рентгена [12, 13]. Следует упомянуть, что определение рентгена, данное в то время И. В. Поройковым, во многом предвосхитило определение, принятое V Международным конгрессом радиологии в 1937 г. в Чикаго, и способствовало более правильному представлению о физической величине, единицей измерения которой является рентген. В это же время в лаборатории проводились исследования, связанные с разработкой методов градуировки рабочих рентгенметров [14]. Под руководством И. В. Поройкова в 1932 г. разработан новый тип рентгенметра — светосигнальный рентгенметр [15, 16], который фактически явился прообразом дозиметров Сименса и типа ДИМ.

В это же время выполнялись работы по определению дозиметрических характеристик материалов, применяемых для изготовления ионизационных камер рабочих рентгенметров [17], а также физико-технические исследования [18—20]. Необходимо отметить, что в этот период К. К. Аглинцевым разработан метод нахождения закона распределения энергии по непрерывному спектру рентгеновского излучения [21] и определено значение одной из основных дозиметрических постоянных — средней энергии, затрачиваемой рентгеновским излучением на образование одной пары ионов в воздухе [22]. Н. Н. Миролюбов и И. В. Поройков [23] вывели физический критерий для характеристики степени однородности рентгеновского излучения при прохождении его через различные слои вещества. В 40-е годы, наряду с работами по усовершенствованию эталона рентгена К. К. Аглинцев разработал метод определения мгновенного значения мощности дозы излучения на основании определения осциллограмм ионного тока в камерах [24, 25]. До разработки этого метода экспериментаторы имели возможность измерять только средние значения мощностей доз и доз излучения за более или менее длительный интервал времени. В это же время были разработаны методы расчета интенсивности диффузно-рассеянного излучения и спектра рассеянного рентгеновского излучения [26, 27]. Кроме того, были поставлены опыты по применению рентгенметров для измерения интенсивности нейтронных потоков [28].

В начале 1941 г. под руководством И. В. Поройкова были начаты работы по созданию эталонной установки для воспроизведения рентгена в области рентгеновского излучения  $5 \div 20$  кв, которые завершились во ВНИИМ только в 1947 г. [29].

При конструировании эталонной камеры для указанного диапазона рентгеновского излучения было учтено характерное свойство этого излучения — очень сильное ослабление пучка лучей любой средой, включая воздух. Это свойство приводит к большой неоднородности излучения как по интенсивности, так и по спектральному составу пучка лучей вдоль пути распространения излучения и в поперечном сечении пучка. В установке в качестве эталонной ионизационной камеры используется камера плоскопараллельного типа. Для измерения ионизационных токов насыщения в ней применяется компенсационный метод измерений. Установка обеспечивает воспроизведение рентгена с погрешностью  $\pm(1 \div 1,5)\%$  в диапазоне генерирования рентгеновского излучения  $5 \div 20$  кв.

Работы по восстановлению и налаживанию измерительных установок лаборатории были начаты в 1944 г. под руководством К. К. Аглинцева, который являлся руководителем лаборатории с 1944 г. по июнь 1948 г. С июня 1948 по 1951 г. руководителем лаборатории был М. Ф. Юдин, а с 1951 по 1956 г. — З. П. Балон.

В 1950 г. были начаты работы по созданию аппаратуры для воспроизведения рентгена в диапазоне энергий квантов  $250 \div 3000$  кэв [30—31]. Характерной особенностью излучения этого диапазона энергий квантов является его высокая проникающая способность и сравнительно большие длины пробегов в воздухе электронов, создаваемых излучением.

Высокая проникающая способность вынуждает применять специальные диафрагмирующие устройства для получения узких пучков  $\gamma$ -лучей, необходимых при воспроизведении рентгена. Для полного использования ионизирующей способности электронов приходится либо создавать ионизационные камеры больших размеров, чрезвычайно неудобные в работе [32], либо помещать камеры сравнительно небольших размеров в специальные сосуды, где может быть создано повышенное давление воздуха [33—35]. В качестве эталонной ионизационной камеры в установке ВНИИМ применена плоскопараллельная камера со следующими основными параметрами:

а) расстояние между измерительным и потенциальным электродами 40 см,

б) длина измерительного электрода 25 см, его высота 40 см,

в) расстояние между центром входного отверстия калиброванной диафрагмы и центром ионизационной камеры 151,6 см.

Эталонная камера помещена в бак, где давление воздуха может изменяться от 1 до 20 атм.\* Для получения узкого пучка  $\gamma$ -излучения в установке используется диафрагмирующее устройство, в которое помещается  $\gamma$ -излучатель. Устройство состоит из свинцового блока, защитной и поворотной калиброванной диафрагмы и установочного стола. Ионизационные токи, создаваемые излучением в камере, измеряются компенсационным методом.

Из-за наличия колонной рекомбинации при давлении воздуха  $5 \div 20$  атм невозможно обеспечить условия получения тока насыщения при разности потенциалов между электродами до 20 кв. Поэтому ток насыщения приходится вычислять на основе теории Яффа — Цанстра. В целях уменьшения не исключенных систематических погрешностей воспроизведения рентгена в последние годы уточняется ряд поправочных коэффициентов. Некоторые результаты этих уточнений опубликованы [30, 31, 36, 37]. Эталонная установка воспроизводит рентген в диапазоне энергии квантов  $250 \div 3000$  кэв с погрешностью  $\pm(1 \div 1,5)\%$ .

С 1951 по 1954 г. в рентгенометрической лаборатории под руководством П. И. Лукирского проводились работы по созданию кристаллического  $\gamma$ -спектрометра. О. И. Сумбаевым был создан спектрометр, превосходящий по своим метрологическим данным аналогичный спектрометр Дюмонда [38, 39].

В 1957—1959 гг. создана эталонная установка для воспроизведения рентгена в диапазоне энергий квантов  $20 \div 60$  кэв. В качестве эталонной ионизационной камеры в ней применена камера плоскопараллельного типа [40]. Результаты исследований показали, что эта эталонная установка воспроизводит рентген в диапазоне рентгеновского излучения  $20 \div 60$  кэв с погрешностью  $1,5 \div 2,0\%$ .

В последние годы завершены значительные работы по созданию методов и аппаратуры, предназначенных для передачи размера рентгена от эталонов к образцовым и рабочим рентгенметрам (дозиметрам) и  $\gamma$ -излучателям [41]. Из числа их следует упомянуть установку для поверки  $\gamma$ -рентгенметров и калибровки образцовых и рабочих  $\gamma$ -излучателей в пределах мощностей доз излучения  $0,1 \div 500$  мр/ч

\* В системе СИ единицей измерения является н/м<sup>2</sup>; 1 атм = 101 325 н/м<sup>2</sup>.

и установку «гамма-излучатель», обеспечивающую получение  $\gamma$ -поя с мощностью доз  $10 \div 50$  *р/мин* при использовании источников  $Co^{60}$  общей активностью  $\sim 3$  *кюри*.

Эти установки разработаны под руководством З. П. Балон и рекомендуются в качестве типовых для оснащения государственных контрольных лабораторий по измерительной технике.

В 1961 г. на основе разработок предыдущих лет завершено создание образцового дозиметра. Параллельно с этим лаборатория принимала активное участие в разработке нового государственного стандарта на единицы измерений в области ионизирующих излучений и в дискуссии, имевшей место по этому поводу на страницах журнала «Измерительная техника», а также разработала ряд нормативных документов [42—47]. Были выполнены также исследования, связанные с уточнением работы ионизации и дозиметрических характеристик излучателей [48—51]. Следует отметить, что на основании результатов исследований лаборатории в СССР в последние годы появились монографии, обобщающие опыт работы по поддержанию единства измерений в области дозиметрии ионизирующих излучений [52—55].

Таким образом, благодаря работам ВНИИМ рентген в СССР воспроизводится во всем диапазоне энергий квантов, для измерения доз излучения которых он предназначен, с погрешностью, не превышающей погрешность воспроизведения рентгена в наиболее передовых капиталистических странах [56].

С 1957 г. под общим руководством К. К. Аглинцева ведутся работы в области  $\beta$ -дозиметрии. В результате этих работ в 1962 г. были введены в эксплуатацию три установки, позволяющие измерять мощности доз  $\beta$ -излучения и исследовать дозиметрические характеристики плоских  $\beta$ -излучателей.

Установка с экстраполяционными ионизационными камерами позволяет измерять мощности доз  $\beta$ -излучения в диапазоне  $0,1 \div 1000$  *рад/ч* (тканевых) от  $\beta$ -излучателей с площадью активной поверхности до  $50$  *см<sup>2</sup>*.

Установка для дозиметрических и спектральных исследований плоских  $\beta$ -излучателей с площадью активной поверхности до  $1600$  *см<sup>2</sup>* позволяет как исследовать действующие электронные спектры плоских  $\beta$ -излучателей, так и измерять мощность дозы  $\beta$ -излучения в диапазоне  $0,01 \div 100$  *рад/ч*.

Установка с плоскопараллельными ионизационными камерами, имеющими фиксированный объем, позволяет исследовать дозы от плоских  $\beta$ -излучателей с площадью до  $5000$  *см<sup>2</sup>*.

Результаты исследования этих трех установок показали, что погрешности измерений доз  $\beta$ -излучения с ионизационными камерами заключены в пределах до  $\pm 20\%$  [57].

Работы по нейтронной дозиметрии проводятся в лаборатории с 1959 г. К сожалению, в то время этим вопросам уделялось мало внимания. В результате не было четкого понятия о дозе нейтронного излучения и не было единицы для ее измерения. На основе анализа существовавших к 1958 г. экспериментальных данных лаборатория предложила понятие об экспозиционной нейтронной дозе и рекомендовала единицу для ее измерения [58].

В результате работ по нейтронной дозиметрии была создана следующая аппаратура:

а) Образцовая нейтронная дозиметрическая установка, включающая тканезквивалентную и графитовую ионизационные камеры.

Эта установка позволяет измерять мощности экспозиционных доз нейтронов и определять мощности поглощенных от нескольких предельно допустимых тканевых мощностей доз нейтронного излучения до сотен с погрешностью не хуже  $\pm 8\%$  при энергии нейтронов  $0,3 \div 10$  Мэв. Разработанный метод измерения позволяет отделять мощность дозы  $\gamma$ -фона от нейтронной.

б) Установка «двойной замедлитель нейтронов», проградуированная по ионизационным камерам.

Установка позволяет измерять при энергиях до 5 Мэв с погрешностью  $\pm (8 \div 10)\%$  мощности доз нейтронов, начиная от 0,05 предельно-допустимых и выше. Эти измерения производятся в присутствии  $\gamma$ -излучения, имеющего мощности экспозиционных доз до 0,3 мр/сек.

Установка обеспечивает измерение относительным методом плотностей нейтронов от  $1$  н/см<sup>2</sup>·сек и выше при энергиях до 5 Мэв с погрешностью не более  $\pm 2\%$  и оценку средней энергии их с погрешностью  $\pm (10 \div 20)\%$ . На основании результатов этих измерений можно также оценивать опасность работы с учетом относительной биологической эффективности.

в) Сцинтилляционные приемники-детекторы нейтронного излучения в виде слоистого цилиндрического и сферического сцинтилляторов.

Эти детекторы позволяют измерять экспозиционные дозы быстрых нейтронов, начиная от одной предельно допустимой мощности дозы и выше, с погрешностью  $\pm (10 \div 15)\%$  [59]. Исследованиями установлено, что при любых нейтронных измерениях в помещении обязательно надо учитывать рассеяние нейтронов стенами и воздухом. При расстоянии между центрами источника нейтронов и детектора около 1 м рассеянное излучение может давать до 30% добавки к прямому потоку нейтронов. Оценка рассеяния по широко используемому методу поглощающего конуса завышает эту добавку на 2—3%.

На основании результатов проведенных исследований разработана поверочная схема для передачи размера единицы экспозиционной дозы нейтронного излучения от эталона до рабочих нейтронных дозиметров и нейтронных излучателей. Результаты работ в рассмотренном направлении отражены в литературе [60, 61].

К началу 1964 г. в лаборатории под руководством К. К. Хлебникова закончена наладка отдельных узлов и запущена бетатронная установка ВНИИМ на 50 Мэв.

В ближайшее время намечено разработать методы и образцовую аппаратуру для измерения жесткого тормозного излучения с целью унификации и поддержания единства измерений таких излучений в нашей стране. Параллельно с этим будут проводиться исследования по увеличению точности воспроизведения и передачи рентгена рабочим рентгенметрам и работы, связанные со стандартизацией основных узлов дозиметрической аппаратуры (детекторы излучения, электроизмерительные устройства и др.).

В заключение следует сказать, что в связи с решениями Декабрьского Пленума ЦК КПСС резко возрастает значимость работ в данном направлении. В соответствии с этими решениями Пленума в ближайшие годы должна широко развиваться радиационная химия, ибо она позволяет получать искусственные материалы с совершенно новыми свойствами, отличными от свойств естественных материалов.

Для выбора правильного направления течения той или иной химической реакции, индуцируемой ионизирующим излучением, необходимо обеспечить точное измерение доз этого излучения.

Поэтому главное направление работ лаборатории по созданию наиболее точных методов измерений доз ионизирующего излучения будет способствовать успешному развитию радиационной химии и тем самым выполнению решений Пленума.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рентген В. К., О новом ряде лучей, перев. под ред. акад. А. Ф. Иоффе, Гостехиздат, 1936.
2. Иоффе А. Ф., Историческое значение открытия Рентгена, Изв. АН СССР, сер. физ., т. 10, 1946, стр. 343.
3. Неменов М. Н., Значение открытия рентгеновских лучей для биологии и медицины, Изв. АН СССР, т. 10, стр. 531.
4. Поройков И. В., Аруев Н. Н., Исследования в области рентгенометрии, Труды ВИМС, вып. 8 (24), 1935, стр. 5.
5. Поройков И. В., Аруев Н. Н., Исследования в области рентгенометрии, Труды ВИМС, вып. 8 (24), 1935, стр. 38.
6. Поройков И. В., Исследования в области рентгенометрии, Труды ВИМС, вып. 8(24), 1935, стр. 32.
7. Поройков И. В., Аглинцев К. К., Исследования в области рентгенометрии, Труды ВНИИМ, вып. 17 (33), 1938, стр. 5.
8. Аглинцев К. К., Божек И. А., Исследования в области рентгенометрии, Труды ВНИИМ, вып. 25 (41), 1939, стр. 3.
9. Балон З. П., Исследования в области измерения ионизирующих излучений, Труды ВНИИМ, вып. 30(90), 1957, стр. 70.
10. Раевский Б., Егер Р., Хюбнер В. и др., Воспроизведение, хранение и передача единицы дозы рентгеновских и гамма-лучей с энергией квантов от 3 до 500 кэв, ФРГ, Брауншвейг, 1955.
11. Аглинцев К. К., Балон З. П., Исследования в области измерений ионизирующих излучений, Труды ВНИИМ, вып. 30(90), 1957, стр. 76.
12. Поройков И. В., Физические основы дозиметрии рентгеновских лучей (Рентгенометрия), Стандартгиз, 1934.
13. Поройков И. В., Справочник по рентгенометрии, Стандартгиз, 1936.
14. Поройков И. В., Исследования в области рентгенометрии, Труды ВИМС, вып. 8(24), 1935, стр. 109.
15. Поройков И. В., Достижения в области рентготехники, № 1, 1933.
16. Порфирьев А. А., Исследования в области рентгенометрии, Труды ВИМС, вып. 8(24), 1935, стр. 72.
17. Аглинцев К. К., Исследования в области рентгенометрии, Труды ВИМС, 1935, вып. 8(24), стр. 89.
18. Аглинцев К. К., Исследования в области рентгенометрии, Труды ВИМС, вып. 8(24), 1935, стр. 67.
19. Аглинцев К. К., Порфирьев А. А., Труды ВИМС, вып. 8(24), 1935, стр. 83.
20. Аглинцев К. К., Труды ВИМС, вып. 8(24), 1935, стр. 89.
21. Аглинцев К. К., ЖЭТФ, т. 6, 1929, стр. 38.
22. Аглинцев К. К., ЖЭТФ, т. 3, 1933, стр. 282.
23. Миролубов Н. Н., Поройков И. В., Z. St. Phys. 54, 1929, стр. 329.
24. Аглинцев К. К., Труды ВНИИМ, вып. 17(33), 1938, стр. 9.
25. Аглинцев К. К., Труды ВНИИМ, вып. 25(41), 1939, стр. 11.
26. Поройков И. В., ЖЭТФ, т. 8, 1938, стр. 1305.
27. Аглинцев К. К., Труды ВНИИМ, вып. 25(41), 1939, стр. 38.
28. Поройков И. В., Труды ВНИИМ, вып. 25(41), 1939, стр. 31.
29. Юдин М. Ф., Труды ВНИИМ, вып. 30(90), 1957, стр. 87.
30. Аглинцев К. К., Остромухова Г. П., Юдин М. Ф., Труды ВНИИМ, вып. 30(90), 1957, стр. 109.
31. Аглинцев К. К., Остромухова Г. П., Труды институтов Комитета стандартов, вып. 55(115), 1961, стр. 55.
32. Kaye G. W., Binka, Proc. Roy. Soc., v. 161A, 1937, стр. 564.
33. Taylor L., Singler G., Charlton A., GR NBS, v. 21, № 1, 1938, стр. 19.
34. Taylor L., Singler G., GR NBS, v. 24, № 3, 1940, стр. 247.
35. Grove G. K., GR NBS, v. 48, № 2, 1952, стр. 147.
36. Аглинцев К. К., Остромухова Г. П., «Атомная энергия», т. 6, вып. 1, 1959, стр. 63.
37. Юдин М. Ф., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 69(129), 1962, стр. 56.

38. Лухирский П. И., Сумбаев О. И., Изв. АН СССР, сер. физ, т. XX, № 8, 1956.
39. Сумбаев О. И., «Измерительная техника», № 2, 1957, стр. 17.
40. Авотина М. П., Остромухова Г. П., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 55(115), 1961, стр. 35.
41. Балон З. П., Келлер Р. Ф., Остромухова Г. П., Тучки В. Н., «Измерительная техника», № 12, 1959, стр. 47.
42. Юдин М. Ф., «Измерительная техника», № 1, 1955, стр. 31.
43. Юдин М. Ф., «Измерительная техника», № 1, 1958, стр. 84.
44. ГОСТ, «Единицы рентгеновского и гамма-излучений и радиоактивности», Стандартгиз, 1958.
45. ГОСТ, «Единицы ионизирующих излучений и радиоактивности», Стандартгиз, 1963.
46. Балон З. П., Методические указания № 177, Стандартгиз, 1960.
47. Балон З. П., Методические указания по поверке гамма-дозиметров, № 212, Стандартгиз, 1963.
48. Аглинцев К. К., Труды ВНИИМ, вып. 30(90), 1957, стр. 5.
49. Аглинцев К. К., Остромухова Г. П., Хольнова Е. А., «Измерительная техника», № 2, 1959, стр. 52.
50. Аглинцев К. К., Остромухова Г. П., Хольнова Е. А., «Измерительная техника», № 12, 1960, стр. 40.
51. Аглинцев К. К., Остромухова Г. П., Хольнова Е. А., «Атомная энергия», № 1, 1961, стр. 75.
52. Аглинцев К. К., Дозиметрия ионизирующих излучений, Гостехиздат, 1950.
53. Поройков И. В., Рентгенометрия, Гостехиздат, 1950.
54. Аглинцев К. К., Дозиметрия ионизирующих излучений, Гостехиздат, 1957.
55. Юдин М. Ф., Методы и аппаратура для градуировки дозиметрических приборов, Стандартгиз, 1962.
56. Балон З. П., Максимова М. П., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 55(115), 1961, стр. 42.
57. Аглинцев К. К., Максимова М. П., Уряев Н. А., Труды институтов Комитета стандартов, вып. 55(115), 1961, стр. 90.
58. Юдин М. Ф., «Измерительная техника», № 1, 1960, стр. 51.
59. Слепешков С. И., Юдин М. Ф., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 55(115), 1961, стр. 74.
60. Юдин М. Ф., Филиппов О. А., «Измерительная техника», № 4, 1961, стр. 37.
61. Юдин М. Ф., Фоминных В. И., Нейтронная дозиметрия, Издательство стандартов, 1964.

ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНОСТИ  
РАДИОАКТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ

История исследований явлений радиоактивности ведет свое начало с открытия в 1896 г. А. Беккерелем радиоактивности урана. Последовавшие вслед за этим многочисленные исследования и открытия в этой новой области науки оказались теснейшим образом связанными с периодической системой элементов Д. И. Менделеева. С одной стороны, периодическая система дала ключ к пониманию многих наблюдаемых фактов и явлений, с другой — новые научные открытия блестяще подтвердили гениальную гипотезу Д. И. Менделеева о существовании некоторых неизвестных в то время элементов.

В 1898 г. М. Склодовская-Кюри и П. Кюри впервые получили новые радиоактивные элементы радий и полоний, оказавшиеся по своим химическим свойствам соответствующими экабарью и экателлуру, предсказанным Д. И. Менделеевым. В 1899 г. А. Дебьерн открыл активный — экалант периодической таблицы. В 1900 г. было установлено, что в результате распада радия образуется радон (эманация радия) — радиоактивный газ, относящийся к нулевой группе периодической системы. В 1902 г. У. Рамзай и Ф. Содди впервые наблюдали случай превращения элементов: образование гелия в результате распада радона.

Дальнейшие исследования распада урана, радона, тория и актиния привели к открытию изотопии, обогатившему периодическую систему: стало ясно, что одной клетке в периодической таблице элементов может соответствовать не один, а несколько видов атомов, отличающихся по своей массе. По предложению Ф. Содди их назвали изотопами.

Периодическая система элементов в значительной мере способствовала развитию теории строения атома. После того как Э. Резерфорд в 1911 г. предложил ядерную модель атома, А. Ван ден Брук впервые высказал предположение, что заряд ядра численно равен порядковому номеру элемента, а Г. Мозли в 1913 г. ввел термин «атомный номер» и экспериментально доказал соответствие атомного номера порядковому. Эти открытия обогатили и углубили содержание периодической системы и привели к новой формулировке периодического закона, в основу которого был положен уже не атомный вес, а заряд ядра, или атомный номер элемента. Это дало возможность установить число еще не открытых элементов и устремить поиски исследователей в нужном

направлении. К 1939 г. почти все недостающие элементы таблицы Д. И. Менделеева были найдены. Дальнейшие усилия ученых были сосредоточены на работах по искусственному превращению элементов и получению новых, еще не известных в природе элементов, в том числе и трансураниевых, существование которых Д. И. Менделеев считал вероятным.

Синтез большого числа трансураниевых элементов до № 104 включительно явился блестящим подтверждением предвидений Д. И. Менделеева.

Проведение научных исследований в области радиоактивности было связано с необходимостью определения количеств радиоактивных веществ. Решение этой проблемы составляет основное содержание радиометрии — одного из разделов метрологии ионизирующих излучений.

До открытия искусственной радиоактивности и организации производства искусственных радиоактивных изотопов наиболее широко применявшимся радиоактивным веществом был радий. Поэтому естественно, что вопрос об определении количества радия-элемента в радиевых препаратах был в тот период весьма актуальным. Для решения этой задачи необходимо было выбрать единицу и метод измерения, создать соответствующий эталон. Международный конгресс по электричеству в 1910 г. в Брюсселе постановил принять за единицу измерения количества радия миллиграмм радия-элемента, определяемый по интенсивности  $\gamma$ -излучения радиевого препарата путем сравнения его с эталоном радия. Следующий Международный конгресс по электричеству в 1912 г. утвердил в качестве международного эталона радия препарат, изготовленный в 1911 г. М. Кюри и хранящийся в Париже, и в качестве основной копии международного эталона — препарат, изготовленный О. Хенгшмидтом и хранящийся в Вене. На том же конгрессе была образована Международная комиссия, одной из задач которой было наблюдение за Международным эталоном радия и его копией и снабжение различных государств вторичными международными эталонами радия, по своим характеристикам идентичными международному эталону. С помощью международного эталона радия и вторичных международных эталонов, используемых в качестве национальных эталонов радия в различных странах, обеспечивалось единство измерений во всем мире.

В силу ряда причин эталоны из других естественных радиоактивных веществ не могли быть приготовлены, а потому препараты различных радиоактивных веществ, не относящихся к продуктам распада радия, стали сравнивать по  $\gamma$ -излучению с эталонами радия, т. е. определять радиевый  $\gamma$ -эквивалент препарата в данных условиях измерения, выражая результат в миллиграмм-эквивалентах радия. Так возникла эта единица, характеризующая, по существу, не количество радиоактивного вещества в препарате, а действие его  $\gamma$ -излучения в данных условиях, и связанная с единицей мощности дозы  $\gamma$ -излучения тем, что 1 мг радия в равновесии с короткоживущими продуктами распада, заключенный в платиновый футляр толщиной 0,5 мм, создает на расстоянии 1 см мощность экспозиционной дозы 8,25 р/ч.

В конце 40-х годов, в связи с огромным ростом производства искусственных радиоактивных изотопов и расширяющимся применением их в различных областях науки и техники, перед метрологией ионизирующих излучений встала новая задача: разработать методы и аппаратуру для количественной оценки источников, изготовленных из различных радиоактивных нуклидов.

Основной количественной характеристикой радиоактивных источников является активность, т. е. число актов распада данного нуклида, происходящих в радиоактивном источнике в единицу времени. Из-за ряда принципиальных трудностей в настоящее время не представляется возможным создать эталоны активности для различных нуклидов, как это было сделано для радия. Поэтому единица активности воспроизводится по ионизационному или тепловому действию излучения с помощью эталонного метода, который реализуется на соответствующей эталонной аппаратуре, созданной в метрологических лабораториях многих стран. Единство измерений в области активности обеспечивается периодическими международными сличениями образцовых растворов радиоактивных нуклидов. В 1959 г. при Международном комитете мер и весов образован Консультативный комитет по эталонам для измерения ионизирующих излучений и 4 рабочие группы этого комитета: по эталонам радионуклидов, радия, нейтронным эталонам и экспозиционным дозам.

В 1961 г. начал свою деятельность отдел ионизирующих излучений Международного бюро мер и весов (МБМВ), где создаются эталонные установки для воспроизведения основных единиц в области ионизирующих излучений и радиоактивности. Сейчас все международные сличения эталонов радионуклидов координируются и обобщаются отделом ионизирующих излучений МБМВ и Консультативным комитетом.

Организация радиометрической лаборатории ВНИИМ в 1918 г. (первоначально эта лаборатория называлась радиологической) была обусловлена необходимостью измерения радиевых препаратов. Эта задача была выдвинута в результате развития отечественной радиевой промышленности. В статье К. К. Аглинцева\* изложена история создания радиометрической лаборатории ВНИИМ, а также дан обзор работ, проводившихся в период с 1918 по 1941 г.

В настоящей статье излагаются работы, выполненные в радиометрической лаборатории (в основном в послевоенные годы) в области измерений эталонов радия, воспроизведения единицы активности радиоактивных источников и передачи размера единицы активности от эталонов к рабочим источникам.

### Измерения эталонов радия

На протяжении всей истории существования радиометрической лаборатории ВНИИМ измерения эталонов радия составляли важный раздел ее деятельности. Правда, в последние 10—15 лет радий в качестве радиоактивного источника в значительной степени уступил место искусственным радиоактивным нуклидам. Тем не менее эталон радия и в наше время остается единственным вещественным эталоном в области ионизирующих излучений; в ряде отраслей науки, техники и медицины препараты радия еще продолжают применяться, поэтому эталонные работы в области измерений радия не утратили своей актуальности.

В первые годы своего существования радиометрическая лаборатория не имела собственных эталонов радия. Совершенно естественно, что первые руководители — сначала Л. С. Коловрат-Червинский, а затем Л. Н. Богоявленский — в первую очередь стремились оснастить ее эталонами. В 1918 г. лаборатория приобрела около 25 мг чистого радия, приготовленного, по-видимому, из нохимстальской руды. Во Франции этот радий расфасовали в две ампулы, которые в лаборатории Кюри

\* См. стр. 142.

сличили с рабочим эталоном, и возвратили во ВНИИМ, где в течение длительного времени их использовали в качестве рабочих эталонов радия (№ 1 и 2). Планомерная метрологическая деятельность стала возможна после получения в середине 1928 г. от Международной комиссии по эталонам радия двух вторичных международных эталонов радия № X и XI, снабженных сертификатами, подписанными Э. Резерфордом, М. Кюри и Ст. Мейером. Препарат № XI был утвержден затем государственным эталоном радия СССР, а препарат № X — эталоном-копией.

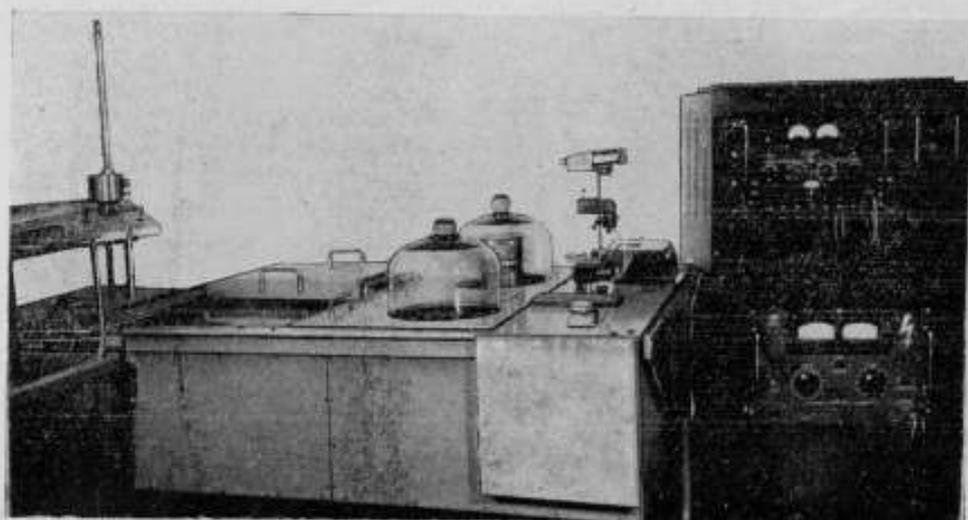


Рис. 1. Измерительная установка для сличения радиевых эталонов.

Для сличения радиевых эталонов по  $\gamma$ -излучению к тому времени была создана установка [1], состоявшая первоначально из двух ионизационных камер (плоской камеры конструкции Кюри и сферической свинцовой камеры конструкции ВНИИМ) и электрометрического устройства, собранного по компенсационной схеме Таунсенда. В результате сличений эталонов № X и XI и рабочих эталонов радия ВНИИМ и других учреждений было получено удовлетворительное согласие между измеренными значениями содержания радия и приведенными в сертификатах на соответствующие эталоны. Было доказано также преимущество сферической ионизационной камеры ВНИИМ, в связи с чем все последующие сравнения эталонов радия, вплоть до настоящего времени, проводятся только на этой камере.

В 1940 г. К. К. Аглинцев, сменивший в том же году Л. Н. Богоявленского на посту руководителя радиометрической лаборатории, провел очень важные исследования [2] методики сравнения радиевых эталонов на установке с ионизационной камерой и указал источники систематических погрешностей, возникавших при сравнении радиевых эталонов и ранее не учитывавшихся.

В период Великой Отечественной войны деятельность лаборатории прекратилась и была возобновлена лишь в конце 1945 г. В первые послевоенные годы были восстановлены основные измерительные установки и проведены циклы сличений государственного эталона радия с эталоном-копией и рабочими эталонами ВНИИМ.

Методика и аппаратура для сличения радиевых эталонов с содержанием радия выше 1 мг [3] была исследована в 1950—1951 гг. К. К. Аглищевым и Ф. М. Караваевым. При этом было осуществлено некоторое усовершенствование измерительной установки. Однако коренным образом ее реконструировали лишь в 1958 г. (А. Ф. Дричко, Ф. М. Караваев и С. А. Русинова). Установка (рис. 1) была модернизирована и конструктивно оформлена в виде типовой образцовой установки [4]. Благодаря проведенной реконструкции токи нормального рассеяния в камере и утечки в образцовых конденсаторах, которые являются источниками систематических погрешностей, уменьшились до пренебрежимо малых значений. Радиационная безопасность при работе на установке была значительно повышена.

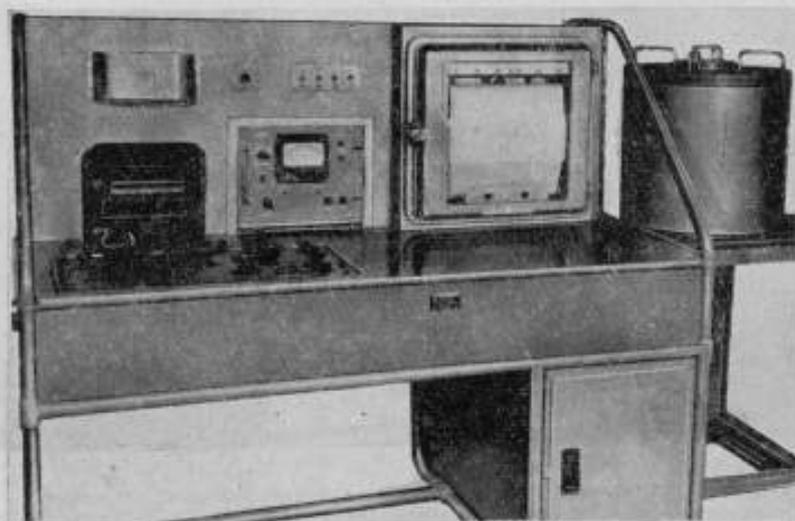


Рис. 2. Образцовая установка типа УПРГИ-1.

Для сличения радиевых эталонов с содержанием радия 0,001—1 мг в 1951—1952 гг. разработана методика и создана лабораторная установка [5], состоящая из ионизационной камеры и компенсационного электрометрического устройства с усилителем постоянного тока. В настоящее время эта установка модернизирована и конструктивно оформлена в виде образцовой установки типа УПРГИ-1 (рис. 2). Она состоит из  $4\pi$ -ионизационной камеры цилиндрической формы с каналом и стенда с компенсационным электрометрическим устройством, в котором использован усилитель постоянного тока типа У1-2 (авторы установки Ф. М. Караваев, А. Ф. Дричко и Т. В. Орлова).

Для уменьшения погрешности, возникающей при сравнении радиевых эталонов из-за различия в самопоглощении  $\gamma$ -лучей, в 1956 г. Е. А. Хольновой и Л. П. Тимофеевой создана установка (рис. 3) для сличения этих эталонов калориметрическим методом по  $\alpha$ -излучению [6]. Ее основной частью является  $\alpha$ -калориметр, состоящий из двух одинаковых тонкостенных серебряных стаканчиков, установленных внутри массивного медного блока термостата. Сравнимые эталоны радия помещаются поочередно в один из стаканчиков. Возникающая при этом разность температур между стаканчиками из-за поглощения  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучения определяется при помощи системы термопар, спаянных которых прикреплены к их стенкам. Тепловая мощность, выделяющаяся в кало-

риметре, пропорциональна содержанию радия в измеряемом эталоне. Основная часть энергии распада радия, находящегося в радиоактивном равновесии с короткоживущими продуктами его распада, приходится на долю  $\alpha$ -излучения (на долю  $\gamma$ -излучения падает лишь около 7%). При этом  $\gamma$ -излучение очень слабо поглощается тонкими стенками калориметра и не вносит сколько-нибудь существенного вклада в тепловой эффект. Поэтому самопоглощение  $\gamma$ -излучения практически не сказывается на результатах сравнения радиевых эталонов. Погрешность их сравнения не превышает 0,3% (по сравнению с 0,5—1% на установке с ионизационной камерой).

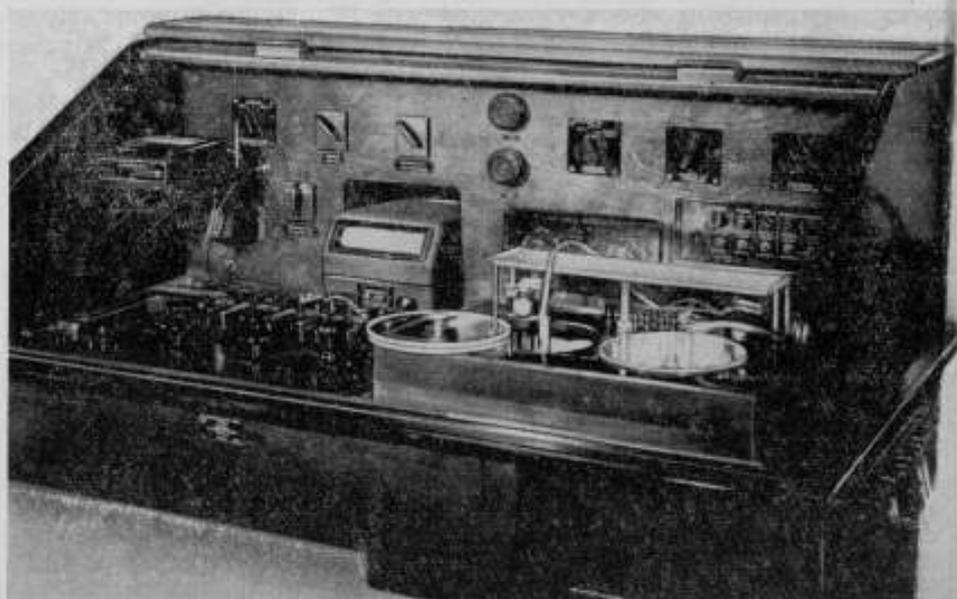


Рис. 3. Установка для сравнения радиевых эталонов калориметрическим методом.

В 1957 г. лаборатория получила радиевый эталон № 5427 из числа 20 эталонов, изготовленных в 1934 г., по просьбе Международной комиссии по эталонам радия, О. Хенигшидтом из наиболее чистого радия и предназначенных для замены международного эталона и национальных эталонов ряда стран. Такая замена была обусловлена существующей для радиевых эталонов опасностью самопроизвольного разрыва тонкостенных стеклянных ампул вследствие накопления в них, в результате распада радия, значительного количества газов (главным образом, гелия).

На установках с ионизационной камерой и  $\alpha$ -калориметром проведено сравнение эталона № 5427 с эталонами № X и XI. Повторные сличения, проведенные в 1962—1963 гг., подтвердили совпадение результатов сравнения эталонов № X, XI и 5427 с данными сертификатов в пределах 0,6%.

По тем же причинам были заменены старые рабочие эталоны радия ВНИИМ, возраст которых уже приближался к 40 годам, новыми образцами. При этом предполагалось расширить номенклатуру рабочих эталонов в сторону как больших, так и малых содержаний радия. В 1958 г. были получены препараты радия, изготовленные по специальным техническим условиям, предусматривавшим максимально возмож-

ное приближение этих препаратов по размерам ампул к эталону № 5427 — будущему государственному эталону радия. Всего получено два комплекта препаратов: по 9 в каждом с содержанием радия 0,01—200 мг. Эти препараты, сравненные с государственным эталоном радия на установках с ионизационной камерой и  $\alpha$ -калориметром, используются в качестве новых рабочих эталонов радия ВНИИМ [7].

Ближайшей задачей лаборатории в области измерений эталонов радия является переход на новый государственный эталон № 5427. Необходимой предпосылкой для такого перехода служит сличение этого эталона с другими эталонами Хенигшмидта, образующими в настоящее время первичный групповой эталон радия. Сличения, которые проводятся в лабораториях институтов радия в Париже и Вене и в Федеральном физико-техническом институте в Брауншвейге (ФРГ), близки к завершению.

В 1964—1965 гг. предполагается решить одну из интереснейших задач в области измерений эталонов радия: уточнить число актов распада, происходящих в 1 г радия.

### Воспроизведение единицы активности

В 1950 г. под руководством К. К. Аглинцева были начаты работы по осуществлению эталонного метода воспроизведения единицы активности и созданию соответствующей эталонной аппаратуры. Одновременно разрабатывали три метода абсолютного определения активности радиоактивных излучателей: метод абсолютного счета числа заряженных частиц или квантов, испускаемых излучателем в единицу времени, калориметрический и метод ионизационной камеры.

Первый метод основан на том, что в одном акте распада данного нуклида испускается определенное число заряженных частиц или квантов характеристического излучения. По числу частиц или квантов, регистрируемых в единицу времени с помощью газоразрядного или сцинтилляционного счетчика, можно определить число актов распада данного нуклида, т. е. активность. Этот метод применяется для точного измерения активности в довольно широком диапазоне  $10^{-11}$  —  $10^{-6}$  кюри, но предъявляет ряд серьезных требований к толщине и структуре активного слоя, материалу и толщине подложки источника.

Аппаратура для воспроизведения единицы активности методом абсолютного счета числа заряженных частиц или квантов и соответствующие методики измерений разрабатывались А. А. Константиновым, В. Я. Алексеевым, А. Е. Кочиным, В. В. Перепелкиным, Т. Е. Сазоновой, И. А. Соколовой, Н. В. Тришиным и др. На первом этапе этих работ была создана аппаратура и разработана методика абсолютного  $\beta$ -счета с помощью газоразрядного счетчика в ограниченном телесном угле [8]. В дальнейшем была использована более совершенная методика счета числа  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц с помощью  $4\pi$ -счетчиков [9]. Метод  $4\pi$ -счетчика свободен от многих недостатков, присущих методу счетчика с ограниченным телесным углом, дает более высокую точность результата и принципиально более прост.

В 1956—1957 гг.  $4\pi$ -счетчик был применен для абсолютного определения активности излучателей, распадающихся путем электронного захвата [10].

Калориметрический метод основан на измерении количества тепла, выделяющегося в калориметре при поглощении излучения, испускаемого помещенным в калориметр источником. Активность источника определяется как частное от деления измеренной тепловой мощности

на полную энергию всех излучений, выделяющуюся в среднем в одном акте распада данного нуклида, и на коэффициент, учитывающий степень поглощения излучений в калориметре.

В зависимости от конструкции калориметра и его вида, а также энергии излучений этот метод может применяться для измерения активности начиная с 0,001—0,01 *кюри* и выше и не предъявляет особых требований к толщине и удельной активности источников.

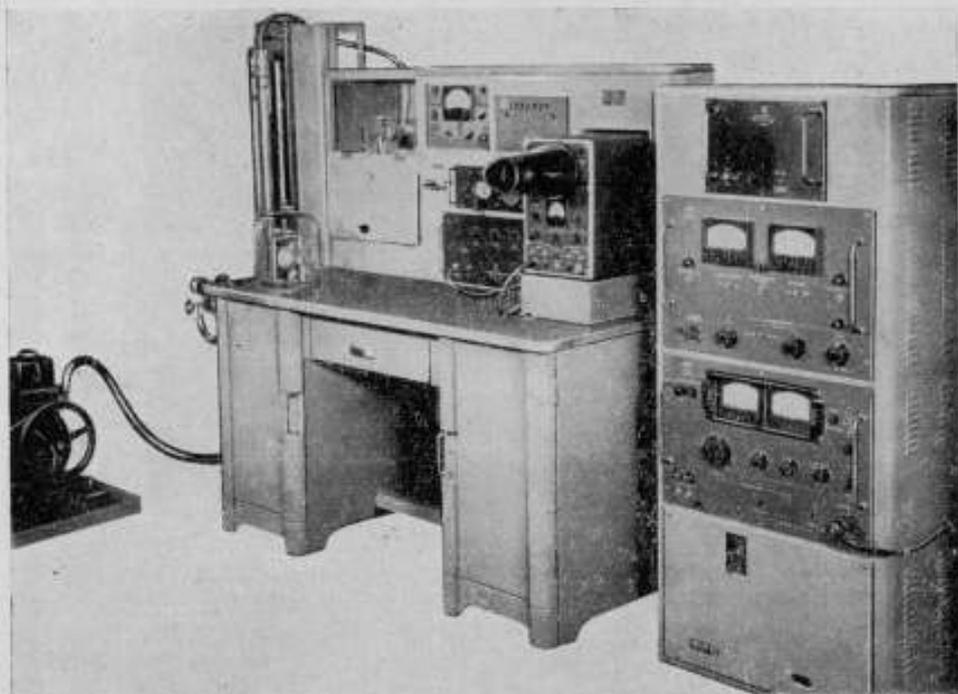


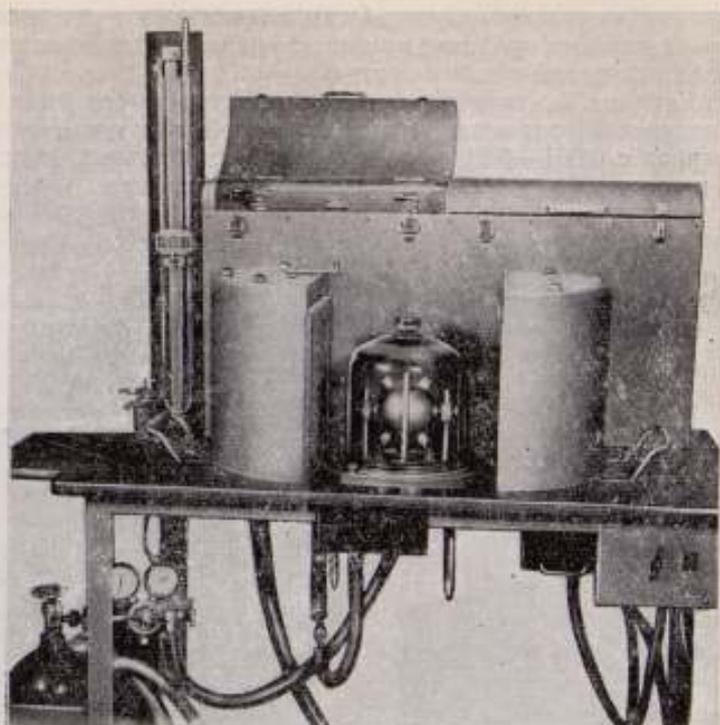
Рис. 4. Установка типа УСЧ-1.

Аппаратура для измерений активности калориметрическим методом была создана Е. А. Хольновой и Л. П. Кульковой под руководством К. К. Аглинцева. Помимо описанного выше  $\alpha$ -калориметра для сравнения радиевых эталонов была построена серия калориметров для измерения  $\alpha$ -,  $\beta$ -излучателей: дифференциальные свинцовые  $\alpha$ -калориметры статического типа [11], изотермический азотный  $\beta$ -калориметр, основанный на испарении жидкого азота под действием тепла, выделяющегося при поглощении  $\beta$ -излучения в жидком азоте [12], и изотермический азотный  $\gamma$ -калориметр. Наибольшее практическое применение получили свинцовые  $\gamma$ -калориметры.

Метод абсолютного измерения активности  $\gamma$ -излучателей с помощью ионизационной камеры основан на измерении ионизационного тока, создающегося под действием  $\gamma$ -излучения измеряемого излучателя, и на знании эффективности камеры (т. е. величины тока, отнесенной к единице активности данного излучателя), определяемой теоретическим расчетом. Этот метод применим для измерения активности  $\gamma$ -источников с известной схемой распада и хорошо изученным составом  $\gamma$ -спектра, имеющих активность выше 0,1 *микюри* (для  $\text{Co}^{60}$ ).

Для измерения активности методом ионизационной камеры разработана сферическая алюминиевая камера [13], которая является разновид-

a)



b)

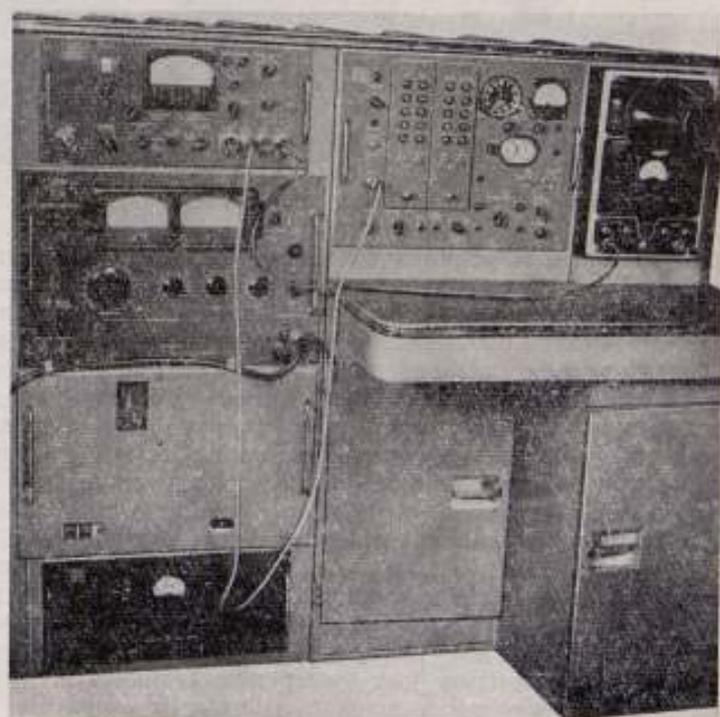


Рис. 5. Установка типа УСЧ-2: а) стенд с  $4\pi$ -счетчиком, б) стенд с радиоэлектронной аппаратурой.

ностью щелевых камер. Эффективность камеры вычислена по теории Брэгга-Грея так же, как для плоских щелевых камер. В 1951 г. ионизационная камера была вмонтирована в установку для сравнения радиевых эталонов.

К 1956 г. лаборатория располагала экспериментальными макетами эталонных установок для воспроизведения единицы активности тремя различными методами. В результате дальнейшей работы по конструктивному оформлению этих макетов в эталонные установки создана следующая эталонная аппаратура:

а) установка типа УСЧ-1 (рис. 4) для воспроизведения единицы активности методом абсолютного  $\alpha$ -счета (авторы А. А. Константинов и В. Я. Алексеев [14]);

б) установка типа УСЧ-2 (рис. 5) для воспроизведения единицы активности методом абсолютного  $\beta$ -счета (авторы А. А. Константинов и А. Е. Кочин [15]).

Обе установки состоят из  $4\pi$ -счетчиков в виде двух полуцилиндров, наполняемых метаном и работающих в пропорциональном режиме, и радиоэлектронных приборов для усиления, анализа и регистрации импульсов, поступающих от  $4\pi$ -счетчиков. Кроме того, они укомплектованы источниками питания (стабилизированными выпрямителями).

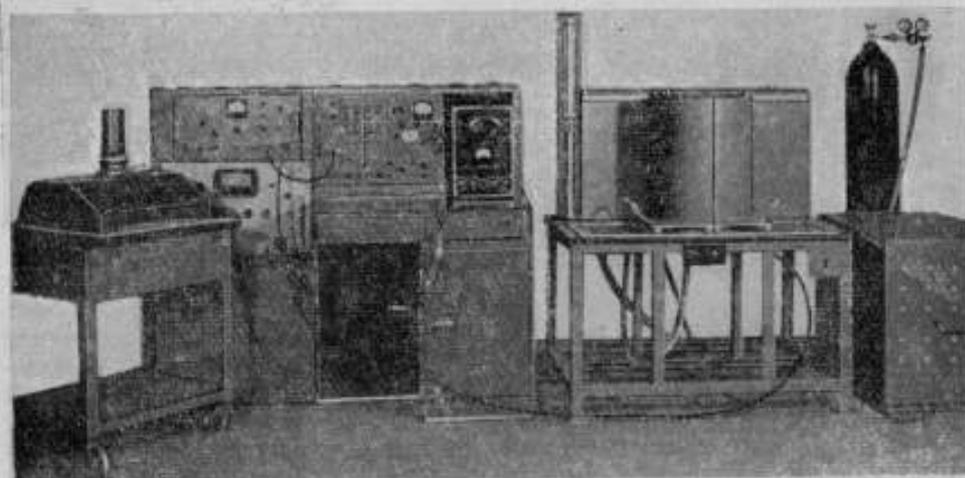


Рис. 6. Установка типа УСЧ-5.

Эти установки предназначены для определения удельной активности образцовых растворов радиоактивных нуклидов, а также для абсолютного измерения активности и внешнего излучения образцовых  $\alpha$ - и  $\beta$ -источников высшего разряда на металлических подложках с площадью активного слоя до  $4 \text{ см}^2$ . (Для измерения активности  $\beta$ -источников на металлических подложках необходимо знать соотношение между непосредственно измеряемым внешним излучением и активностью источника; соответствующие коэффициенты должны быть определены для всех образцовых  $\beta$ -источников.)

В связи с выпуском значительного числа  $\alpha$ - и  $\beta$ -источников на металлических подложках с площадью активной поверхности до  $160 \text{ см}^2$  (так называемых протяженных источников), предназначенных для градуировки  $\alpha$ - и  $\beta$ -радиометров, возникла необходимость в создании установки для измерения их активности и внешнего излучения. В 1961 г. была

изготовлена и исследована установка типа УСЧ-5 [16], сконструированная на основе ранее разработанных экспериментальных установок типов УСЧ-3 и УСЧ-4 (авторы А. А. Константинов, В. Я. Алексеев, В. В. Перепелкин, Н. В. Тришин и И. А. Соколова [17]).

В установке УСЧ-5 (рис. 6) применен 4 $\pi$ -счетчик больших размеров, состоящий из двух металлических корытообразных половин, одна из которых используется как 2 $\pi\alpha$ -счетчик, другая как 2 $\pi\beta$ -счетчик. В отличие от обычных 4 $\pi$ -счетчиков, каждая половина большого 4 $\pi$ -счетчика имеет не одну нить, а три. Кроме того, в половинках большого 4 $\pi$ -счетчика установлены экранирующие стержни. Установка УСЧ-5 позволяет измерять также относительную неравномерность распределения активности по поверхности протяженных источников.

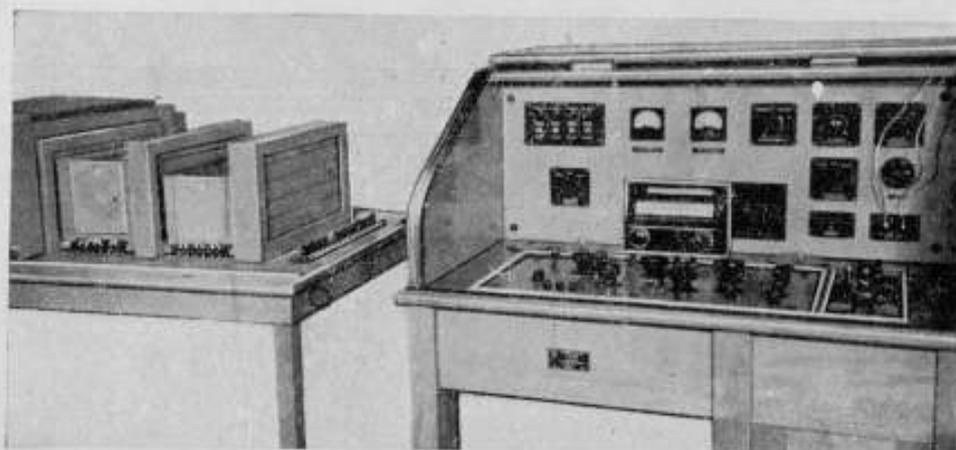


Рис. 7. Установка типа УКГ-1.

В 1959 г. Е. А. Хольновой и Л. П. Кульковой создана эталонная установка типа УКГ-1 (рис. 7) со свинцовыми  $\gamma$ -калориметрами статического типа [18]. Основной частью этой установки являются три двойных шаровых калориметра, находящихся внутри массивных медных блоков и защищенных свинцовыми экранами толщиной 5 см. Свинцовые шары имеют различные диаметры в зависимости от энергии  $\gamma$ -излучения измеряемых источников. Калориметры с шарами наибольшего диаметра предназначены для измерения источников с жестким  $\gamma$ -излучением ( $\text{Co}^{60}$ ), с шарами среднего диаметра — для измерения источников со средними энергиями  $\gamma$ -квантов ( $\text{Cs}^{137}$ ) и калориметры с шарами наименьшего диаметра — для измерения источников с мягким  $\gamma$ -излучением ( $\text{Cr}^{51}$ ,  $\text{Hg}^{203}$ ).

В 1962 г. А. А. Константиновым и А. Е. Кочным создана установка для абсолютного измерения активности  $\beta\gamma$ -источников методом  $\beta\gamma$ -и  $\gamma\gamma$ -совпадений. Эта установка позволяет в некоторых случаях получить результат с большей точностью, чем это возможно на других имеющихся установках, а также несколько расширяет пределы измерения активности в область выше  $10^{-6}$  кюри, ранее не охваченную эталонными измерениями.

Начиная с 1961 г. лаборатория принимает участие в международных сличениях образцовых растворов радиоактивных нуклидов по программе МБМВ, которые проводятся для поддержания единства измерений в области радиоактивности во всем мире. Техника сличений такова:

образцы одного и того же раствора в запаянных ампулах рассылаются всем участникам сличения: национальным и международным метрологическим лабораториям. Каждая лаборатория на своих эталонных установках определяет удельную активность полученного раствора, а результаты измерений высылает в МБМВ, где их анализируют и составляют соответствующий отчет. Таким образом, каждый участник сличения, получая отчет, может сравнить свои данные с результатами других лабораторий и с средним международным значением, т. е. тем самым оценивает возможные неучтенные систематические погрешности своих измерений.

К настоящему времени лаборатория провела сличения растворов  $R^{22}$ ,  $Co^{60}$ ,  $Ti^{204}$  и  $Am^{241}$ , а также «твердых» источников  $Co^{60}$  на тонких пленках; в последнем случае активность «твердых» источников была предварительно измерена в Национальной физической лаборатории (НФЛ, Англия) и в лаборатории Евратома (Бельгия). Результаты показали, что по точности воспроизведения единицы активности радиометрическая лаборатория ВНИИМ находится на высоком уровне и не уступает лучшим зарубежным метрологическим лабораториям.

Работы по международным сличениям на установках УСЧ-1, УСЧ-2 и других проводились А. А. Константиновым, А. Е. Кочиным, В. Я. Алексеевым, В. В. Перепелкиным и Т. Е. Сазоновой.

#### Работы по передаче размера единицы активности

Размер единицы активности, воспроизводимой эталонным методом с помощью различных установок, необходимо передать рабочим источникам и радиометрам. Порядок и средства передачи устанавливаются поверочной схемой.

Во главе поверочной схемы для  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -источников и  $\alpha$ - и  $\beta$ -радиометров, градуируемых в единицах активности, стоят уже названные эталонные установки, с помощью которых единица активности воспроизводится эталонным методом. Путем прямых измерений градуируются  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -источники, изготовленные по специальным техническим условиям и аттестуемые в качестве рабочих эталонов ВНИИМ. Эти эталоны хранятся и применяются во ВНИИМ для градуировки относительным методом подобных же источников, аттестуемых в качестве образцовых источников 1-го разряда. Последние можно также градуировать путем прямых измерений с помощью установок ВНИИФТРИ и НГИМИП, аналогичных эталонным установкам ВНИИМ и периодически сличаемых с последними.

Образцовые источники 1-го разряда хранятся и применяются в институтах Государственного комитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР и в головных ведомственных поверочных лабораториях для градуировки относительным методом подобных же источников, аттестуемых в качестве образцовых источников 2-го разряда. Последние хранятся и применяются во всех государственных контрольных и ведомственных поверочных лабораториях для градуировки относительным методом образцовых источников 3-го разряда, которые применяются для градуировки радиометрической аппаратуры.

В зависимости от диапазона активности и вида излучения поверочная схема предусматривает градуировку образцовых и рабочих источников относительным методом с помощью установок со счетчиками (газоразрядными или сцинтилляционными) или ионизационными камерами.

Деятельность лаборатории в последние годы была направлена на разработку установок для поверки образцовых и рабочих источников, предназначенных для оснащения соответствующих поверочных лабораторий.

В 1961 г. Ф. М. Караваевым, А. Ф. Дричко, Л. П. Жуковской и С. А. Русиновой создана образцовая установка типа УПИ-1 для поверки  $\gamma$ -источников в единицах активности в диапазоне 0,1—1000 мкюри (по  $\text{Co}^{60}$ ) [19].

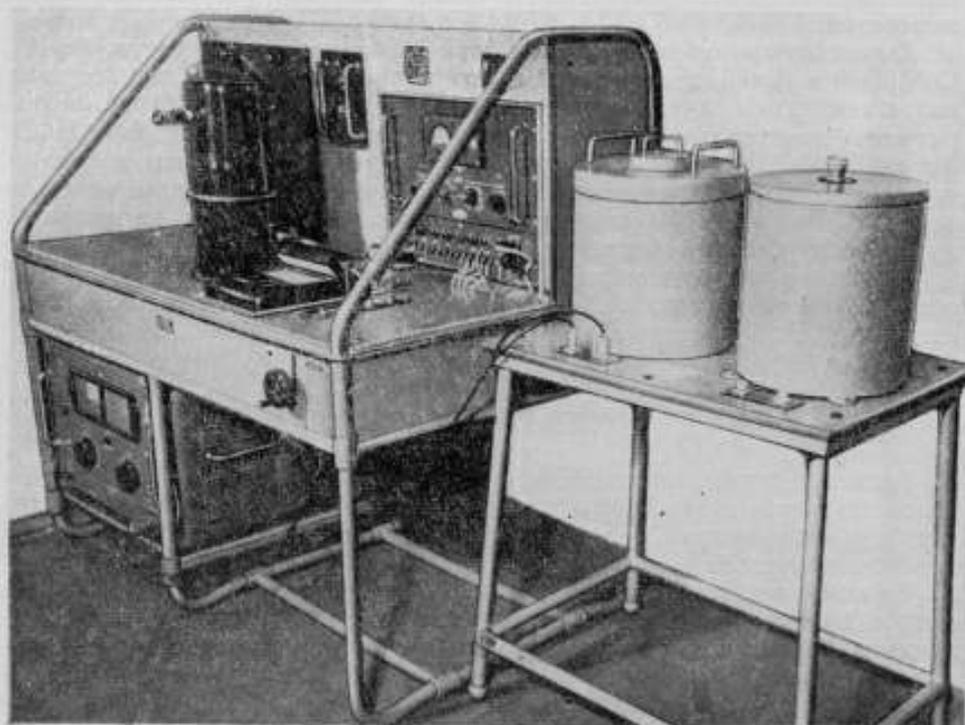


Рис. 8. Установка типа УПИ-1.

Установка УПИ-1 (рис. 8) состоит из двух цилиндрических ионизационных камер с каналом для источников и стенда с электрометрическим устройством (установкой УЭМ-1) по компенсационной схеме Таунсенда с электрометром типа СГ-1М. Одна камера объемом около 4 л имеет наружный свинцовый экран толщиной 4—5 см и предназначена для поверки источников с активностью от 1 мкюри и выше (по  $\text{Co}^{60}$ ), другая камера объемом около 15 л и без защитного экрана предназначена для сравнения источников с активностью ниже 1 мкюри (по  $\text{Co}^{60}$ ), а также для сравнения по  $\gamma$ -излучению образцовых растворов радиоактивных нуклидов в закрытых стеклянных ампулах с общей активностью не ниже 25 мкюри (по  $\text{Co}^{60}$ ).

В 1963 г. С. А. Русиновой, Л. П. Жуковской и И. А. Соколовой создана другая образцовая установка типа УПИ для поверки  $\gamma$ -источников в диапазоне активности 0,1—100 мкюри. Она состоит из блока со сцинтилляционным детектором и стенда с радиоэлектронной аппаратурой. Источники могут сравниваться как в  $4\pi$ -геометрии, так и в геометрии ограниченного телесного угла.

В 1962 г. А. А. Константинов, В. Я. Алексеев и Н. В. Тришин провели государственные испытания установки, разработанной и изготовленной по техническому заданию ВНИИМ для поверки образцовых  $\alpha$ - и  $\beta$ -источников с активностью  $10^{-11}$ — $10^{-4}$  *кюри* с площадью активной поверхности до 160  $\text{см}^2$ . Установка состоит из двух столов со сцинтилляционными детекторами разных размеров, встроенных в свинцовые дощечки, и анализатора импульсов.

В 1960—1961 гг. С. А. Русиновой и Е. П. Москвиной под руководством К. К. Аглинцева создана и исследована экспериментальная аппаратура для измерений активности  $\beta$ -излучателей в диапазоне 0,01—10 *мкюри* с помощью экстраполяционной ионизационной камеры [20].

Образцовые источники изготавливаются на основе специальных технических условий МРТУ-10-1-2-61 [21], выработанных межведомственными совещаниями, происходившими в 1961 и 1964 гг. во ВНИИМ. Изготовлено и аттестовано 6 комплектов образцовых  $\gamma$ -источников 1-го разряда из  $\text{Co}^{60}$  с активностью 0,5—350 *мкюри* [22]. В стадии изготовления находятся образцовые  $\alpha$ - и  $\beta$ -источники 1-го разряда. Их градуировка и аттестация составляет одну из ближайших задач лаборатории.

В результате выполнения описанных работ в радиометрической лаборатории созданы эталонные установки для воспроизведения единицы активности радиоактивных источников в широком диапазоне, а также разработана типовая образцовая аппаратура для поверки образцовых источников. Этим заложена научно-техническая основа организации поверочной службы в области радиоактивности, призванной обеспечить единство измерений в стране.

В ближайшие 2—3 года в области научных исследований и создания новых эталонных и образцовых измерительных установок перед лабораторией стоят следующие задачи:

- 1) создание эталонной и образцовой аппаратуры для воспроизведения и передачи единицы активности для  $\beta$ -излучателей с низкой энергией частиц;
- 2) создание образцовой аппаратуры для поверки  $\beta$ -источников с помощью ионизационной камеры;
- 3) исследование спектров излучения образцовых  $\alpha$ - и  $\beta$ -источников;
- 4) повышение точности воспроизведения и передачи размера единицы активности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Богоявленский Л. И., Труды ВНИИМ, вып. 26(42), 1939, стр. 3.
2. Аглинцев К. К., Труды ВНИИМ, вып. 7(52), 1941, стр. 33.
3. Аглинцев К. К., Караваяев Ф. М., Труды ВНИИМ, вып. 30(90), 1957, стр. 37.
4. Дричко А. Ф., Караваяев Ф. М., Русинова С. А., Новые научно-исследовательские работы по метрологии, Информационный сборник, № 2, 1964, стр. 18—21.
5. Караваяев Ф. М., Труды ВНИИМ, вып. 30(90), 1957, стр. 53.
6. Тимофеева Л. П., Хольцова Е. А., Труды институтов Комитета стандартов, вып. 55(115), 1961, стр. 5.
7. Дричко А. Ф., Жуковская Л. П., Караваяев Ф. М., Русинова С. А., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 55(115), 1961, стр. 81.
8. Константинов А. А., Труды ВНИИМ, вып. 30(90), 1957, стр. 9.
9. Аглинцев К. К. и др., Труды ВНИИМ, вып. 33(93), 1958, стр. 135.
10. Константинов А. А., «Приборы и техника эксперимента», № 1, 1959, стр. 67.
11. Аглинцев К. К., Хольцова Е. А., Труды ВНИИМ, вып. 30(90), 1957, стр. 25.

12. Аглинцев К. К., Хольнова Е. А., ДАН СССР, т. ХСVIII, 1964, стр. 357.
13. Караваев Ф. М., «Измерительная техника», № 5, 1959, стр. 60.
14. Алексеев В. Я., Константинов А. А., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 69(129), 1962, стр. 5.
15. Константинов А. А., Кочин А. Е., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 69(129), 1962, стр. 13.
16. Константинов А. А., Кочин А. Е., Перепелкин В. В., Новые научно-исследовательские работы по метрологии, Информационный сборник, № 2, 1964, стр. 4.
17. Алексеев В. Я., Константинов А. А., Перепелкин В. В., Соколова И. А., Тришин Н. В., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 69(129), 1962, стр. 23.
18. Аглинцев К. К., Кулькова Л. П., Хольнова Е. А., Новые научно-исследовательские работы по метрологии, Информационный сборник, № 2, 1964, стр. 1.
19. Дричко А. Ф., Жуковская Л. П., Караваев Ф. М., Русникова С. А., Новые научно-исследовательские работы по метрологии, Информационный сборник, № 2, 1964, стр. 13.
20. Аглинцев К. К., Москвина Е. П., Русникова С. А., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 69(129), 1962, стр. 42.
21. Изотопы. Источники излучений и радиоактивные материалы (каталог), Атомиздат, 1962, стр. 129; Инихов Г. Н., Альфа-, бета-, гамма и нейтронные излучатели для контроля и градуировки дозиметрической и радиометрической аппаратуры, Атомиздат, 1963.
22. Дричко А. Ф., Караваев Ф. М., Кулькова Л. П., Хольнова Е. А., Новые научно-исследовательские работы по метрологии, Информационный сборник, № 2, 1964, стр. 11.

## ЯДЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ

Быстрое развитие ядерной энергетики и широкое применение радиоактивных изотопов в различных областях науки и техники выдвигают ряд вопросов, для решения которых необходимо знать свойства излучений радиоактивных изотопов. Эти сведения требуются для разработки методики опытов, для правильного определения доз и организации защиты от различных ядерных излучений персонала, работающего с радиоактивными веществами.

Как известно [1], для получения дозиметрических характеристик излучателей, наряду с частными параметрами конкретных излучателей (для определения различных поправок), необходимо знать такие основные физические характеристики, как максимальная и средняя энергия  $\beta$ -спектра. В случае сложных  $\beta$ -спектров сюда прибавляются сведения о числе компонентов, их относительной интенсивности, максимальной и средней энергии отдельных компонентов. Чтобы правильно переходить от измеренного числа  $\beta$ -частиц к числу актов распада в препарате, необходимы сведения об энергии конверсионных электронов и их числе. В  $\gamma$ -спектрах должны быть известны относительные интенсивности, длины волн отдельных спектральных линий и число  $\gamma$ -квантов на акт распада.

При длительной работе с препаратом следует также иметь данные о периоде полураспада и о его радиологической чистоте.

Исследуя излучения, испускаемые радиоактивными нуклидами, можно получить также все основные данные о свойствах неустойчивых состояний ядер, что позволяет глубже выяснить многие детали структуры ядра.

Изучением перечисленных физических характеристик радиоактивных нуклидов занимается лаборатория ядерной спектроскопии ВНИИМ, основанная Б. С. Желеповым.

В настоящее время лаборатория работает над вопросами:

- 1) разработки и создания аппаратуры для исследований  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения радиоактивных ядер;
- 2) измерения  $\beta$ - и  $\gamma$ -спектров радиоактивных нуклидов;
- 3) выявления свойств ядер, проявляющихся в  $\beta$ - и  $\gamma$ -спектрах.

## Магнитный $\gamma$ -спектрометр ВНИИМ

Первая работа по созданию прецизионного  $\gamma$ -спектрометра была начата во ВНИИМ еще до организации лаборатории ядерной спектроскопии и закончена в 1956 г. В результате удалось достигнуть рекордной в то время разрешающей способности магнитного  $\gamma$ -спектрометра: около 2% при энергии в 1 мэв [2—4]. В последующие годы изучалась возможность создания магнитного  $\gamma$ -спектрометра с еще более высокой разрешающей способностью. Расчеты В. Д. Витмана указали пути для решения этой задачи. В 1956—1959 гг. был построен новый большой спектрометр, оправдавший возлагавшиеся на него надежды (основной исполнитель В. Д. Витман).

Принципиальная схема спектрометров следующая:  $\gamma$ -лучи, испускаемые препаратом, попадают на тонкую изогнутую целлофановую мишень. Электроны отдачи, выбитые из мишени, фокусируются сначала однородным магнитным полем на первую щель, затем неоднородным магнитным полем — на вторую щель. Электроны регистрируются счетчиками Гейгера—Мюллера, расположенными за первой и второй щелями, причем регистрируются лишь совпадения разрядов в этих счетчиках при различной величине магнитного поля.

Основные характеристики большого  $\gamma$ -спектрометра ВНИИМ следующие: фон случайных и космических совпадений очень мал. С источником  $\text{Co}^{60}$  активностью  $\sim 3$  кюри фон составляет 0,1—0,2 совп/ч; разрешающая способность (ширина линии на половине высоты) равна 1% при  $E_\gamma > 1500$  кэв; 1,2% — при  $E_\gamma = 1000$  кэв и 3% — при  $E_\gamma = 400$  кэв. Светосила спектрометра (число тройных совпадений на максимуме линии, рассчитанное на один квант, вылетающий из источника) равна  $2,2 \cdot 10^{-11}$  совп/квант при  $E_\gamma = 1000$  кэв.

Только в конце 1959 г. появились сообщения о создании аналогичных спектрометров в Институте атомной энергии АН СССР [5] с разрешающей способностью 0,6% при светосиле  $1,5 \cdot 10^{-12}$  совп/квант и в Лос-Аламосской научной лаборатории [6] с разрешающей способностью  $1 \div 0,5\%$  в интервале энергий 0,5—6,5 мэв (данных о светосиле нет). В настоящее время при помощи ВНИИМ аналогичные спектрометры созданы в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) и в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе.

### Измерения $\gamma$ -спектра радия (В + С) и других изотопов

При помощи описанных выше спектрометров был исследован радий, находящийся в равновесии с продуктами распада. Радий является классическим объектом для метрологических сравнений в области радиоактивности: он имеет большой период полураспада, может быть получен в достаточно чистом виде, и количество его может быть определено непосредственным взвешиванием. Результаты исследований (энергия и относительная интенсивность  $\gamma$ -линий) опубликованы в работах [7—15]. Данные о составе спектра  $\gamma$ -излучения радия являются в настоящее время наиболее точными.

После окончания измерений  $\gamma$ -спектра радия в 1960 г. был измерен участок спектра  $\text{Ta}^{182}$ . Предшествующие измерения этого спектра выдвинули ряд физических задач, для решения которых был необходим спектрометр с высокой разрешающей способностью. Ядра  $\text{Ta}^{182}$  являются сильно деформированными: знать соотношение интенсивностей  $\gamma$ -линий в спектре  $\text{Ta}^{182}$  необходимо при разработке теории строения этого ядра. Результаты работы опубликованы в статьях [16, 17].

Лучшее разрешение, чем у имевшихся ранее спектрометров, и хорошо известная спектральная чувствительность прибора позволили уточнить относительные интенсивности, а в ряде случаев и энергии  $\gamma$ -переходов в спектрах  $\text{Ir}^{194}$  [18],  $\text{Ga}^{72}$  [19] и  $\text{As}^{76}$ . В  $\text{Ga}^{72}$  из 33 наблюдавшихся  $\gamma$ -переходов 16 обнаружены впервые. В  $\text{As}^{76}$  из 23 линий 7 также обнаружены впервые.

Проведены измерения  $\gamma$ -спектров образцовых препаратов цезия и кобальта.

Определение примеси  $\text{Cs}^{134}$  в образцовых препаратах  $\text{Cs}^{137}$  оказалось необходимым потому, что они изготавливаются из  $\text{Cs}^{137}$ , извлекаемого из продуктов деления. При этом примесь более короткоживущего  $\text{Cs}^{134}$  ( $T_{1/2} = 1,9$  года) неизбежна, что является недостатком образцового препарата. Измерения препаратов, имевшихся во ВНИИМ, показали, что примесь  $\text{Cs}^{134}$  составляла в них 5% по активности.

Согласно государственному стандарту, в кобальте, из которого приготовлены образцовые препараты, только изотоп  $\text{Fe}^{59}$  может быть относительно долгоживущей примесью, дающей  $\gamma$ -лучи. Поэтому необходимо знать предел примеси  $\text{Fe}^{59}$  в  $\text{Co}^{60}$ . В наших препаратах эта примесь не обнаружена. Если она имеется, то по активности менее 1%.

### Магнитные $\beta$ -спектрометры ВНИИМ

Уже в начале 40-х годов стало ясно, что спектры конверсионных электронов у большинства радиоактивных нуклидов весьма сложны. Следовательно, для их изучения необходимы  $\beta$ -спектрометры с высокой разрешающей способностью. В течение ряда лет были созданы такие спектрометры: катроны, спектрометры с радиальной фокусировкой на угол  $\pi/2$ , на угол  $\pi$  и др. В них высокая разрешающая способность сочеталась с умеренной светосилой. Эти спектрометры пригодны для решения разнообразных задач ядерной спектроскопии и широко используются по настоящее время. Однако для многих специальных задач эти универсальные  $\beta$ -спектрометры не являются наилучшими.

На  $\beta$ -спектрометрах обычного типа далеко не просто, а в ряде случаев даже невозможно исследовать электронный спектр, если радиоактивное вещество, испускающее много позитронов, загрязнено небольшим количеством вещества, испускающего электроны, например, в соотношении (позитроны/электроны)  $> 10^5$ . Поэтому постепенно стали разрабатываться  $\beta$ -спектрометры специального назначения.

В 1949 г. по идее Б. С. Джелепова был создан в Ленинградском университете Н. М. Антоньевой и С. А. Шестопаловой  $\beta$ -спектрометр с трехкратной фокусировкой. Продолжение работ в этом направлении подтвердило высокие качества такого типа спектрометров.

Работа по созданию аппаратуры для точных измерений в области  $\beta$ -спектрометрии начата во ВНИИМ только во второй половине 1958 г. (основные исполнители работ С. А. Шестопалова, И. Ф. Учеваткин и А. И. Медведев).

В 1959 г. начал работать  $\beta$ -спектрометр с трехкратной фокусировкой в однородном поле. Принципиальная схема спектрометра следующая. Электронный пучок, выходящий из источника, фокусируется три раза в однородном магнитном поле, постепенно перемещаясь вдоль него. Используются электроны, выходящие под некоторым углом к плоскости, перпендикулярной магнитному полю. Совпадения разрядов в счетчиках, расположенных один над другим за первым и третьим фокусами, регистрируются. Благодаря небольшому фону (1—2 совп/ч) на этом спектро-

метре удалось обнаружить  $0^+ \rightarrow 0^+$  переход при распаде  $\text{Pt}^{140} \rightarrow \text{Ce}^{140}$  [20] и найти новые линии в спектрах  $\text{Lu}^{169, 170, 172}$  [21]. С 1959 г. в лаборатории начаты поиски путей для создания  $\beta$ -спектрометра с кратной фокусировкой в неоднородном поле. Применение неоднородного поля позволяет улучшить фокусировку пучка, а следовательно, и разрешающую способность спектрометра — одну из основных его характеристик. Кратная фокусировка уменьшает рассеяние и фон.

В лаборатории разработан по идее Б. С. Желепова и построен И. Ф. Учеваткиным  $\beta$ -спектрометр с двукратной фокусировкой на угол  $180^\circ$  [22]. Для улучшения фокусировки используется «краевой эффект» в однородном поле, для второй фокусировки — шиммирование магнитного поля внутри полюсных наконечников. Наилучшее разрешение, полученное на этом приборе, 0,5%; фон составляет 0,2 совп/ч. При помощи этого спектрометра впервые исследованы излучения  $\text{Te}^{118} + \text{Sb}^{118}$ ,  $\text{Te}^{119} + \text{Sb}^{119}$  [23] и фракции церия [24].

Важным результатом работы лаборатории в 1960 г. следует считать создание нового  $\beta$ -спектрометра с двукратной фокусировкой на угол  $\pi\sqrt{2}$  [25]. Применение кратной фокусировки на угол  $\pi\sqrt{2}$  возможно благодаря тому, что в магнитном поле, спадающем по радиусу и обладающем осевой симметрией, электроны осциллируют как по радиусу  $\rho$ , так и по направлению поля. Если источник поместить выше плоскости симметрии магнитного поля, то первый фокус будет расположен ниже этой плоскости. Этот «фокус» изогнут, соответственно изогнутой становится первая щель. После прохождения щели и счетчика Гейгера-Мюллера с тонкими пленками на окнах электронный пучок начинает подниматься. Он проходит под источником и фокусируется вторично через  $254,5^\circ$  после первого фокуса настолько выше плоскости симметрии, насколько выше расположен источник. За вторым фокусом расположены два счетчика Гейгера-Мюллера. Тройные совпадения разрядов в счетчиках считаются.

Исследования показали высокие спектрометрические качества прибора: по разрешению и светосиле он почти не уступает лучшим отечественным спектрометрам типа  $\pi\sqrt{2}$ . Фон у спектрометра ВНИИМ практически отсутствует: у обычного спектрометра типа  $\pi\sqrt{2}$  фон достигает нескольких импульсов в минуту, а в спектрометре с двукратной фокусировкой фон меньше одного совпадения за 30—40 ч.

Наилучшее разрешение, полученное на спектрометре ВНИИМ с источником осадка радиотория, составляет 0,21%. При помощи этого спектрометра исследованы спектры  $\text{Cs}^{137}$ ,  $\text{Pt}^{140}$  и фракции лютеция [26—28].

Высокие качества  $\beta$ -спектрометров дали возможность значительно уточнить, а в ряде случаев получить новые, неизвестные ранее, сведения о распаде исследованных изотопов. Рассчитаны относительные интенсивности обнаруженных конверсионных линий.

При помощи таких спектрометров с успехом могут решаться задачи как научного, так и прикладного характера. Благодаря чрезвычайно низкому фону эти спектрометры находят применение при определении малоинтенсивного излучения, а следовательно, могут быть весьма полезны при решении вопроса о радиологической чистоте препаратов, а также для определения периода полураспада радиоактивного вещества по спаданию интенсивности спектральных линий.  $\beta$ -спектрометром с фокусировкой на угол  $\pi\sqrt{2}$  заинтересовались не только в СССР, но и за рубежом.

В дальнейшем предполагается провести в лаборатории работы по усовершенствованию магнитных спектрометров ВНИИМ, по уточнению

и определению перечисленных ранее физических характеристик радиоактивных нуклидов. Будут развиваться также работы по определению путей использования эффекта Мессбауэра в метрологии (например, для измерения низких температур).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аглинцев К. К., Труды ВНИИМ, вып. 30(90), 1957, стр. 3.
2. Джеленов Б. С., Жуковский Н. Н., Карамян А. С. и Шестопалова С. А., Изв. АН СССР, сер. физ., т. 17, 1953, стр. 518.
3. Джеленов Б. С., Шестопалова С. А., Изв. АН СССР, сер. физ., т. 20, 1956, стр. 328.
4. Джеленов Б. С., Шестопалова С. А., Nuovo Cim, v. 3, Suppl. 1, 1956.
5. Грошев Л. В., Демидов А. М., Луценко В. Н., Малов Ф., Изв. АН СССР, сер. физ., т. 24, стр. 79, 1960.
6. Motz H. T., Carter R. F., Tisher P. C., Bull. Amer. Phys. Soc., v. II, pt. 4, 1959, p. 246.
7. Джеленов Б. С., Шестопалова С. А., Изв. АН СССР, сер. физ., т. 20, 1956, стр. 933.
8. Джеленов Б. С., Шестопалова С. А., Изв. АН СССР, сер. физ., т. 21, 1957, стр. 990.
9. Аглинцев К. К., Джеленов Б. С. и др., Метрология проникающих излучений, ст. в сб. «Атомная энергия в мирных целях», ГЭИ, 1957, стр. 145.
10. Учеваткин И. Ф., Шестопалова С. А., Изв. АН СССР, сер. физ., т. 21, 1957, стр. 1002.
11. Джеленов Б. С., Шестопалова С. А., Учеваткин И. Ф., Nucl. Phys., v. 5, 1958, p. 413.
12. Джеленов Б. С., Жуковский Н. Н., Учеваткин И. Ф. и Шестопалова С. А., Изв. АН СССР, сер. физ., т. 22, 1958, стр. 841.
13. Джеленов Б. С., Жуковский Н. Н., Учеваткин И. Ф. и Шестопалова С. А., Nucl. Phys., v. 8, 1958, p. 250.
14. Джеленов Б. С., Емельянов Б. А., Подкопаев О. Н., Подымкин В. Н., Учеваткин И. Ф., Шестопалова С. А., Изв. АН СССР, сер. физ., т. 23, 1959, стр. 832.
15. Витман В. Д., Джеленов Б. С., Каран А. А., Изв. АН СССР, сер. физ., т. 25, 1961, стр. 201.
16. Витман В. Д., Воинова Н. А., Джеленов Б. С., Каран А. А., Изв. АН СССР, сер. физ., т. 25, 1961, стр. 199.
17. Витман В. Д., Воинова Н. А., Джеленов Б. С., Каран А. А., ЖЭТФ, т. 40, 1961, стр. 479.
18. Витман В. Д., Воинова Н. А., Джеленов Б. С., Изв. АН СССР, сер. физ., т. 26, № 12, 1962, стр. 1475.
19. Витман В. Д., Воинова Н. А., Джеленов Б. С., Изв. АН СССР, сер. физ., т. 27, № 2, 1963, стр. 249; Nucl. Phys., v. 46, 1963, p. 368.
20. Джеленов Б. С., Учеваткин И. Ф., Шестопалова С. А., ЖЭТФ, т. 37, 1959, стр. 857.
21. Джеленов Б. С., Учеваткин И. Ф., Шестопалова С. А., Изв. АН СССР, сер. физ., т. 24, 1960, стр. 802.
22. Учеваткин И. Ф., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 69 (129), 1962, стр. 95.
23. Джеленов Б. С., Учеваткин И. Ф., Чихладзе В. Л., Шестопалова С. А., Тезисы докладов II Совещания по ядерной спектроскопии, изд. АН СССР, стр. 40, 1960.
24. Джеленов Б. С., Медведев А. И., Учеваткин И. Ф., Шестопалова С. А., Изв. АН СССР, сер. физ., т. 27, № 2, 1963, стр. 204.
25. Шестопалова С. А., Изв. АН СССР, сер. физ., т. 25, № 10, 1961, стр. 1302; Nucl. Instr. and Meth., v. 17, 1962, p. 94.
26. Джеленов Б. С., Медведев А. И., Учеваткин И. Ф., Шестопалова С. А., Изв. АН СССР, сер. физ., т. 26, № 2, 1962, стр. 162.
27. Балалаев В. А., Джеленов Б. С., Медведев А. И., Учеваткин И. Ф., Изв. АН СССР, сер. физ., т. 27, № 2, 1963, стр. 200.
28. Балалаев В. А., Джеленов Б. С., Медведев А. И., Мештер А., Учеваткин И. Ф., ЖЭТФ, т. 43, 1962, стр. 2019.

О РАЗВИТИИ РАБОТ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ВРЕМЕНИ  
И ЧАСТОТЫ В СССР

Вопросами измерения и хранения единицы времени — секунды — в СССР занимается служба времени.

В России первые работы по измерению и хранению единицы времени относятся к моменту организации Пулковской астрономической обсерватории в 1839 г. и Депо образцовых мер и весов в 1842 г.

На протяжении более чем полстолетия деятельность службы времени носила весьма ограниченный характер, обслуживая главным образом потребности навигации. Только с 1900 г. в Главной палате начались серьезные метрологические работы в области измерения времени.

В 1905 г. Главная палата пополнилась первоклассными для того времени маятниковыми астрономическими часами Рифлера P81, P86, P67 и P68. В 1921 г. в Главной палате была организована лаборатория времени. В этой лаборатории были всесторонне изучены причины погрешностей часов Рифлера и точность их доведена до рекордного в те годы значения: вариация хода не превышала 5 мсек в сутки. Особенно велика в этом деле заслуга Н. Х. Прейпича.

Маятниковые астрономические часы оставались самым точным инструментом для хранения шкалы времени примерно до середины 30-х годов, когда кварцевые часы стали давать большую точность. Однако еще на протяжении, по крайней мере, десятилетия служба времени пользовалась маятниковыми часами.

Приблизительно в 1940 г. в практику начали входить новые более совершенные маятниковые часы типа Шорт. Во ВНИИМ эти часы были всесторонне исследованы, а затем были разработаны и сконструированы часы подобной конструкции, названные часами Шорта — Кварнберга.

В 1936 г. в ХГИМИП приступили к разработке первых в СССР кварцевых часов, однако война прервала эту работу. В конце 40-х годов создание кварцевых часов было завершено: во ВНИИМ — под руководством Б. К. Шембеля, в ХГИМИП — под руководством Л. Д. Брызжева. По сравнению с часами Шорта — Кварнберга эти часы имеют более высокую точность. Кроме того, они выполняют функции хранителя единицы частоты в удобной для использования форме.

Остановимся подробно на описании кварцевых часов ХГИМИП, поскольку они на протяжении долгого времени были в СССР основным хранителем шкалы времени и одновременно фактическим эталоном

частоты. В их состав входила группа из четырех кварцевых генераторов: КХ1, КХ2, КХ3, КХ4, которые сличались между собой по частоте непрерывно в течение всего срока их работы путем счета числа биений между генераторами группы. Для этого были созданы две группы счетчиков по четыре в каждой. Ежедневно в 12 ч выключали одну группу и включали другую. Выключенная группа счетчиков оставалась неподвижной в течение суток. С нее списывали показания. В это время вторая группа работала. Через сутки группы меняли местами и показания списывали с остановленной группы. Такой способ позволял, не прерывая работы генераторов, профилактически ремонтировать счетные устройства.

Чтобы уменьшить влияние питающего напряжения на работу группы генераторов и сделать их максимально независимыми друг от друга, генераторы питали от различных источников, представлявших собой аккумуляторные батареи, находящиеся в режиме буферного подзаряда.

Генераторы отличались друг от друга типом схем: два были собраны по реостатно-емкостной схеме Терри, два — по мостовой схеме Мичема.

В трех генераторах из четырех применялись резонаторы фирмы Löwe, представляющие собой бруски X-среза, колеблющиеся на второй гармонике по длине на частоте 60 кГц. Их добротность составляла около 250—300 тыс. В четвертом генераторе применялся аналогичный резонатор, изготовленный в ХГИМИП.

В период создания кварцевых часов ХГИМИП не было еще надежных способов деления частоты. Поэтому каждый из двух делителей частоты, работающих от генераторов КХ2 и КХ3, резервировался двумя запасными делителями. Это гарантировало непрерывность работы часов на весь период существования. Действительное значение времени и частоты этих часов устанавливалось по астрономическим наблюдениям и по поправкам на принимаемые сигналы времени от радиостанций, определяемым службой времени Советского Союза.

Нестабильность частоты кварцевых генераторов определяли путем их взаимного сличения в следующей последовательности: первый генератор сличался со вторым, второй — с третьим, третий — с четвертым, четвертый — с первым. Сличение по кольцу было необходимо потому, что могла нарушиться работа счетчиков, а именно сумма биений на всех счетчиках (с учетом соответствующих знаков) могла оказаться не равной нулю. При нормальной работе счетчиков эта сумма, как правило, не превышала одного или двух биений.

Погрешность при таком методе сличения, когда счетчики останавливали в строго определенный момент времени, составляла одно — два биения, что соответствует в относительном выражении  $(1 \div 3) \cdot 10^{-10}$ .

Вариация частоты одного генератора по отношению к другому после исключения систематических погрешностей представляет геометрическую сумму вариаций каждого из генераторов. Поэтому по определенным сличениям с помощью счетчиков вариациям частоты первого генератора по отношению ко второму, второго к третьему и т. д. составляли систему из шести уравнений с четырьмя неизвестными. Решение системы давало значение вариации частоты каждого отдельного генератора.

Два дополнительных уравнения системы получались при определении вариации частоты первого генератора по отношению к третьему, а второго по отношению к четвертому. Среднее значение вариации характеризовалось средним квадратичным.

Стабильность генераторов кварцевых частот ХГИМИП постепенно увеличивалась. Через девять лет непрерывной работы вариация лучших

генераторов составляла  $(6 \div 8) \cdot 10^{-10}$  в сутки (среднее квадратичное значение).

Поскольку в каждом институте методы обработки результатов разные, следовало бы поставить вопрос о переходе на единую методику, взяв за основу методику ХГИМИП.

Начиная с 1950 г., в ХГИМИП велись работы по созданию молекулярных реперов частоты. Так, в 1952 г. были построены атомные часы, работающие по принципу индикации поглощения волны определенной длины в волноводе, наполненном газообразным аммиаком, затем были созданы аммиачные молекулярные генераторы.

Во ВНИИФТРИ работы по созданию эталонных частотных установок в полной мере развернулись в конце 50-х и начале 60-х годов.

К 1959—1960 гг. были разработаны новые более совершенные кварцевые резонаторы. После соответствующей особо тщательной обработки поверхности кварцевых брусков по методу, предложенному А. Г. Смагиным, изготовленные кварцевые резонаторы с частотой 100 кГц имели малое старение и добротность 10—15 млн. Были отработаны новые более стабильные генераторные схемы и улучшены методы термостатирования.

В 1961 г. изготовлена группа генераторов. Из них в настоящее время работают и находятся в эксплуатации три генератора: М11, М12, М13. Их стабильность находится на уровне лучших современных кварцевых генераторов. В сутки вариация их частоты не превышает  $(3 \div 5) \cdot 10^{-11}$ , а старение  $(2 \div 3) \cdot 10^{-11}$ .

Были разработаны весьма надежные, практически не выключаемые делители частоты на транзисторах и ферритовых кольцах с прямоугольной петлей с разбросом секундного сигнала на выходе, меньшим 1 мксек.

Изучение причин нестабильности группы этих генераторов привело к созданию группы кварцевых генераторов, в которой были учтены недостатки ранее изготовленных образцов. Были разработаны резонаторы с еще более высокой добротностью (свыше 15 млн.) и параметрической нестабильностью по крайней мере раз в десять ниже, чем у генераторов ранее изготавливаемых во ВНИИФТРИ типов.

Изготовлен новый более совершенный термостат, исключаящий перепады температуры внутри него, большие, чем в десятитысячные доли градуса, а также созданы весьма совершенные способы регулирования температуры внутри термостата с помощью фотоусилителей и методы объективного измерения температуры внутри термостата с помощью платиновых термометров сопротивления и еще более совершенная схема кварцевого генератора, отличающаяся особо малой чувствительностью к изменению ее параметров и режимов.

По стабильности новая группа генераторов, введенных летом 1963 г., уже теперь превзошла изготовленные ранее. Суточная вариация их частоты (среднее квадратичное значение) не превышает  $(2 \div 3) \cdot 10^{-11}$ .

К сожалению, во ВНИИФТРИ точность, с которой сличаются кварцевые генераторы, явно ниже необходимой: погрешность по порядку та же, что и у их вариации.

Одновременно с кварцевыми часами во ВНИИФТРИ разрабатывались атомные и молекулярные реперы частоты. В 1959 г. изготовлена группа молекулярных генераторов на обычном аммиаке с использованием линии перехода 3—3. Два из них с нестабильностью частоты, не превышающей  $1 \cdot 10^{-9}$ , были введены в службу времени и частоты.

В 1962 г. изготовлены еще два генератора на обычном аммиаке с использованием линии перехода 3—2, имеющие нестабильность, меньшую  $5 \cdot 10^{-11}$ .

В 1963 г. разработан молекулярный генератор, работающий на аммиаке (атомы азота в аммиаке имеют атомную массу 15); в нем используется переход 3—3. В настоящее время этот генератор вводится в службу времени и частоты. По предварительным данным эксплуатации, нестабильность его частоты составляет примерно  $1 \cdot 10^{-11}$  (точнее — не превышает  $1,3 \cdot 10^{-11}$ ).

Сейчас исследуется также цезиевый репер частоты, имеющий базу (расстояние между резонаторами) в 500 м и нестабильность частоты, меньшую  $1 \cdot 10^{-10}$ . Кроме того, разработан новый цезиевый репер частоты с базой в 2800 м и нестабильностью, не превышающей  $5 \cdot 10^{-11}$ .

В 1964 г. в стадии наладки находилась группа из двух водородных генераторов с предполагаемой нестабильностью в несколько единиц на  $10^{-12}$ .

Молекулярные и атомные реперы с группой кварцевых генераторов составляют групповой хранитель времени и частоты ВНИИФТРИ, погрешности которого находятся на уровне достижений современной техники и метрологии.

К работам по хранению времени тесно примыкают работы по астрономическим наблюдениям, имеющие целью воспроизведение шкалы времени (TU<sub>2</sub> и эфемеридного).

Эти наблюдения ведутся во ВНИИФТРИ, НГИМИП и Иркутском филиале ВНИИФТРИ\*, причем определение эфемеридного времени ведется только во ВНИИФТРИ.

Центральная служба времени ВНИИФТРИ связана со всеми службами СССР и социалистических стран и регулярно получает от них информацию, необходимую для определения времени.

Кроме работ по созданию и поддержанию эталонов времени и частоты, институты Госкомитета стандартов, мер и измерительных приборов занимаются созданием и внедрением различного рода образцовой аппаратуры измерения времени и частоты.

На протяжении последних лет разрабатывались и совершенствовались астрономические часы конструкции Федченко. Эти одномоментные астрономические часы, очень простые и надежные, имеют суточную вариацию суточного хода порядка  $0,0002$  мсек, что в относительном выражении составляет около  $2 \cdot 10^{-9}$ . Они мало чувствительны к сейсмическим толчкам, могут работать в течение нескольких лет и не требуют замены источника питания и профилактического ремонта.

В практику институтов Госкомитета внедряются подземные кварцевые генераторы с естественным термостатированием, разработанные во ВНИИФТРИ. Радиостанции оснащаются образцовыми мерами частоты (Москва, Иркутск).

В настоящее время развиваются и оснащаются аппаратурой относительно молодые лаборатории ВНИИФТРИ (Иркутский филиал) и НГИМИП, создаются новые совершенные эталоны времени и частоты в ХГИМИП.

\* Звездные наблюдения ведутся во ВНИИМ непрерывно с 1900 г. до настоящего времени. (Прим. ред.).

ИЗМЕРЕНИЕ КОРОТКИХ ПРОМЕЖУТКОВ  
ВРЕМЕНИ

На протяжении более 70 лет в Главной палате мер и весов, а затем во ВНИИМ, лаборатория времени проводила значительную работу по обеспечению единства измерений в стране. Д. И. Менделеев уделял большое внимание этой лаборатории, основными направлениями работ которой являлись:

- 1) хранение точного времени (служба времени),
- 2) измерение его промежутков,
- 3) обеспечение государственной поверки приборов, измеряющих промежутки времени.

Необходимость в измерении промежутков времени возникла в глубокой древности. Первыми приборами, служившими для этой цели были солнечные, песочные, огненные и водяные часы.

В XIII в. появились первые механические колесные часы. Это были громоздкие сооружения в виде башенных, дворцовых и соборных часов только с одной часовой стрелкой. Погрешность их составляла около 20 мин в сутки.

В дальнейшем для обеспечения равномерности хода механических часов был применен маятник, позднее — баланс, а затем канат с грузом заменен спиральной пружиной.

В 1550 г. появились часы с двумя стрелками, часовой и минутной, а с 1760 г. — секундная стрелка.

В конце XIX в. возникла необходимость измерения промежутков времени короче одной секунды или, как их принято называть сейчас, коротких промежутков времени (к. п. в.).

Первыми разработали и применили приборы для измерения к. п. в. артиллеристы, определявшие скорость полета снарядов и пуль в различных участках траектории.

Дальнейшее развитие науки и техники в XX в. потребовало повышения точности этих измерений и разработки специальной аппаратуры для измерения промежутков времени длительностью в тысячные, миллионные и миллиардные доли секунды. Поэтому в течение последних 40 лет в СССР и во всех передовых странах мира разрабатывали такую аппаратуру, используя достижения электронной техники.

В настоящее время хронометрические приборы, измеряющие и воспроизводящие к. п. в., широко используются для измерения различных

скоротечных процессов: срабатывания контактов реле, изменения давления и механических нагрузок в деталях быстроходных двигателей, полета артиллерийских снарядов и ракет, протекания химических и ядерных реакций и т. п. При этом методы и аппаратура для измерения к. п. в. настолько отличаются от методов и аппаратуры для измерений обычных, длинных, промежутков времени, что выделились в особую специфическую область измерений времени.

К к. п. в. относятся промежутки длительностью  $10^{-12} \div 1$  сек. Однако существующие измерительные хронометрические приборы работают в диапазоне  $10^{-9} \div 10^4$  сек. Таким образом, промежуток времени  $10^{-12} \div 10^{-9}$  сек еще не охвачен измерениями. Одновременно хронометрическая аппаратура, предназначенная для измерения к. п. в., имеет верхний предел, лежащий в диапазоне длинных промежутков времени.

Измеряемые промежутки времени обычно ограничиваются электрическими импульсами, однако возможно использовать для этой цели также световые или звуковые импульсы, замыкание и размыкание контактов реле.

К. п. в. измеряются двумя методами:

- 1) методом сравнения их с известным интервалом, воспроизводимым некоторым временным процессом;
- 2) методом преобразования к. п. в. в другую физическую величину, пропорциональную его длительности.

При первом методе формируются метки времени, по которым оценивается длительность измеряемого к. п. в. Оценка выполняется путем сравнения: а) с известным интервалом времени, воспроизводимым периодическим колебательным процессом, б) с воспроизводимым непериодическим временным процессом.

В каждом случае применяются механические и электрические способы сравнения к. п. в.

Приборы, основанные на электрических способах сравнения с периодическим колебательным процессом, делятся на приборы, использующие дискретный счет импульсов, так называемые электронно-счетные хронометры и датчики к. п. в., и осциллографические измерители времени.

Электрические способы сравнения к. п. в. с непериодическим процессом характеризуются тем, что шкала времени в момент измерения воспроизводится путем распространения электрической энергии вдоль электрической линии. На этом способе основаны датчики к. п. в. с линиями задержки и измерители к. п. в. со схемами совпадений задержанных импульсов.

При втором методе измерения подразумевается преобразование к. п. в. в пропорциональную ему величину: 1) электрического заряда, 2) фазового сдвига между двумя синусоидальными напряжениями.

На первом способе основаны все конденсаторные измерители и датчики, в которых к. п. в. преобразуется перед измерением в пропорциональную величину приращения электрического заряда; на втором — основан фазовый прибор для измерения к. п. в.

Блок-схема фазового прибора состоит из двух цепей делителей частоты, работающих от одного и того же генератора. Одна из цепей запускается сигналом начала, другая — сигналом конца измеряемого промежутка времени. Разность фаз на выходах этих цепей делителей частоты пропорциональна величине измеряемого промежутка времени и измеряется фазометром. Прибор калибруется в единицах времени.

К настоящему времени парк отечественной хронометрической аппаратуры для измерения и воспроизведения к. п. в., насчитывая около 30 типов приборов, превышает 10 000 единиц. В зависимости от рабочего диапазона их можно разделить на группы: миллисекундомеры ( $0,1 \text{ мсек} \div 1 \text{ сек}$ ), микросекундомеры ( $1 \text{ мсек} \div 1 \text{ сек}$ ) и наносекундомеры ( $1 \text{ нсек} \div 1 \text{ мсек}$ ), а по типу индикации — на приборы со стрелочной, с многострочной и однострочной индикацией и, кроме того, осциллографические.

Основными задачами, которые предстоит решить для дальнейшего усовершенствования хронометрической аппаратуры, являются:

- 1) расширение нижнего предела диапазона измерений;
- 2) переход на новые усилительные элементы (транзисторы и туннельные диоды);
- 3) усовершенствование системы индикации;
- 4) усовершенствование схем отдельных узлов и блоков и нахождение новых схемных решений.

Вопросу измерения коротких промежутков времени ВНИИМ начинает уделять внимание с 1946 г. В 1956 г. уже создается специальная группа по измерению к. п. в. и ведется разработка образцовой аппаратуры для поверки хронометрических приборов, измеряющих и воспроизводящих к. п. в., проводятся поверки и государственные испытания этих приборов, разрабатываются соответствующие нормативные документы.

Во ВНИИМ созданы датчики к. п. в. типов ДМПВ-1 и ДКИВ-1, а также установки типов УМПВ-1 и УМПВ-2 для воспроизведения и измерения к. п. в.

Датчик типа ДМПВ-1, предназначенный для поверки миллисекундомеров, изготовлен в 1956 г. В основу его работы положен способ счета равных промежутков времени с помощью устройства, считающего заданное число периодов колебаний напряжения образцового генератора. В качестве такого устройства применена пятидекадная счетная схема со счетной частотой 10 кГц на тиратронах с холодным катодом типа МТХ-90 (рис. 1).

В состав датчика входит контрольный хронометр, позволяющий исключить возможность ошибок при проведении поверок. Счетное устройство хронометра работает также на тиратронах с холодным катодом.

Датчик типа ДМПВ-1 может работать как от собственного пьезокварцевого генератора, так и от внешнего более точного образцового или эталонного генератора с частотой 10 кГц.

Он имеет два выходных устройства. С каждого выхода могут быть сняты отдельно положительный или отрицательный импульс, которые определяют начало и конец воспроизводимого промежутка времени. Оба выходных устройства имеют также поляризованные реле, воспроизводящие к. п. в. путем замыкания и размыкания контактных пар при любом их сочетании. Питается датчик от сети переменного тока. Диапазон воспроизводимых промежутков времени  $0,1 \text{ мсек} \div 10 \text{ сек}$ .

Относительная погрешность частоты собственного пьезокварцевого генератора не превышает  $\pm 3 \cdot 10^{-5}$ . Погрешность за счет разброса времени срабатывания контактных пар  $\pm 0,1 \text{ мсек}$ .

Датчик типа ДМПВ-1 применяется в институтах Госкомитета стандартов.

Установка для измерения и воспроизведения м. п. в. типа УМПВ-1 изготовлена ВНИИМ в 1958 г. В ее состав входят: датчик, два электронных хронометра типа ХЭ-1 и стабилизаторы напряжения питания, установленные в стенде в виде стойки.

Действие датчика основано на принципе линейного заряда конденсатора до потенциала срабатывания электронного реле. Датчик позволяет воспроизводить с погрешностью порядка  $\pm 5\%$  промежутки времени длительностью  $1 \text{ мксек} \div 1 \text{ сек}$ , которые ограничиваются электрическими импульсами любой полярности с амплитудой  $25 \text{ в}$  при длительности их  $5 \text{ мксек}$ .

Электронные хронометры типа ХЭ-1 работают по принципу счета электрических импульсов стабильной частоты  $1 \text{ Мгц}$  за время измеряемого промежутка. Счет импульсов производится при помощи четырех счетных декад на радиолампах типа 6Н15П, 6Н8 и 6Н9 и электромеханического счетчика типа СБ-1м.

Электронные хронометры могут работать как от собственного пьезокварцевого генератора типа ГК-5, так и от внешнего генератора с частотой  $1 \text{ Мгц}$  и измеряют к. п. в. в диапазоне  $1 \text{ мксек} \div 100 \text{ сек}$ . Относительная погрешность частоты генератора типа ГК-5 не превышает  $\pm 3 \cdot 10^{-6}$ .

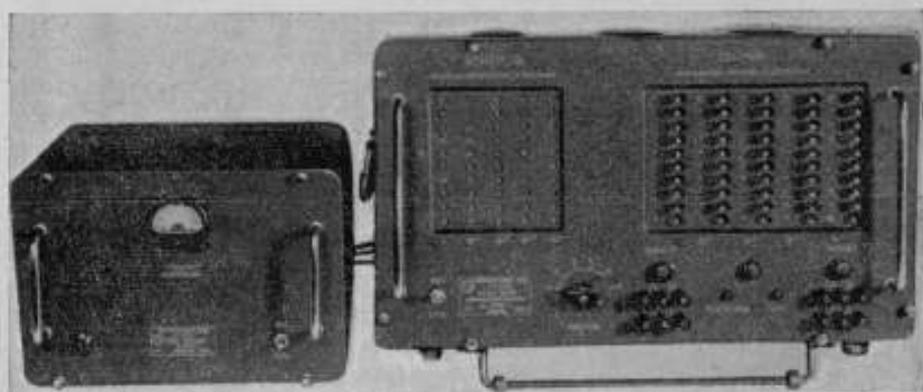


Рис. 1. Датчик коротких промежутков времени типа ДМПВ-1.

Погрешность хронометров, при питании их напряжением стабильной частоты  $1 \text{ Мгц}$  от эталонного генератора,  $\pm 1 \text{ мксек}$ . Наличие в установке двух хронометров исключает возможность ошибок при проверках.

При проверке измерителей м. п. в. датчик установки воспроизводит электрические импульсы, ограничивающие заданный м. п. в., измеряемый одновременно поверяемым прибором и хронометрами установки. Показание поверяемого прибора сравнивается с показаниями хронометров установки, принимаемыми за действительное значение м. п. в.

При проверке датчиков м. п. в. датчик установки типа УМПВ-1 не включается, а промежутки времени, воспроизводимые поверяемым прибором, измеряются электронными хронометрами. Отсчет на поверяемом датчике сравнивается с показаниями хронометров, принимаемыми за действительное значение м. п. в.

В 1960 г. в установку типа УМПВ-1 был внесен ряд изменений и создана установка типа УМПВ-2 (рис. 2) для измерения и воспроизведения м. п. в. Не отличаясь по принципу действия от типа УМПВ-1, она имеет ряд преимуществ:

а) используемые в установке УМПВ-2 электронные хронометры типа ХЭ-2 имеют более надежную и удобную для изготовления и монтажа электрическую схему и конструкцию, более удобный отсчет, в два

раза меньшие габариты, вес и потребление мощности питания, увеличенный верхний предел измерения до 10 000 сек и др.;

б) упрощена схема датчика за счет исключения схемы совпадения;

в) используется только один стабилизатор напряжения переменного тока типа СНЭ-220-0,75.

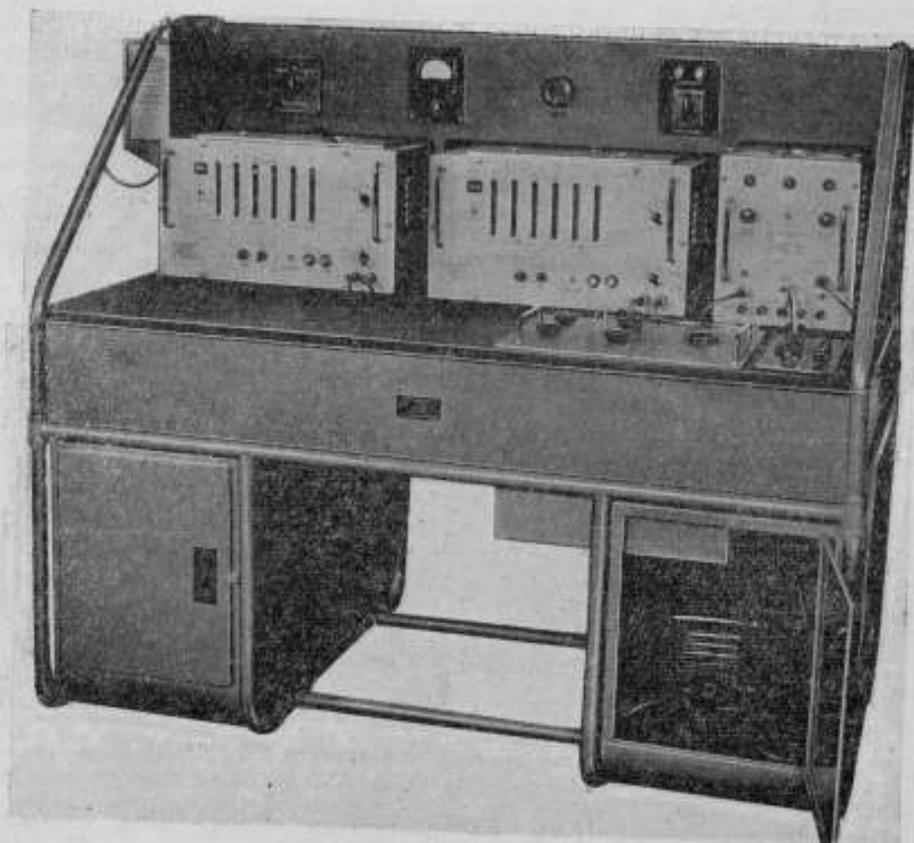


Рис. 2. Установка типа УМПВ-2 для измерения и воспроизведения коротких промежутков времени.

#### Основные технические характеристики установки типа УМПВ-2

1. Длительность воспроизводимых промежутков времени от 1 мксек до 1 сек (скачками через 1 мксек). При помощи добавочных емкостей, подключаемых к магазину емкостей, длительность воспроизводимых промежутков времени может быть увеличена до нескольких секунд. Дополнительная емкость в 10 мкф увеличивает промежуток времени на 1 сек.

2. Воспроизводимые промежутки времени ограничиваются электрическими импульсами с амплитудой не менее 35 в, длительностью 5 мксек, крутизной переднего фронта не менее 50 в/мксек. Эти импульсы могут иметь любую полярность.

3. Длительность измеряемых промежутков времени от 1 мксек до 10 000 сек. Точность отсчета 1 мксек.

4. Электрические импульсы, ограничивающие измеряемый хронометрами промежуток времени, могут быть любой полярности и должны

иметь амплитуду не менее 10 в, длительность от 4 до 10 мксек, крутизну переднего фронта не менее 50 в/мксек.

5. Погрешность установки при питании хронометров напряжением высокой частоты (1 Мгц):

от эталонного генератора ВНИИМ не превышает  $\pm(0,0000005\tau + 1 \text{ мксек})$ ;

от генератора типа ГК-5, входящего в установку, не превышает  $\pm(0,0001\tau + 1 \text{ мксек})$ .

Здесь  $\tau$  — длительность измеряемого хронометрами промежутка времени.

6. Установка питается от сети переменного тока 50 гц, 220/127 в.

7. Потребляемая мощность не более 700 ватт.

8. Габариты установки  $1500 \times 850 \times 1325 \text{ мм}$ .

9. Вес около 150 кг.

Датчик типа ДКИВ-1, предназначенный для воспроизведения к.п.в. в диапазоне 0,01—10 мксек, изготовлен в 1961 г. (рис. 3) и работает на принципе использования электрических линий задержки импульсов.

Датчик состоит из устройства формирования импульсов, которое может воспроизводить как одиночный импульс, так и периодическую последовательность их, первого канала обострения импульсов, электрической линии задержки и второго канала обострения импульсов. Схемы обоих каналов совершенно одинаковы.

Импульс на выходе второго канала обострения сдвинут относительно импульса на выходе первого канала на время задержки в электрической линии. При помощи переключателей задержка изменяется скачками от  $10^{-8}$  до  $10^{-5}$  сек. Линия задержки рассчитана на полосу до 10 Мгц, чем обеспечивается неискаженная передача импульса.

Датчик, помимо выдачи двух одиночных импульсов, может включаться на периодическую работу с частотой повторения до 100 кгц.

Периодический запуск датчика позволяет калибровать его посредством измерителя типа ПИВИ-2.



Рис. 3. Датчик к. п. в. типа ДКИВ-1.

#### Основные технические характеристики датчика типа ДКИВ-1

1. Диапазон воспроизведения коротких промежутков времени 0,01—10 мксек делится на три поддиапазона (в мксек):

а) 0,01—0,1 скачками через 0,01;

б) 0,1—1,0 " " 0,1;

в) 1—10 " " 1.

2. Длительность выходных импульсов, ограничивающих короткий промежуток времени, 0,2 мксек.

3. Крутизна переднего фронта импульсов 35 в/нсек.

4. Амплитуда выходных импульсов 120 в при сопротивлении 1 ком.

Уровень выходных импульсов может плавно регулироваться от 0 до 120 в.

5. Погрешность при воспроизведении промежутков времени не превышает  $\pm 0,01$  мксек.

6. Питание прибора от сети переменного тока 220 в, 50 гц.

Потребляемая мощность 330 ватт.

7. Вес прибора 26 кг.

8. Габариты  $315 \times 374 \times 695$  мм.

В настоящее время во ВНИИМ разрабатывается образцовая аппаратура для наносекундного диапазона к. п. в., что позволит в конце 1965 г. обеспечить измерение их в диапазоне  $10^{-9}$ - $10^{-6}$  сек. Однако это далеко еще не исчерпывает современных запросов промышленности.

Перед ВНИИМ стоят большие задачи дальнейшего расширения нижнего предела измерений к. п. в. до  $10^{-11}$  сек и повышения точности измерений по крайней мере на два порядка в микросекундном диапазоне к. п. в. Необходимость этих работ вытекает из анализа современного уровня точностей измерения к. п. в., достигнутого в СССР и за границей.

### ТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ И НАПРЯЖЕНИЯ НА ВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ

Д. И. Менделеев был горячим сторонником и активным проводником единых измерений не только в областях, имеющих уже многовековую историю, но и в областях измерений сравнительно молодых, но быстро развивающихся. Уже в 1900 г. им открыто в Главной палате мер и весов электрическое отделение, преобразованное затем в лабораторию. После смерти Д. И. Менделеева его ученик и ближайший помощник Н. Г. Егоров, назначенный управляющим, продолжал энергично расширять деятельность Главной палаты. По его инициативе в 1910 г. организовано «радиотелеграфное отделение», из которого впоследствии развилась лаборатория токов высокой частоты.

В послеоктябрьский период и до Великой Отечественной войны основные усилия этой лаборатории были направлены на развитие точного измерения частоты (работы Л. Д. Исакова, В. С. Габеля, Г. А. Кьяндского, П. Н. Агалецкого, Б. К. Шембея). За разработку государственного эталона частоты СССР группа сотрудников ВНИИМ во главе с Б. К. Шембелем была удостоена Государственной премии.

Проводились работы и по измерению других электрических величин при высоких частотах, однако в значительно меньшем объеме. В частности, в области измерения величин, характеризующих интенсивность электрических колебаний (мощности, напряжения, силы тока), в 1937 г. Г. А. Кьяндским разрабатывалась методика градуировки ламповых вольтметров.

В 1939—1940 гг. начата разработка методов и аппаратуры для проверки генераторов стандартных сигналов по выходному напряжению. Эту работу не удалось закончить до войны.

Точные измерения напряжения и мощности при высоких частотах получили существенное развитие только в послевоенный период, когда широкое развитие радиоизмерительной техники требовало единства измерений этих величин в стране. В 1948 г. во ВНИИМ была организована новая радиотехническая лаборатория, основным направлением которой стало измерение напряжения, мощности и их отношений при высоких частотах.

### Измерение напряжений средней величины и поверка электронных вольтметров

Основной, наиболее многочисленной группой приборов напряжения при высоких частотах являются электронные вольтметры. Массовая поверка их производится по образцовым приборам на звуковых частотах. Однако для испытаний вольтметров при высоких частотах и для поверки вольтметров, встроенных в генераторы стандартных сигналов, необходимы высокочастотные образцовые приборы.

Для создания образцового вольтметра во ВНИИМ был выбран компенсационный метод измерения напряжения с вакуумным диодом в качестве входного преобразователя (детектора). Вольт-амперная характеристика диодов в области малых токов подчиняется универсальному для них экспоненциальному закону, что позволяет осуществить точное измерение амплитудного значения напряжения синусоидальной (и любой другой известной) формы путем сравнения его с напряжением постоянного тока, контролируемого по нормальному элементу. В работе [1] описан разработанный в 1948 г. компенсационный вольтметр. Анализ систематических погрешностей компенсационного метода, подтвержденный экспериментом, показал возможность уменьшения погрешности до величин порядка 0,5% при напряжении 0,3 в, 0,15% при 1 в и 0,1% при напряжениях более 2 в. Результаты измерений принципиально не зависят от медленных изменений эмиссии катода, например, вследствие старения, так как показатель экспоненты, описывающей вольт-амперную характеристику, контролируется и регулируется изменением напряжения накала.

В период с 1955 г. по 1960 г. разработаны основанные на компенсационном методе образцовые вольтметры типов ОКВ-1, ОКВ-2, ОКВ-3А, ОКВ-4, ВЛО-2 (ВЗ-9) [2, 3]. Вольтметр типа ОКВ-2 внедрен в поверочную практику государственных контрольных лабораторий Госкомитета стандартов, а вольтметр типа ВЛО-2 (ВЗ-9) — в серийное производство.

Для аттестации образцовых диодных вольтметров при напряжениях до 1 в и частотах до 1000 Мгц был разработан метод, основанный на косвенном измерении напряжения по известной мощности, поглощенной термистором, активное и реактивное сопротивления которого известны [4].

Определение параметров эквивалентной схемы термистора основывается на новом методе вариации его активного сопротивления. Значение частотной поправки для термисторного вольтметра при частоте 1000 Мгц не превосходит 3%, а предельная погрешность не превосходит  $\pm 1\%$ . В качестве независимого метода разработан и исследован болометрический измеритель напряжения, сличение которого с термисторным дало совпадение результатов в пределах 1%.

Для точного измерения мощности, поглощенной термистором, разработан образцовый болометрический мост (рис. 1), погрешность которого не превосходит  $\pm (0,1 + 23 \cdot 10^{-6}/P)\%$ , где  $P$  — измеряемая мощность в ваттах. Этот мост имеет самостоятельное значение и в сочетании с образцовыми термисторными и болометрическими головками служит для точного измерения мощности при сверхвысоких частотах, а также и для поверки измерителей мощности [5].

Для аттестации образцовых вольтметров при напряжениях свыше 1 в необходимо дополнительно определить изменение пролетной погрешности, которая, как известно, зависит не только от частоты, но и от напряжения. Для этой цели разработана методика, основанная на изме-

рени отношения напряжений супергетеродинным методом [6]. Опубликованные результаты экспериментального исследования частотных погрешностей вольтметров при различных межэлектродных расстояниях

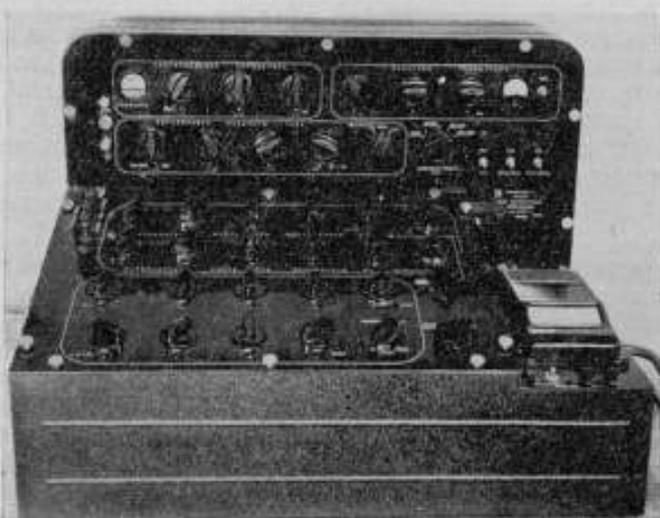


Рис. 1. Образцовый болометрический и термисторный мост типа МТО-1.

[7] показывают, что при напряжениях менее 1 в пролетная погрешность стремится к постоянному значению, тем большому, чем больше расстояние анод — катод диода, а при напряжениях больше 1 в эта погреш-

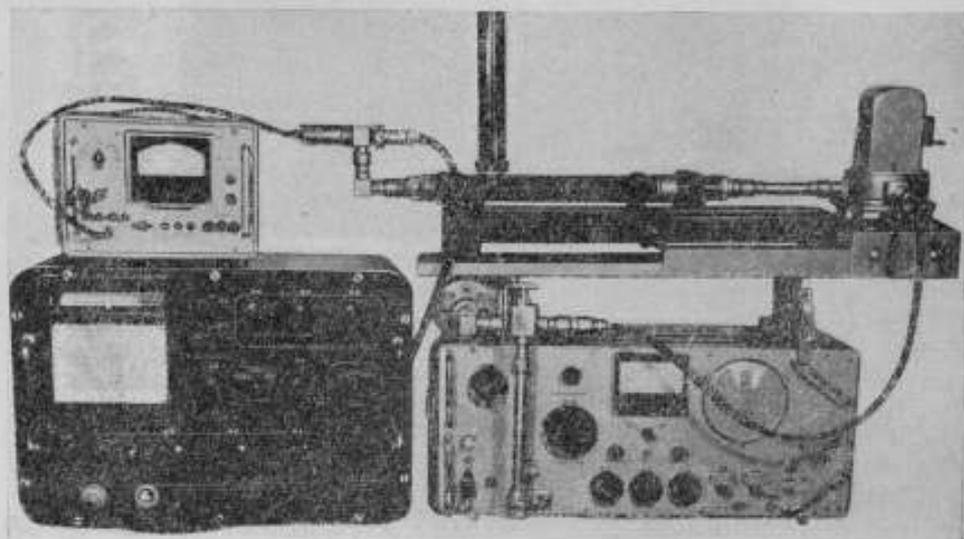


Рис. 2. Установка для проверки электронных вольтметров при высоких частотах типа УПВ-1000-1.

ность уменьшается приблизительно пропорционально логарифму напряжения. Показано, что общеизвестная формула Мегроу, выведенная без учета начальной скорости электронов, несправедлива при малых напряжениях.

Для поверки и испытания вольтметров при высоких частотах разработана установка типа УПВ-1000-1 (рис. 2). Поверка производится методом сличения с образцовым вольтметром типа ОКВ-2, аттестованным при частотах  $150 \div 1000$  МГц [8].

В качестве независимого метода поверки вольтметров разработан метод косвенного измерения напряжения по известной мощности и волновому сопротивлению линии. В 1952 г. этот метод исследовался с применением коаксиальной щелевой измерительной линии, которая оказалась по конструктивным соображениям неудобной. В 1960 г. разработан новый способ с применением плоской измерительной линии. Исследование показало, что частотные погрешности вольтметров можно определить в диапазоне частот до 3000 МГц с погрешностью 3—9%\*.

#### Точное измерение малых напряжений при высоких частотах и поверка генераторов стандартных сигналов по выходному напряжению

Точное измерение малых напряжений необходимо прежде всего для поверок по выходному напряжению генераторов стандартного сигнала, милливольтметров и микровольтметров. В самой тесной связи с этим стоит задача точного измерения отношения напряжений или мощностей и поверка делителей напряжения и аттенуаторов.

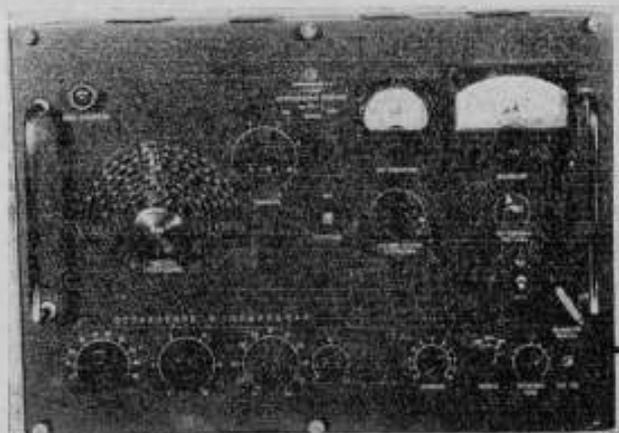


Рис. 3. Образцовый измерительный приемник типа ИП-2.

Для поверок генераторов стандартного сигнала (ГСС) был выбран способ отдельного измерения опорного значения выходного напряжения (порядка 0,1 в) и поверки аттенуатора. Опорное напряжение измеряется образцовым вольтметром или измерителем малой мощности, а для поверки аттенуатора в результате исследований 1951—1955 гг. разработан супергетеродинный измеритель отношения напряжений с образцовым аттенуатором в тракте промежуточной частоты. В дальнейшем разработан усовершенствованный измерительный приемник типа ИП-2 (диапазон частот  $16 \div 1000$  МГц, погрешность — порядка  $0,1 \div 0,2$  дБ), которым оснащены государственные контрольные лаборатории (ГКЛ) Госкомитета стандартов (рис. 3). Проведенное исследование образцового проволочного ослабителя измерительного приемника

\* Рабинович Б. Е., Федоров А. М., Авторское свидетельство № 150890 с приоритетом от 13 апреля 1961 г., «Бюллетень изобретений», № 20, 1952.

показало, что по точности он не уступает лучшим образцам аттенюаторов предельного типа [9]. Упрощенный вариант этого ослабителя типа АСО-3 выпускается в виде отдельного прибора и применяется для проверки измерителей ослабления.

Наряду с двухступенчатой методикой поверки ГСС разрабатывались также способы и аппаратура для воспроизведения малых напряжений ( $0,2 \div 100 \text{ мкВ}$ ) в диапазоне частот  $1 \div 1000 \text{ МГц}$ , основанные на использовании падения напряжения на малом безреактивном сопротивлении при протекании по нему известного тока. Исследование термисторов в качестве измерителей тока [10] показало, что частотные погрешности у некоторых типов их не превосходят  $1-2\%$  при частоте  $1000 \text{ МГц}$ .

При низких радиочастотах применялся метод деления напряжения. На базе аттенюатора типа АСО-3 (рис. 4) в сочетании с вольтметром типа ОКВ-3А осуществлена установка для поверки ГСС низких радиочастот ( $12 \div 100 \text{ кГц}$ ) при выходных напряжениях  $0,01 \text{ мкВ} \div 1 \text{ В}$ .

В качестве независимого метода разработан способ воспроизведения малых напряжений с помощью генератора гармоник [11], основанный на наличии закономерной связи между током гармоники и постоянной составляющей тока диода, питаемого переменным напряжением высокой частоты. Совпадение результатов измерений обоими методами находится в пределах  $\pm 1\%$ .

Аналізу погрешностей рассогласования при измерении напряжений посвящена работа [12], в которой предложен метод исключения этих погрешностей.

Погрешности рассогласования при поверке ослабителей в виде отдельных приборов достигают больших значений, на много превышающих погрешности современных измерителей отношения напряжений и мощностей. Разработан метод уменьшения этих погрешностей с помощью направленных ответвителей [13].

При поверке электронных вольтметров существенное значение имеют погрешности, вносимые искажением синусоидальной формы кривой напряжения. Исследование влияния формы кривой на показания диодных вольтметров [14] дало возможность выяснить, с какой погрешностью проградуированный на синусоиде вольтметр измеряет амплитуду напряжения трапецеидальной формы, которая может меняться в пределах от прямоугольной до треугольной. Оценка погрешности при поверке диодных вольтметров по образцовому диодному вольтметру за счет искажения формы кривой показала, что эта погрешность имеет максимум при напряжении порядка  $0,7 \text{ В}$ , но ее значение намного меньше коэффициента искажений. Образцовый диодный вольтметр предъявляет значительно менее жесткие требования к чистоте формы кривой вспомогательного генератора при поверке «пиковых» электронных вольтметров, чем образцовый термоэлектрический.

Проанализированы и рассчитаны погрешности поверки ГСС за счет искажения формы кривой [15], а также показана целесообразность поверок ГСС при малых значениях опорного напряжения ( $0,1 \text{ В}$ ). Влияние гармоник на показания диодных вольтметров при высоких частотах



Рис. 4. Образцовый аттенюатор типа АСО-3.

тах исследовано в работе [16]. Показано, что это влияние значительно увеличивается, когда резонансная частота входной цепи вольтметра кратна рабочей частоте.

#### Точное измерение импульсных напряжений

С развитием импульсной техники появились различные типы импульсных вольтметров и милливольтметров. Для их поверки институтами Госкомитета стандартов, мер и измерительных приборов разрабатывались методы и аппаратура.

В 1948 г. во ВНИИМ проведено исследование компенсационного метода измерения импульсных напряжений с электронно-лучевой трубкой в качестве индикатора [17], которое показало, что при измерении прямоугольных импульсов длительностью более 1 мксек и амплитуде  $1 \div 150$  в систематические погрешности не превышают 0,07 в, а средняя квадратичная погрешность ряда равна 0,01 в.

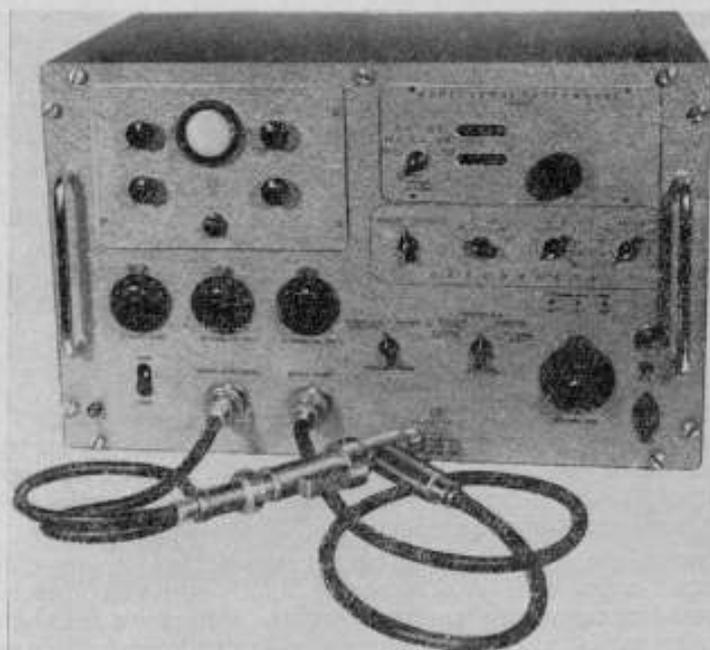


Рис. 5. Образцовый компенсационный импульсный вольтметр типа ОКВ-5.

Для измерения амплитуды видеоимпульсных и радиоимпульсных (импульсно-модулированных) напряжений во ВНИИМ в 1959—1961 гг. разработан новый компенсационный метод, в котором исключены систематические погрешности, зависящие от скважности, присущие другим методам\*. Разработанный на этом методе образцовый вольтметр типа ОКВ-5 (рис. 5) предназначен для измерения импульсных напряжений  $1,2 \div 150$  в при частотах  $20$  гц  $\div$   $1000$  Мгц (с введением частотных попра-

\* Рабинович Б. Е., Способ измерения амплитуды видеоимпульсов. Авторское свидетельство № 156192, заявлено 21 ноября 1961 г., «Бюллетень изобретений и товарных знаков», № 15, 1963.

вок) и в зависимости от частоты и скважности измеряемых импульсов имеет погрешность не более  $\pm(0,2 \div 3)\%$ .

С помощью аттенюатора типа АСО-3 вольтметр типа ОКВ-5 обеспечивает поверку импульсных милливольтметров.

### Точное измерение мощности при высоких частотах

Мощность является важнейшей характеристикой интенсивности колебаний при высоких частотах и точному измерению ее уделяется большое внимание в метрологических учреждениях всех стран.

Во ВНИИМ работы по измерению мощности при высоких частотах начаты в 1948 г. Первоначально была поставлена задача создать две установки в сравнительно узких полосах частот 3- и 10-см диапазонов. В качестве образцового измерителя мощности использовалась калориметрическая камера серийного измерителя мощности типа ИМ-4, снабженная термостабилизированным водопитающим устройством с повышенной стабильностью расхода и измерительным устройством высокой чувствительности. Средняя квадратичная погрешность ряда измерений не превышает 1,5%.

Разработано два варианта сличительных устройств: с двойным тройником и с направленным ответвителем. Сличительное устройство второго типа является основным и позволяет производить сличение приборов как равных, так и отличающихся по мощности (например, калориметрического и термисторного измерителей мощности), подключаемых к основному и боковому плечам ответвителя. Переходное затухание в последнем случае определялось методом квадратичного детектора.

Проведены испытания различных серийных калориметрических и термисторных измерителей мощности в 3- и 10-см диапазонах.

В 1956 г. проведены работы по повышению точности измерения мощности. Уточнена систематическая погрешность путем экспериментального определения потерь, вносимых переходами. Для повышения точности определения коэффициента преобразования термисторных головок разработан упоминавшийся выше термисторный мост [6]. Повышена также точность схемы сличения. Результаты исследования показали, что термисторные головки могут поверяться по калориметру с погрешностью не более  $\pm 3\%$ .

Для измерения отношения мощностей и поверки аттенюаторов до 30 дБ в 3-см диапазоне волн разработана установка (рис. 6), использующая метод квадратичного детектора [18]. Сличение результатов, полученных методами квадратичного детектора и короткозамыкающего поршня, показало их сходимость в пределах погрешности измерений ( $\pm 0,1$  дБ).

В 1957 г. осуществлено сличение калориметрических измерителей мощности ВНИИМ и ХГИМИП с помощью промежуточных термисторных головок, которое дало удовлетворительное совпадение результатов в пределах приписываемой этим приборам погрешности.

В 1957—1959 гг. разработана образцовая установка для измерения малой мощности в диапазоне частот 150—1000 МГц, которая обеспечивает поверку и испытание измерителей мощности этого диапазона. Комплекс разработанной аппаратуры состоит из измерителей мощности двух типов — калориметрического и болометрического — и устройства для сличения, обеспечивающего передачу правильных значений мощности от образцового прибора к поверяемому [19].

Калориметрический измеритель мощности (рис. 7) основан на поглощении ее в трубчатом коаксиальном сопротивлении, омываемом водой. Приращение температуры воды измеряется дифференциальной термо-

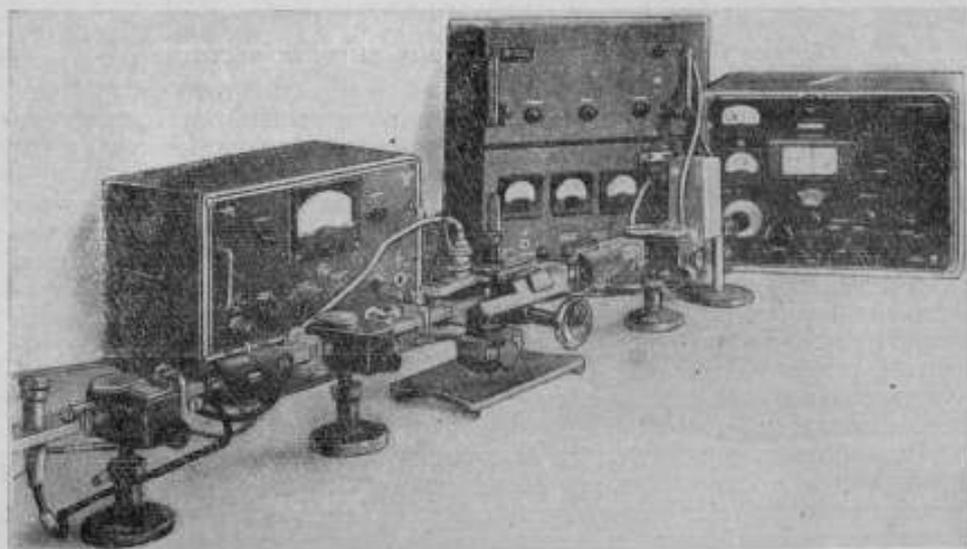


Рис. 6. Установка для поверки аттенуаторов в 3-см диапазоне волн.

батарей. Мощность с. в. ч. замещается известной мощностью постоянного тока или низкой частоты при одном и том же приращении температуры воды.

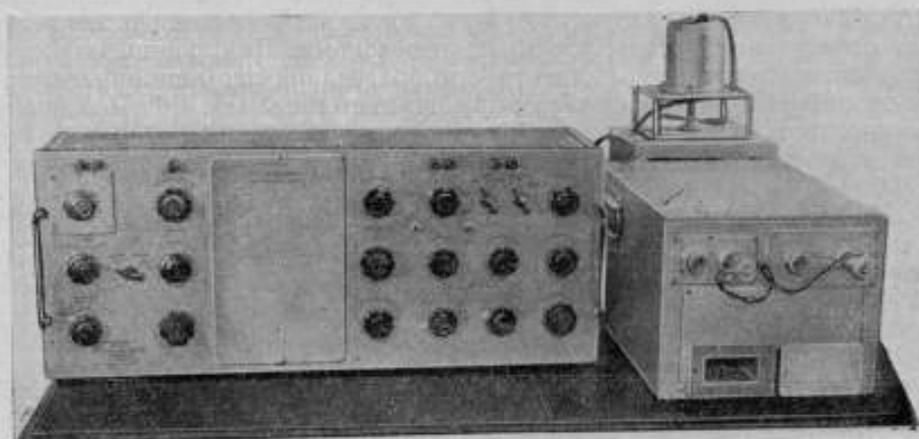


Рис. 7. Образцовый калориметрический измеритель мощности.

Специально теоретически и экспериментально исследована погрешность за счет неравенства потерь тепла при нагреве калориметрической нагрузки мощностью высокой частоты и постоянного тока [20, 21]. Найдено, что в диапазоне частот  $0-1700$  Мгц при измеряемой мощности  $100-5000$  мвт средняя квадратичная погрешность ряда измерений не превышает  $0,2\%$ .

В дальнейшем конструкция калориметрического измерителя мощности была усовершенствована. Разработана новая двойная дифференциальная головка, позволявшая существенно уменьшить влияние колебаний окружающей температуры. Диапазон частот измерителя мощности расширен до 3000 МГц.

Болометрический измеритель мощности состоит из головки с проводочным платиновым болометром и болометрического моста.

Для обеспечения малых отражений в широком диапазоне частот в головку включаются два болометра, соединенных параллельно по высокой частоте и последовательно по постоянному току. Это позволило получить в диапазоне частот 30–1000 МГц коэффициент стоячей волны напряжения не более 1,07 при коэффициенте преобразования (КП) не менее 99%. Погрешность измерителя мощности с упомянутым ранее мостом типа МТО-1 не превышает  $\pm \left( 0,6 + \frac{42 \cdot 10^{-6}}{P} \right) \%$ , где  $P$  — измеряемая мощность в ваттах.

Устройство для сличений измерителей мощности основано на принципе измерения отношения проходящих мощностей, подводимых поочередно к сличаемым приборам. Это отношение измеряется с помощью направленного ответвителя, в боковое плечо которого включен супергетеродинный измеритель отношений. Отличительной особенностью устройства является применение в нем направленного ответвителя с одним и тем же элементом связи для измерения как падающей, так и отраженной волн, что позволило практически исключить погрешность рассогласования\*. Средняя квадратичная погрешность при сличениях 0,5%.

В дальнейшем работы по расширению диапазона частот, повышению точности измерений и внедрению результатов работ в поверочную практику продолжались.

В 1962–1963 гг. разработаны новые болометры и образцовые болометрические головки типа БГД-3 (КП не менее 97% до 3000 МГц) и типа БГД-6 (КП не менее 93% до 10 000 МГц). Для аттестации образцовых головок по коэффициенту преобразования (КП) разработаны дифференциальные микрокалориметры, в которых определяется отношение мощностей высокой частоты и постоянного тока, вызывающих один и тот же болометрический эффект. Исследование показало, что погрешность аттестации болометрических головок не превосходит  $\pm 0,5\%$  до 3000 МГц,  $\pm 0,7\%$  до 5000 МГц и  $\pm 2\%$  при 10 000 МГц.

Продолжалось совершенствование измерительных схем болометрического измерителя мощности. Разработаны новые схемы, обеспечивающие прямой отсчет измеряемой мощности с помощью термопреобразователей и автоматическое регулирование замещающей мощности в болометре. На их основе разработаны двойной мост типа МДБ-1\*\*, одинарный мост (рис. 8) типа МБ-1 [22]\*\* и комбинированный прибор типа М4К (модернизация типа ИМО-1) для измерения как мощности, так и отношения мощностей (рис. 9) [23]. Эти усовершенствования

\* Рабинович Б. Е., Доклад на XIV научно-технической конференции, посвященной празднованию 100-летия со дня рождения А. С. Попова в 1959 г., Л.

\*\* Кржимовский В. И., «Болометрический и термисторный мост», Авторское свидетельство № 153967 с приоритетом от 18 апреля 1961 г.

позволили снизить погрешность болометрического измерителя мощности без учета погрешности аттестации головки до  $\pm(0,15 + \frac{10}{P} \cdot 10^{-6})\%$ , где  $P$  — измеряемая мощность в ваттах.

В разработанной в 1962—1963 гг. новой установке для поверки измерителей мощности (рис. 10) в диапазоне частот  $150 \div 1000$  Мгц исполь-

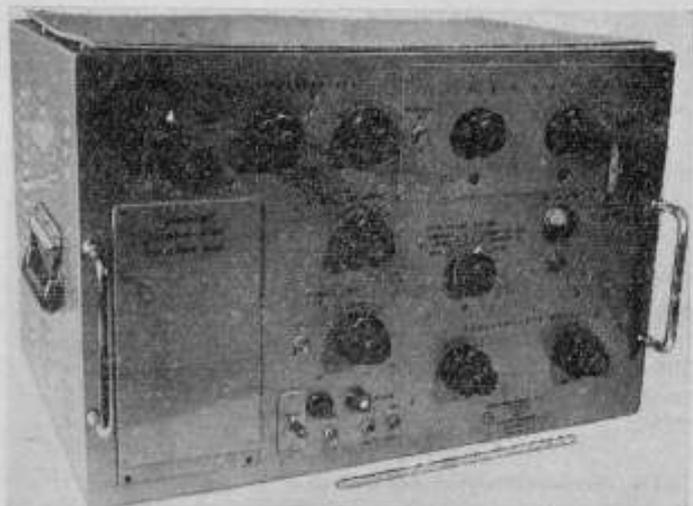


Рис. 8. Образцовый болометрический мост типа МБ-1.

зование поворотного направленного ответвителя новой конструкции с малым переходным затуханием позволило применить в боковом плече его болометрический измеритель отношения проходящих мощностей более точный, чем супергетеродинный. Новая схема измерителя отноше-

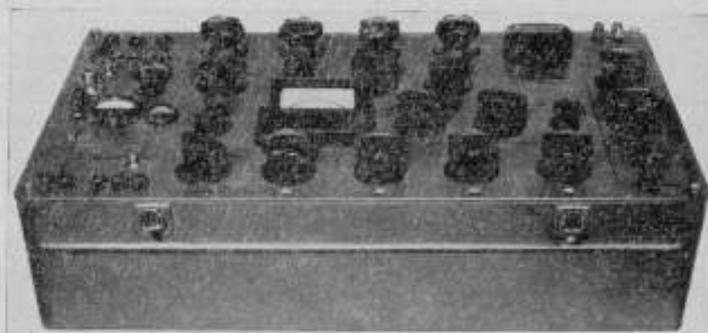


Рис. 9. Образцовый измеритель мощности и отношения мощностей типа М4К.

ния мощностей с прямым отсчетом и автоматическим уравниванием моста обеспечивает значительно большую производительность сличений и меньший уровень случайных погрешностей. Предельная погрешность при поверке измерителей мощности от  $150$  мквт до  $0,3$  вт — не более  $\pm 1\%$ , а при аттестации термисторных и болометрических головок — не более  $\pm 0,6\%$ .

В 1959—1962 гг. во ВНИИМ производились исследования в области измерения мощности в импульсе. В результате разработаны методика и аппаратура для поверки измерителей импульсной мощности в диапазоне частот  $30 \div 1000$  Мгц с погрешностью порядка  $\pm(5-7)\%$  [24].

Методика комплектной поверки измерителей импульсной мощности заключается в измерении отношения неизвестной мощности в импульсе к известной мощности немодулированного сигнала, а методика поэлементной поверки состоит из двух этапов: 1) поверки при малом уровне мощности немодулированного сигнала, 2) измерения отношения мощности при данном показании прибора к мощности, подаваемой на первом этапе.

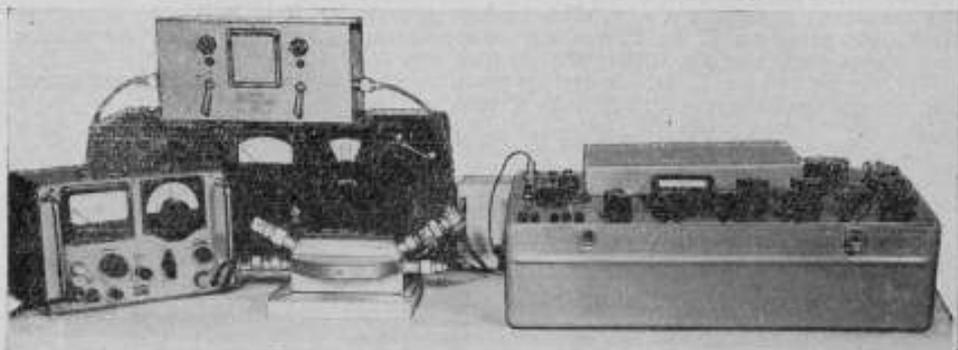


Рис. 10. Установка для поверки измерителей малой мощности типа УПИМ-4.

Работами ВНИИМ в области точного измерения мощности и напряжения и их отношений при высоких частотах в основном создана метрологическая база для обеспечения единства измерения этих величин в диапазоне частот от 100 кГц до  $1000 \div 3000$  Мгц. Дальнейшая задача заключается, с одной стороны, во внедрении полученных результатов в широкую поверочную и измерительную практику, а с другой — в дальнейшем повышении точности измерений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рабинович Б. Е., Труды ВНИИМ, вып. 13(73), 1953, стр. 26.
2. Рефераты научно-исследовательских работ институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, № 2, реферат 222, 1958.
3. Рабинович Б. Е., Федоров А. М., «Измерительная техника», № 2, 1958.
4. Федоров А. М., Рабинович Б. Е., «Измерительная техника» № 10, 1959.
5. Залуцкая Т. Л., Кржимовский В. И., Кшимовский В. В., Морозова Т. Б., Рабинович Б. Е., Стоякина О. В., «Измерительная техника», № 1, 1961.
6. Рефераты научно-исследовательских работ институтов Комитета стандартов, № 4, реферат 392, 1961.
7. Федоров А. М., Рабинович Б. Е., Труды институтов Комитета стандартов, вып. 65(125), 1962.
8. Рабинович Б. Е., Федоров А. М., Сб. «Новые измерительные приборы и методы их поверки», вып. 3, Стандартгиз, 1960.
9. Рабинович Б. Е., Стоякина О. В., Труды институтов Комитета стандартов, вып. 53(113), 1961.
10. Стрижков Г. М., Рабинович Б. Е., «Измерительная техника», № 10, 1959.
11. Рабинович Б. Е., Труды институтов Комитета стандартов, вып. 53(113), 1961.
12. Рабинович Б. Е., «Измерительная техника», № 9, 1961, стр. 37.
13. Рабинович Б. Е., «Измерительная техника», № 3, 1962.
14. Рабинович Б. Е., «Измерительная техника», № 4, 1956, стр. 43.

15. Рефераты научно-исследовательских работ институтов Комитета стандартов, № 3, реферат 292, 1959.
16. Федоров А. М., «Измерительная техника», № 6, 1958, стр. 74.
17. Залуцкая Т. Л., Труды ВНИИМ, вып. 13(73), 1953, стр. 50.
18. Стрелкова Е. И., «Измерительная техника», № 2, 1956, стр. 43.
19. Залуцкая Т. Л., Кржимовский В. И., Кшимовский В. В., Морозова Т. Б., Рабинович Б. Е., Стойкина О. В., «Измерительная техника», № 1, 1961, стр. 35.
20. Залуцкая Т. Л., Печерей Л. Е., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 53(113), 1961, стр. 5.
21. Григорьев А. В., Залуцкая Т. Л., Печерей Л. Н., Смирнов А. И., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 53(113), 1961, стр. 10.
- 22.\* Кржимовский В. И., Боллометрический и термисторный мост с термопарой для измерения мощности с. в. ч., «Измерительная техника», № 3, 1963.
23. Морозова Т. Б., Новые научно-исследовательские работы по метрологии, Информационный сборник ВНИИМ № 6, 1964, стр. 24.
24. Стрелкова Е. И., Новые научно-исследовательские работы по метрологии, Информационный сборник ВНИИМ № 6, 1964, стр. 26.

---

\* Принцип использования одной термопары и компенсационной ячейки в схеме одинарного моста предложен Т. Б. Морозовой.

АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ  
ВО ВНИИМ

В СССР исследования в области акустических измерений были начаты по инициативе президента Главной палаты мер и весов М. А. Шателена в 1929 г., и в 1931 г. была организована самостоятельная лаборатория акустических измерений.

Вообще принято считать, что акустические измерения, и в том числе гидроакустические, насчитывают не более трех десятков лет. Между тем, фактически в конце XIX в. в России уже проводились гидроакустические измерения. Так, в записках академика А. Н. Крылова сказано, что в 1892 г. в Петербурге по совету Д. И. Менделеева был построен «опытовый бассейн» для испытания моделей судов и акустических преобразователей.

Своей первой задачей акустическая лаборатория поставила создание эталона основного тона музыкальной гаммы, настроенного с предельной точностью сначала на частоту 435 *гц*, а затем на 440 *гц*. Этот тон был узаконен общесоюзным стандартом в 1935 г., транслировался по радио и, спустя несколько лет, был принят на основе международного соглашения и в других странах.

Рабочий эталон частоты акустической лаборатории ВНИИМ дважды, в 1934 и 1935 гг., сличался по радио с эталоном частоты Национальной физической лаборатории в Теддингтоне (НФЛ, Англия).

В дальнейшем деятельность лаборатории была направлена на разработку методов измерения звукового давления, так как испытание источников и приемников звука, исследование звукового поля, объективная оценка физиологических качеств звука (громкости, тембра), измерения звукоизоляции и звукопоглощения и т. п. немислимы без знания абсолютного значения звукового давления.

Ряд акустических измерений и, в частности, испытания звукоприемников и звукоизлучателей необходимо производить в помещении, свободном от отражений, интерференции и тому подобных искажений звукового поля.

Измерения на «открытом» воздухе обычно сопряжены со значительными трудностями, обусловленными наличием посторонних шумов и непостоянством метеорологических условий, а некоторые из них, например, со звукомерным диском, и вовсе невозможны. С другой стороны, в закрытом помещении обычного типа, как правило, имеют место

интерференционные явления, также препятствующие получению точных результатов измерений.

Если обеспечить достаточно сильное поглощение звука внутренними поверхностями помещения, условия распространения звуковых волн в лабораторной обстановке можно значительно приблизить к условиям распространения их в свободном пространстве. Решением проблемы звукового поля открытого пространства в замкнутом помещении является создание звукопоглощающей камеры, и поэтому лабораторией была разработана и к 1939 г. построена заглушенная камера, предназначенная, в первую очередь, для градуировки измерительных микрофонов и звукоизлучателей посредством звукомерного диска. К этому же времени относится создание звукового генератора, удовлетворяющего весьма высоким метрологическим требованиям.

Научные исследования лаборатории в 1941—1945 гг. были прерваны Великой Отечественной войной. В послевоенный период исследования были направлены на создание эталонных установок, воспроизводящих единицу звукового давления, и на разработку методов последующей передачи верных значений звукового давления от эталонных установок рабочим акустическим приборам.

В качестве единицы, подлежащей эталонному воспроизведению, было выбрано именно звуковое давление, так как оно определяет собой восприятие звука как основными акустическими приборами, так и ухом человека.

В настоящее время лабораторией производится измерение звукового давления в воздухе в диапазоне частот 20—300 кГц и в воде — в диапазоне 5 гц — 10 Мгц различными методами и на различной измерительной аппаратуре, соответствующей определенному частотному диапазону. Многообразие применяемой аппаратуры объясняется отсутствием таких универсальных средств измерений, которые позволили бы с требуемой точностью воспроизводить единицу звукового давления в широком диапазоне частот на одной установке.

Воспроизведение единицы звукового давления в воздухе в диапазоне частот 20 гц — 11,8 кГц осуществляется в поле плоских стоячих волн с помощью звукомерного диска. Сущность метода состоит в определении звукового давления в узле стоячих волн по вращающему моменту, действующему на звукомерный диск, помещенный в нучности колебательной скорости и расположенный своей нормалью под углом 45° к направлению распространения звука.

Звуковое давление  $P_s$  в месте расположения микрофона определяется для закрытой с обоих концов трубы по формуле

$$P_s = \sqrt{\frac{3}{8} \frac{\rho c^2 n D}{R a^3}}, \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность среды;

$c$  — скорость распространения звука;

$D$  — упругая постоянная нити подвеса диска;

$R$  — расстояние от шкалы отсчета до диска;

$a$  — радиус диска;

$n$  — отсчет по шкале, пропорциональный отклонению диска.

Разработанная лабораторией эталонная установка, воспроизводящая звуковое давление в поле плоских стоячих волн, состоит из трех латунных труб-резонаторов (см. таблицу).

Труба	Длина, м	Внутренний диаметр, мм	Рабочая область частот, гц	Примечания
Первая	4,32	53	20—180	Открыта с одного конца
	—	—	40—3 000	Закрытая
Вторая	0,865	25	1000—7 800	
Третья	0,865	16	660—11 800	

Значение звукового давления  $P_0$  для трубы, открытой с одного конца, пропорционально давлению в закрытой трубе

$$P_0 = 0,707P_s.$$

На одном конце каждой из труб закрепляется излучатель звука (телефон), на другом — градуируемый микрофон. В середине трубы сделан отвод для подвеса звукомерных дисков.

В установке применяется набор стеклянных дисков диаметром 3,975—5,990 мм, толщиной 0,055—0,061 мм. Диски подвешиваются на тонкой кварцевой нити диаметром 4—5 мкм.

Средняя квадратичная погрешность ряда измерений воспроизведения единицы звукового давления 0,1 дб; погрешность градуировки микрофонов 0,3 дб.

Для градуировки измерительных микрофонов в поле плоской бегущей волны в области частот 40—400 гц лабораторией предложена «бесконечная труба» — деревянная труба прямоугольного сечения длиной 10 м, с площадью поперечного сечения  $500 \times 400$  мм, толщиной стенок 30 мм. Рабочая часть трубы 4 м. На одном конце трубы расположен низкочастотный источник звука — электродинамический громкоговоритель типа 2А-9; другой конец заглушен полосами хлопчатобумажной ваты, навешенными с переменной плотностью под углом 15—20° к направлению распространения звука.

На расстоянии 2 м от излучателя, в центре рабочей части трубы, расположен измерительный звукомерный диск, при помощи которого градуируется «рабочая точка» поля. На расстоянии 0,5 м от этой точки и 1,5 м от излучателя установлен контрольный диск, по показаниям которого следят за постоянством звукового поля при градуировке измерительных микрофонов. Испытуемый микрофон помещается в рабочую точку вместо измерительного звукомерного диска. Средняя квадратичная погрешность ряда измерений на установке 0,25 дб.

Для градуировки микрофонов в квазисферическом звуковом поле в диапазоне частот 100 гц — 100 кгц лабораторией применен метод взаимности. В основу метода положена теорема о чувствительностях электроакустических преобразователей, согласно которой отношение чувствительности преобразователя в режиме приема к чувствительности в режиме излучения есть величина постоянная, называемая коэффициентом взаимности. Этот коэффициент не зависит от параметров преобразователя и определяется плотностью и скоростью распространения звука в среде, где производятся измерения.

В градуировке методом взаимности участвуют: излучатель, обратимый и градуируемый преобразователи. Чувствительность градуируе-

мого звукоприемника определяется на основании ряда косвенных измерений расчетным путем по формуле

$$S_n = V \frac{2d\lambda U_1 U_1'}{\rho c U_2^2} \quad (2)$$

- где  $\lambda$  — длина звуковой волны;  
 $d$  — расстояние от излучателя, на котором расположены градуируемый и обратимый преобразователи;  
 $\rho$  — плотность среды;  
 $c$  — скорость распространения звука;  
 $U_1$  и  $U_2$  — напряжения, развиваемые градуируемым и обратимым преобразователями под действием одного и того же звукового давления, создаваемого излучателем;  
 $U_1'$  — напряжение, развиваемое градуируемым преобразователем под действием звукового давления, создаваемого обратимым преобразователем при питающем токе  $i$ .

Погрешность градуировки 0,5 дБ в диапазоне частот до 20 кГц и 1 дБ в диапазоне 20 ÷ 100 кГц.

Для воспроизведения единицы звукового давления в свободном поле в области частот 1 ÷ 30 кГц лабораторией рекомендован метод звукомерного диска. Условия свободного звукового поля создаются в разработанной для этой цели камере, заглушенной клиньями из пористой пластмассы (пенопласта). Высота звукопоглощающих клиньев 200 мм, площадь основания 200 × 66 мм. Площадь камеры без звукопоглощающих покрытий 2,6 м<sup>2</sup>, с покрытием 1,8 м<sup>2</sup>. Камера имеет неправильную форму: высота ее у входа 1,8 м, у стенки, противоположной входу, 1,5 м. Стенки камеры изготовлены из дельта-фанеры толщиной 42 мм. Внутри камера облицована экспонзитом толщиной 25 мм, который, с одной стороны, увеличивает общий коэффициент звукопоглощения, с другой — обеспечивает дополнительную теплоизоляцию помещения камеры.

Излучатель звука — малогабаритный высокочастотный громкоговоритель расположен в остром углу камеры на высоте 900 мм. Звукомерные диски (измерительный и контрольный) подвешиваются на тонких, диаметром несколько микрометров, кварцевых нитях под углом 45° к направлению распространения звука.

Принцип измерения основан на определении значения колебательной скорости по значению вращающего момента, приложенного к звукомерному диску в звуковом поле.

Связь между звуковым давлением в поле квазисферических звуковых волн и измеряемой диском колебательной скоростью определяется соотношением

$$P = \rho c v \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{\lambda}{2\pi l}\right)^2}} \quad (3)$$

- где  $l$  — расстояние от источника звука до диска;  
 $v$  — колебательная скорость.

Средняя квадратическая погрешность воспроизведения единицы звукового давления 0,1 дБ; погрешность градуировки микрофонов 0,3 дБ.

В звукомерной камере применяются диски диаметром 3,000 ÷ 3,960 мм, толщиной 0,064 ÷ 0,1000 мм.

В диапазоне частот 20—300 кГц звуковое давление воспроизводится методом акустического радиометра. Последний представляет собой

отражающий диск, эксцентрично укрепленный на тонкой кварцевой нити и поворачивающийся под действием радиационного давления. Измерения производятся в малой заглушенной камере; значение звукового давления определяется по давлению радиации, действующему на радиометр,

$$P = \sqrt{\frac{\rho c^2 D n}{4\pi R a^3}}, \quad (4)$$

где  $a$  — радиус радиометра,

$D$  — упругая постоянная нити подвеса радиометра.

Для воспроизведения единицы звукового давления в воде в диапазоне частот 5—100 гц лабораторией разработана эталонная установка, основанная на принципе гидроакустического пресса. Она представляет заполненную водой стальную камеру малого объема; длина камеры 200 мм, внутренний диаметр 120 мм, средняя толщина стенок 50 мм. В основание камеры вставлен поршень диаметром 8 мм, при колебательном движении которого создается переменное давление. Значение звукового давления определяется по показаниям манометра и амплитуде перемещения поршня.

Для воспроизведения единицы звукового давления в диапазоне частот 360—18 000 гц создана установка, в которой давление воспроизводится методом звукомерного диска. Установка представляет собой наполненную обезгаженной водой толстостенную стальную трубу-резонатор (длина 1 м, внешний диаметр 150 мм, толщина стенок 50 мм). Внутри трубы у одного из ее концов, в пучности колебательной скорости, помещается звукомерный диск под углом 45° к направлению распространения звука.

Применяемый для измерений в воде набор звукомерных дисков диаметром 4,75—10,01 мм, толщиной 0,1—0,4 мм изготовлен из латуни, никеля, вольфрама и платины.

Расчетная формула для звукового давления в трубе-резонаторе с водой имеет вид

$$P = \sqrt{\frac{3}{8} \frac{\rho c^2 D n}{R a^3 \left( \frac{m_2 - m}{m_2 + m_0} \right)^2}}, \quad (5)$$

где  $m_2$  — масса диска;

$m$  — масса воды, вытесняемая диском;

$m_0$  — соколеблющаяся масса.

Погрешность воспроизведения звукового давления на установке 0,15 дб.

Рабочие измерительные звукоприемники в диапазоне частот 20 гц — 100 кгц градуируются на измерительной станции, разработанной лабораторией и построенной на озере, имеющем илистое дно и глубину под станцией не менее 4 м.

В качестве основного метода градуировки рабочих гидрофонов в открытом водоеме рекомендован метод сличения с образцовыми измерительными гидрофонами на непрерывном синусоидальном сигнале. Средняя квадратичная погрешность ряда измерений методом сличения 0,5 дб.

В диапазоне частот 10—100 кгц, наряду с методом сличения, применяется также абсолютный метод градуировки гидрофонов — метод взаимности как на непрерывном синусоидальном сигнале, так и в режиме шума. Средняя квадратичная погрешность ряда измерений при градуировке методом взаимности 0,5 дб. Исследования показали,

что для обеспечения этой точности измерения следует проводить в однородном звуковом поле, а в диапазоне 10—100 кГц — при работе в режиме непрерывного синусоидального сигнала, кроме того, следует применять вспомогательные преобразователи с малым углом раствора характеристике направленности (не более  $60^\circ$ ) и чувствительностью в режиме излучения не менее  $1 \text{ в} \cdot \text{м}^2/\text{н}$ .

Исследование однородности звукового поля заключается в определении диаграммы направленности излучателей (в ультразвуковом диапазоне частот), изучении закона спада звукового давления с увеличением расстояния от излучателя, в снятии фронтов распределения звукового давления в направлении, перпендикулярном звуковому потоку.

Звуковое давление в воде в диапазоне частот 100 кГц — 10 МГц измеряется на разработанной лабораторией эталонной установке при помощи набора акустических радиометров, которые представляют собой отражающие диски, эксцентрично укрепленные на тонких кварцевых нитях и поворачивающиеся под действием радиационного давления. Калибровка нити подвеса радиометра сводится к измерению периода колебаний специального образцового грузика с известным моментом инерции, подвешиваемого на испытываемую нить.

На крышке малого заглушенного бассейна установлено координатное устройство, позволяющее перемещать акустические радиометры и измерительные гидрофоны в различные «точки» звукового поля. Установка снабжена оптической системой отсчета углов поворота акустического радиометра, состоящей из источника света с конденсором, зеркальца, приклеенного к поводку радиометра, и измерительной шкалы. «Рабочая точка» фиксируется в бассейне с помощью стрелочного указателя. В качестве звукопоглощающей конструкции применяются щиты из резиновых клиньев.

Звуковое поле создается кварцевыми излучателями, которые устанавливаются в передней стенке бассейна. Акустический радиометр помещается в «рабочей точке» бассейна нормально к звуковому потоку. Значение звукового давления определяется по формуле (4).

Рабочий диапазон частот перекрывается набором акустических радиометров диаметром 10—30 мм.

Резонансные кварцевые излучатели градуируются с помощью акустических радиометров. Градуировка сводится к определению электрических напряжений, необходимых для получения в «рабочей точке» бассейна определенных значений звукового давления.

Основными источниками систематических погрешностей при измерении звукового давления могут явиться: тепловые потоки и «акустический ветер», неоднородность акустического поля, конструктивное оформление радиометра. При измерениях в акустических полях ( $2000\text{—}4000 \text{ н/м}^2$ ) потоки и «акустический ветер» не были обнаружены в лабораторных условиях.

Однородность акустического поля проверяется по спаду звукового давления с увеличением расстояния от излучателя и по фронтам звукового давления, снимаемым в направлении, перпендикулярном распространению звука. Измерения показали, что на нижних (из-за наличия отраженных сигналов) и верхних (из-за отсутствия плоских фронтов звукового давления) частотах рабочего диапазона звуковое поле не является достаточно однородным, что может внести дополнительную погрешность, не превышающую, однако,  $0,15 \text{ дб}$ .

Средняя квадратичная погрешность ряда измерений при воспроизведении звукового давления  $0,2 \text{ дб}$ . Градуируются гидрофоны на установке со средней квадратичной погрешностью ряда измерений  $0,5 \text{ дб}$ .

Кроме научно-исследовательских тем, связанных с разработкой методов и аппаратуры для воспроизведения звукового давления и градуировкой электроакустических преобразователей в широком диапазоне частот, лабораторией проводились и продолжают работы в области физиологической акустики: разработана установка, позволяющая поверять аудиометры с телефонами воздушной проводимости, исследуется установка для градуировки телефонов костной проводимости.

Лаборатория принимала участие в работах, связанных с установлением единого международного аудиометрического нуля при воздушной проводимости звука.

Для обеспечения этой работы в соответствии с резолюцией № 17 ИСО ТК-49 были осуществлены сличения объективным и субъективным методами в диапазоне частот 120—8000 *гц* телефонов СССР типа ТД-6, № 4 и 14, аттестованных в качестве образцовых, с образцовыми телефонами США типа WE705A, № 11 и 12, и образцовыми телефонами Франции типов РТТ, № 5 и 6, и Audio-15, № 5207 и 5208.

При объективной градуировке телефонов определялись их частотные характеристики чувствительности, выраженные через звуковые давления, развиваемые в полости прибора «искусственное ухо» типа ИУ-3 при постоянном напряжении на зажимах телефонов, равном: 0,05 *в* при испытании телефонов США и Франции и 0,1 *в* — при испытании телефонов СССР.

Субъективные сличения телефонов СССР с телефонами США и Франции были проведены на группе из 20 слушателей, состоящей из 10 мужчин и 10 женщин в возрасте от 19 до 30 лет, обладающих нормальным слухом.

Результаты этих сличений позволили сделать следующие выводы:

1. Совпадение частотных характеристик чувствительности телефонов в области частот, где конструктивные особенности приборов «искусственное ухо» не влияют на характеристики телефонов, дает возможность утверждать, что значения единиц звукового давления, воспроизводимых в СССР, США и Франции, совпадают в пределах погрешности измерений.

2. Характеристики телефонов, полученные на приборах «искусственное ухо» различной конструкции (СССР и Франция), существенно отличаются в области как высоких, так и низких частот.

3. В результате субъективных сравнений телефонов методом баланса громкости установлено, что имеется заметное различие в чувствительности телефонов, и подтверждена возможность воспроизводить по данным эквивалентных пороговых уровней звуковых давлений, полученным с помощью прибора «искусственное ухо» ИУ-3, нормальные пороговые уровни звуковых давлений, соответствующие значениям порога слышимости, стандартизованным в США и Франции.

Дальнейшие работы в области акустических измерений направлены на выполнение стоящей перед лабораторией главной задачи — контроля основных метрологических характеристик акустической и гидроакустической измерительной аппаратуры, применяемой в различных областях народного хозяйства: радиовещании, авиации, флоте, медицине.

Большое значение приобрели в настоящее время акустические методы исследования различных физико-химических свойств веществ. Изучая особенности распространения звуковых колебаний, удается лучше узнать некоторые детали строения вещества, исследовать процессы, происходящие при соударениях молекул газов, охарактеризовать молекулярные взаимодействия и взаимные превращения изомерных

форм молекул жидкости, определить упругие постоянные твердых тел. Современный размах строительства в СССР определил перед инженерами и научными работниками сложный комплекс задач, связанных с проектированием, строительством и эксплуатацией жилищных, транспортных, промышленных, гидротехнических, аэродромных и других сооружений. Одной из таких задач является проблема оценки физико-механических свойств строительных материалов в образцах или конструкциях без их разрушения.

В связи с этим в настоящее время большое внимание уделяется вопросу развития новых методов контроля качества строительных материалов и, в первую очередь, бетона, которые основаны на последних достижениях акустики, электроники и радиометрии.

В твердых телах могут распространяться упругие волны нескольких типов, отличающиеся различным характером сопутствующих им деформаций. Чаще всего при физико-химических и механических исследованиях приходится иметь дело с продольными или поперечными волнами, поэтому планом научно-исследовательских работ лаборатории предусмотрена разработка методов и аппаратуры для измерений звуковых давлений на продольных и поперечных волнах в звуковом диапазоне частот.

Вопросы воздействия ультразвука на вещество привлекают все большее внимание не только научных работников, но и производственников. Исследования последних лет раскрыли новые возможности применения этого вида энергии, позволившей использовать ультразвук непосредственно в технологических процессах при механической обработке твердых и хрупких материалов, очистке деталей, пайке и лужении, звуковой коагуляции аэрозолей, в металлургии, при предохранении котлов от осаждения накипи, ультразвуковой дефектоскопии, при получении эмульсий и суспензий и др.

При воздействии ультразвука на жидкую фазу вещества основной эффект вызывает кавитация, физический смысл которой заключается в следующем: ультразвуковые колебания высокой интенсивности и большой амплитуды давления в полупериод разрежения разрывают жидкость на полости, которые заполняются парами данной жидкости и растворенным в ней газом. В полупериод сжатия полости захлопываются, и в жидкости возникают ударные волны, способные создавать давления, во много раз превышающие исходное. Кроме преднамеренно образованной кавитации с помощью ультразвукового излучения большой интенсивности и успешно применяемой в промышленности, источником ее могут быть подводные взрывы, механические ударные волны, нагревание жидкости под давлением или натяжение ее в центрифугах. Кавитация возникает в потоке жидкости, двигающейся с большой скоростью около препятствия, или же при протекании потока жидкости через узкое отверстие, что часто имеет место в различного рода гидротехнических устройствах. В результате кавитации сильно разрушаются гребные винты судов и гидравлические системы. Вопросам разработки методов гидроакустических измерений при наличии кавитации и будет посвящена работа лаборатории в 1965—1966 гг.

## ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЙ

Метрологические работы в области измерения давлений начаты в отделении температуры и давления Главной палаты мер и весов в конце XIX в.

Манометрическая группа выделена в самостоятельную лабораторию в 1906 г. и в период 1906—1925 гг. была единственной лабораторией, ведущей все метрологические и поверочные работы по измерению давлений (главным образом избыточных).

Первым эталоном давления служил многоколенный ртутный манометр с верхним пределом в 100 ат, предложенный Д. И. Менделеевым. Погрешность воспроизводимой единицы давления имела порядок 0,1%. Образцовыми приборами служили также грузопоршневые манометры с непосредственной нагрузкой до 25 и до 300 ат, а затем манометрические весы Штюкрата до 400 ат и установка фирмы Шеффера и Буденберга со сдвоенным грузопоршневым манометром с двумя диапазонами пределов измерений: от 100 до 1000 ат и от 1000 до 4000 ат. Предельные погрешности этих приборов имели порядок 0,3%.

В дореволюционные годы манометрическая лаборатория занималась главным образом поверочными работами.

Начало 20-х годов характеризовалось резким увеличением парка измерительных приборов и все возрастающими запросами по повышению точности измерений со стороны как развивающейся промышленности, так и научных учреждений. В этот период создан новый эталонный ртутный манометр и значительно усовершенствован грузопоршневой манометр типа Рухгольца. Последний являлся основным образцовым прибором. Его погрешность имела порядок 0,05%. Возросший объем поверочных работ привел к необходимости организовать манометрические лаборатории в Московской и Горьковской палатах мер и весов. Задачи единства измерений в рассматриваемой области требовали разработки технической документации, регламентирующей поверочную работу (правила, инструкции), создания достаточного числа образцовых приборов и подготовки кадров поверителей. Эти задачи были успешно разрешены манометрической лабораторией Главной палаты мер и весов, руководимой тогда А. М. Кремлевым. Благодаря этому служба мер и весов была подготовлена к введению в 1925 г. обязательной проверки всех манометров, вакуумметров и мановакуумметров.

Научные исследования манометрической лаборатории, руководимой И. И. Сидоровым, в период 1925—1940 гг. были посвящены главным образом созданию и совершенствованию образцовой аппаратуры. Одновременно совершенствовалась техника выполнения поверочных работ и расширялась номенклатура поверяемых приборов. В эти годы И. И. Сидоровым создан новый эталонный ртутный манометр до 1,5 ат, воспроизводивший единицу давления с погрешностью порядка 0,005%. П. В. Индриком создан и внедрен в поверочную практику ряд образцовых приборов и необходимая вспомогательная аппаратура. В их число вошли грузопоршневые манометры до 50, 500 и 2000 ат.

Создание этих приборов, освободивших СССР от необходимости их импорта, являлось большой заслугой коллектива манометрической лаборатории ВНИИМ.

Развитие промышленности СССР, освоение ею новых технологических процессов, проводимых при высоких давлениях, поставило задачу повышения верхнего предела измерений образцовой аппаратуры до 3000 ат, а затем и до 10 000 ат. По проекту Д. В. Несговорова создана установка до 5000 ат. Позже П. В. Индриком разработана и введена в действие образцовая установка с грузопоршневым манометром до 10 000 ат.

К концу 30-х годов манометрическая лаборатория ВНИИМ разработала первую научно обоснованную и соответствующую потребностям того времени поверочную схему. Верхним звеном схемы служил упомянутый эталонный ртутный манометр до 1,5 ат, по которому поверяли образцовые грузопоршневые манометры 1-го разряда до 50 ат. Их погрешность оценивалась в 0,05%. Они применялись для проверок образцовых грузопоршневых манометров 2-го разряда, представленных приборами с верхними пределами до 50, 500 и 2000 ат, погрешности которых имели порядок 0,1%. Грузопоршневые манометры от 5000 до 10 000 ат, а также образцовые пружинные манометры составляли группу образцовых приборов 3-го разряда классов 0,2÷0,3.

Хорошо налаженная поверочная работа, для которой имелся достаточный парк надежных образцовых приборов и необходимая техническая документация, регламентирующая процесс проверки, а также соответствующие нормы и допустимые погрешности — все это позволило сохранить единство измерений в годы Великой Отечественной войны.

В конце 30-х годов была поставлена также задача создания нового ртутного бароманометра с погрешностью порядка 0,001÷0,002%. Однако война прервала начатые работы.

После войны лаборатория под руководством Д. В. Несговорова возобновила эти работы и закончила их, создав два стационарных прибора оригинальной конструкции, но с разными пределами измерений: 725÷790 мм рт. ст. барометр № 1 и 700÷770 мм рт. ст. барометр № 2. Эти приборы могут служить как барометрами, так и манометрами (бароманометрами). Барометрическая колонка прибора, изготовленная из нержавеющей стали, имеет в верхней и нижней частях цилиндрические полости диаметром 50 мм, соединенные между собой каналом. Верхняя полость соединена с устройством для откачки воздуха, нижняя может соединяться с атмосферой или присоединяться к барокамере. Отсчетное устройство, предложенное А. И. Карташевым, основано на явлении интерференции света. Измерение сводится к нахождению разности высот уровней в верхней и нижней полостях путем сравнения этой разности с длиной концевой меры, которую можно перемещать в вертикальном направлении и достигнуть таким образом совпадения плоскости боковичка, присоединенного к мере, с плоскостями зеркал

ртути: сначала для нижнего мениска ртути, затем — для верхнего и снова для нижнего. Вследствие непостоянства атмосферного давления каждое измерение требует трех отсчетов. При совпадении упомянутых плоскостей лучи от источника света, отражающиеся от поверхностей ртути и боковичка, интерферируют, и наблюдатель видит в окуляр интерференционные полосы. Длина концевой меры в сумме с длиной ее перемещения, определяемой по штриховой мере с ценой деления  $0,6 \text{ мкм/дел}$ , дает разность высот уровней. Изучение обоих приборов показало, что средняя квадратичная погрешность измерения составляет около  $0,005 \text{ мм рт. ст.}$ , но в значительной мере зависит от постоянства атмосферного давления.

Возможность присоединения нижней полости этих приборов к барокамере допускает применение их в качестве манометров для измерения избыточных давлений в упомянутых выше пределах. Рассмотренные два ртутных бароманометра представляли, по существу, в период до 1954 г. эталон давлений. Анализ существовавшей поверочной схемы, опиравшейся на упомянутый эталон, позволил указать следующие основные недостатки ее.

Передача единицы давления от эталона к образцовым грузопоршневым манометрам 1-го разряда до  $60 \text{ кгс/см}^2$  сопровождалась значительной потерей точности. Это было вызвано необходимостью сличения двух разнородных как по принципу действия, так и по пределам измерений, приборов. Погрешность метода сличений имела порядок  $0,015\%$ . Понижение ее путем повышения точности эталона оказывалось невозможным.

Поверочная схема не предусматривала вторичного эталона. Поэтому все образцовые манометры 1-го разряда следовало сличать с эталоном, что приводило к целому ряду затруднений и неудобств и требовало большой трудоемкости. Нормы допустимых погрешностей для всех звеньев поверочной схемы не могли считаться надежно обоснованными. Указанные соображения привели к ревизии существовавшей поверочной схемы. Новая схема была разработана Н. А. Гаевским, Е. Ф. Долинским и П. В. Индриком. Большой экспериментальный материал, накопленный в результате проверок манометров, и ряд специальных исследований, выполненных П. В. Индриком, позволили установить нормы допустимых погрешностей для образцовых приборов 1-го, 2-го и 3-го разрядов.

Проблема создания новых первичного и вторичного эталонов была поставлена и решена П. В. Индриком. Первый из них представлял групповой эталон, состоящий из пяти грузопоршневых манометров до  $60 \text{ кгс/см}^2$  с номинальной приведенной площадью поршней в  $1 \text{ см}^2$ . Для изготовления и отбора этой группы были составлены специальные технические и метрологические условия. Приведенные площади поршней отобранной группы приборов определяли по следующей методике.

Площади определяли по результатам прямых многократных измерений диаметров поршней и косвенных измерений величин зазоров. Последние находили расчетом по скорости опускания при заданной вязкости рабочей жидкости. Кроме того, перекрестно попарно сличали все приборы группы, что дало 10 отношений площадей. Объединение результатов линейных измерений и сличений дало группу из 15 уравнений с 5 неизвестными. Первые пять уравнений являлись результатами «абсолютных», а вторые десять — «относительных» измерений.

Решение этой системы способом наименьших квадратов дало значения приведенных площадей со средней квадратичной погрешностью  $6 \cdot 10^{-4}\%$ .

Вторичный эталон был представлен приборами (по два) до 60 и до 600  $\text{кгс}/\text{см}^2$ . Приведенные площади этих приборов определили сличением с первичным эталоном. Средняя квадратичная погрешность площадей составила  $1,6 \cdot 10^{-3}\%$ . Впоследствии, в конце 50-х годов, вторичный эталон дополнен грузопоршневым манометром до 6  $\text{кгс}/\text{см}^2$ , созданным В. К. Граменицким (ВНИИГК). Для образцовых приборов 1-го, 2-го и 3-го разрядов были установлены классы точности соответственно 0,02; 0,05 и 0,2. Таким образом, была разработана и осуществлена поверочная схема в области измерения давления, действующая поныне.

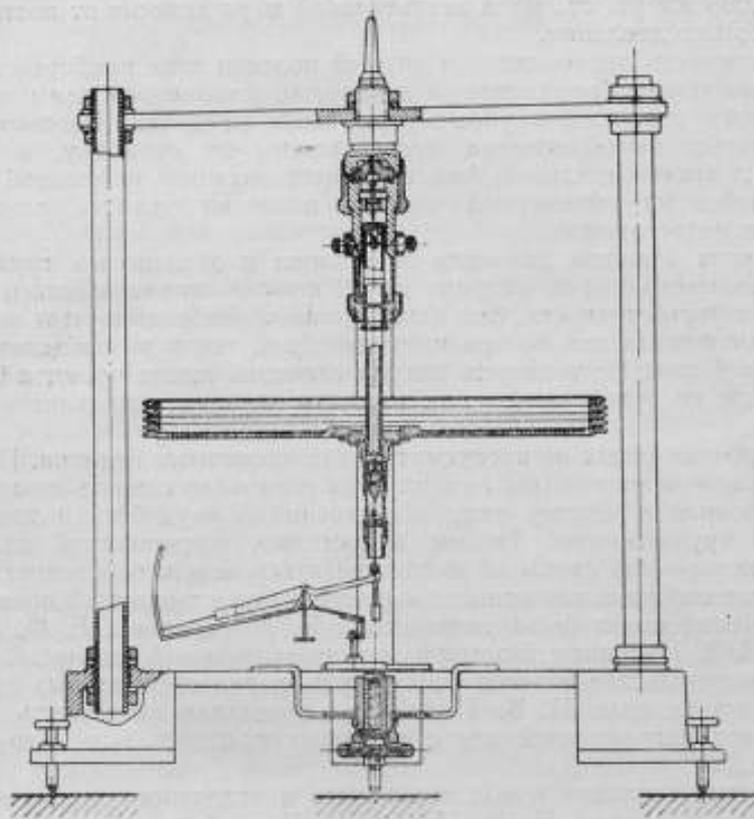


Рис. 1. Грузопоршневой барометр «типа Индрика».

Следующая проблема, которую поставила лаборатория, руководимая с 1957 г. Н. А. Гаевским, была связана с единством измерений атмосферного давления. Существующие в СССР (во ВНИИМ), а также в других странах наиболее точные ртутные барометры представляют сложные стационарные установки, что исключает возможность их взаимных сличений. Поэтому необходим переносный барометр, точность которого близка к точности упомянутых ртутных приборов. Такой барометр, впервые нарушивший традиционные принципы ртутных и пружинных приборов, был предложен П. В. Индриком. По схеме он представляет грузопоршневой манометр, но с «повернутым на 180°» поршнем. По разработанной конструкции (рис. 1) были изготовлены два барометра «типа Индрика» с номинальной приведенной площадью поршней в  $5 \text{ см}^2$ . Камера барометра присоединена к откачивающей системе, обуславливающей остаточное абсолютное давление, не превы-

шающее 0,001 мм рт. ст. «Всплывающий» под влиянием атмосферного давления поршень уравнивают грузами, несколько перегружая его на 0,5—1 г. Опускаясь, поршень действует на короткое плечо тангенсных весов. Движение поршня прекращается в тот момент, когда реакция коромысла уравнивает перегрузку. Тангенсные весы позволяют устранить необходимость применения миллиграммовых гирь, осложняющих наблюдения. Частное от деления усилия, действующего на поршень (вес грузов, за вычетом реакции коромысла), на его приведенную площадь определяет измеряемое атмосферное давление.

Подробное исследование прибора, выполненное Е. Ф. Долинским, показало, что средняя квадратичная погрешность измерений составляет 0,005—0,006 мм рт. ст. Существенными достоинствами барометра являются: простота конструкции, сравнительно малая температурная поправка (примерно в 8 раз меньше, чем для ртутного прибора), возможность легко перевозить прибор и производить измерения в любых местах. Созданный прибор, опирающийся на первичный эталон давлений, позволяет включить барометрию в общую поверочную схему по измерению давлений.

Широкое развитие технологических процессов при высоких и сверхвысоких давлениях свыше  $10^9$  н/м<sup>2</sup> ( $\approx 10\,000$  кгс/см<sup>2</sup>) поставило перед лабораторией задачу повышения верхнего предела измерений образцовой аппаратуры. Существовавшие образцовые установки до  $10^9$  н/м<sup>2</sup> ( $\approx 10\,000$  кгс/см<sup>2</sup>) оказались недостаточными. Необходимо было довести верхний предел измерений, по крайней мере до  $2,5 \cdot 10^9$  н/м<sup>2</sup> ( $\approx 25\,000$  кгс/см<sup>2</sup>). Соответствующие работы были начаты в конце 50-х годов. Необходимость сохранить абсолютный метод измерений заставила остановиться на установке, схематически представляющей грузопоршневой манометр. Основные задачи, которые надо было решить при проектировании этой установки, заключались в следующем.

Поршень, цилиндр и мультипликатор высокого давления должны выдерживать давления до  $2 \cdot 10^9 \div 2,5 \cdot 10^9$  н/м<sup>2</sup> (20 ÷ 25 тысяч атмосфер). Поэтому предел прочности стали для изготовления этих деталей должен быть не ниже  $2,5 \cdot 10^8$  н/м<sup>2</sup> ( $\approx 250$  кгс/мм<sup>2</sup>). Необходимо было разработать технологию такой стали. Далее, необходимо было подобрать рабочую жидкость: 1) достаточно вязкую и 2) не замерзающую при давлении  $2 \cdot 10^9$  н/м<sup>2</sup> ( $\approx 20\,000$  кгс/см<sup>2</sup>) и температуре 20° С.

Следовало отработать конструкции уплотнителей и запирающих жидкость устройств, которые могли надежно работать при указанном давлении. Наконец, необходимо было предусмотреть вспомогательную установку, которая позволила бы вести опытные исследования по оценке погрешностей, зависящих от деформации измерительной пары поршень — цилиндр. Все эти задачи были успешно решены. Опытные исследования В. С. Меськина и П. А. Кирмалова позволили разработать технологию изготовления хромо-никель-молибдено-ванадиевой стали с повышенным содержанием кремния и марганца и со следующими механическими характеристиками:  $\sigma_b = 22,5 \cdot 10^8 \div 25 \cdot 10^8$  н/м<sup>2</sup> ( $\approx 225 \div 250$  кгс/мм<sup>2</sup>) на разрыв и  $\sigma_s = 25 \cdot 10^8 \div 27,5 \cdot 10^8$  ( $\approx 250 \div 275$  кгс/мм<sup>2</sup>) на сжатие;  $\delta = 5 \div 8\%$ ;  $\psi = 20 \div 45\%$ ;  $a_k = (8 \div 10) \cdot 10^3$  дж/м<sup>2</sup> ( $8 \div 10$  кгс·м/см<sup>2</sup>).

Для цилиндров высоких давлений эту сталь закаливали изотермически с последующим отпуском (300—350°), благодаря чему достигалось повышение пластических характеристик. Ту же сталь, идущую для изготовления поршней и штоков, закаливали в масле, вследствие чего пластические свойства ее были ниже, но характеристики прочности достигали верхних значений указанных выше пределов. Исследования

опытных образцов цилиндров показали, что при повышенных вязких свойствах эта сталь может значительно упрочиться. Так, двуслойный цилиндр из стали с  $\sigma_s = 225$  выдержал давление в  $3,7 \cdot 10^9$  н/м<sup>2</sup> ( $\approx 37\,000$  кгс/см<sup>2</sup>). Таким образом, разработанная сталь обеспечила изготовление надежных деталей установки, подверженных высоким давлениям.

В качестве рабочей жидкости сначала применяли смесь глицерина (60%) с гликолем (40%). Однако, помимо недостаточной вязкости, эта смесь вызвала коррозию деталей. После ряда испытаний окончательно остановились на предложенном Г. И. Полухиным клее, получаемом растворением натурального каучука в бензине, со степенью густоты, близкой к тестобразной. В качестве уплотнителей были приняты конические наконечники из указанной стали, которые выдерживают многократные нагружения давлением до  $20 \cdot 10^8 \div 25 \cdot 10^8$  н/м<sup>2</sup> ( $\approx 20 \div 25$  тысяч атмосфер).

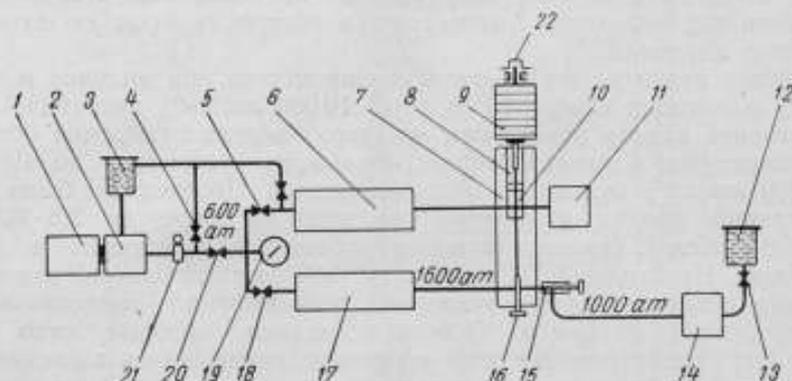


Рис. 2. Принципиальная схема манометрической установки.

1 — электропровод; 2 — масляный насос; 3 — резервуар для масла; 4, 5, 13, 18, 20 — запорные вентили; 6 — мультипликатор на  $25 \cdot 10^8$  н/м<sup>2</sup> ( $\approx 2500$  ат); 7 — блок центральный; 8 — грузопоршневой манометр; 9 — грузы массой 1000 кг; 10 — крестовина; 11 — поверяемый манометр; 12 — резервуар для рабочей жидкости; 14 — ручной насос на  $12 \cdot 10^8$  н/м<sup>2</sup> ( $\approx 1200$  ат); 15 — запорный вентиль на  $6 \cdot 10^8$  н/м<sup>2</sup> ( $\approx 6000$  ат); 16 — запорный вентиль на  $25 \cdot 10^8$  н/м<sup>2</sup> ( $\approx 25\,000$  ат); 17 — мультипликатор на  $6 \cdot 10^8$  н/м<sup>2</sup> ( $\approx 6000$  ат); 19 — манометр на  $8 \cdot 10^8$  н/м<sup>2</sup> ( $\approx 800$  ат); 21 — предохранительный клапан; 22 — ограничитель хода поршня.

Существенным нововведением была новая конструкция сальника с так называемой некомпенсированной площадью, предложенная Г. И. Полухиным. Замена «колец» Бриджмена рядом цилиндрических штифтов устранила «перекусывание» и обеспечила надежную работу уплотнительных устройств. Общая схема установки дана на рис. 2.

Вспомогательная установка до  $10^9$  н/м<sup>2</sup> ( $\approx 10\,000$  кгс/см<sup>2</sup>) создана П. В. Индриком, как упоминалось, для опытных исследований погрешностей, возникающих из-за деформаций измерительных поршня и цилиндра. Эта установка допускает включение любых измерительных комплектов с площадями поршней различных номиналов. Максимальная непосредственная нагрузка на поршень  $10^4$  н ( $\approx 1000$  кгс). Сличения показаний специальных измерительных комплектов, работающих в этой установке, с показаниями образцового грузопоршневого манометра с тем же пределом измерений позволяют вести упомянутые выше исследования.

В конце 50-х годов поверочная практика лаборатории выдвинула еще одну проблему: динамические испытания индикаторов мощности и пиметров. Такие испытания дают возможность оценить характери-

стики поверяемого прибора при условии, что образцовая установка позволяет воспроизводить переменные давления с различными заданными частотами. Закон изменения давления должен быть известен с достаточной для поверки испытываемого прибора точностью.

Опыты, проведенные со сжатием газа и жидкости, дали неудовлетворительные результаты. Помимо того что закон изменения давления отличался от гармонического, его трудно было установить с достаточной точностью. В результате Н. А. Гаевским была предложена схема пружинной установки. Поршень поверяемого пружинного индикатора мощности или пиметра присоединяют к наконечнику образцовой, хорошо изученной пружины. Противоположный наконечник этой пружины совершает возвратно-поступательное движение по заданному закону. Последний определен формой кулачкового механизма, который может работать на ряде заданных частот.

Установка регистрирует оптическим способом движение как обоих наконечников образцовой пружины, так и поршня испытываемого прибора. Сравнительное изучение трех полученных диаграмм дает возможность оценить необходимые характеристики поверяемого прибора. Параметры установки следующие: среднее давление до  $4 \cdot 10^7$  н/м<sup>2</sup>, частота от 1 до 100 гц.

В настоящее время первоочередными проблемами являются:

а) повышение верхнего предела измерений образцовой аппаратуры, основанной на абсолютных методах измерений, до нескольких десятков тысяч атмосфер;

б) развитие работ по созданию образцовой аппаратуры для измерения давлений, изменяющихся во времени по любому закону.

## ИЗМЕРЕНИЕ ВАКУУМА

Измерения низких абсолютных давлений в области вакуума в течение долгого времени были грубо приближенными и давали лишь качественную оценку состояния газа в вакуумной системе. Поэтому эталонам и образцовым приборам в этой области не уделялось должного внимания.

Однако внедрение вакуумной техники во многие технологические процессы и научные исследования — вакуумные плавки, сушки, пропитки, исследования верхних слоев атмосферы и т. п. — потребовали повышения точности измерения вакуума. Первоначально заинтересованные организации (научно-исследовательские и учебные институты и заводы) сами создавали приборы как для измерения вакуума, так и для градуировки вторичных приборов, пользуясь тем, что постоянную или шкалу основного прибора этой области измерений — компрессионного манометра, предложенного еще в 1874 г. Мак-Леодом, — можно рассчитать, исходя из геометрических размеров прибора.

В 1950 г. во ВНИИМ создана группа измерения вакуума сначала внутри лаборатории давления, основанной Д. И. Менделеевым, 130-летие со дня рождения которого мы отмечаем. Организатором группы измерения низких абсолютных давлений был Б. А. Остроумов, его помощником — М. И. Дрига.

В 1951 г. лаборатория измерения вакуума во ВНИИМ была выделена в самостоятельную лабораторию, основной ее задачей было создание образцовых приборов для измерения абсолютного давления в пределах  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  мм рт. ст. и методов передачи единицы давления в измерительное хозяйство страны.

Сначала были созданы обычные компрессионные манометры с пределом измерений давлений  $1$ – $10^{-4}$  мм рт. ст. Однако их точность была невысокой, так как не были специально исследованы и обработаны капилляры. Чтобы повысить точность приборов, разработали установку в виде группы из трех манометров одного номинального значения. Для наблюдения за уровнями ртути был специально сконструирован тройной катетометр. Затем создали абсолютный термомолекулярный манометр 1-го разряда на пределы измерения давления  $10^{-4}$ – $10^{-6}$  мм рт. ст.

В дальнейшем был разработан и впервые внедрен в практику набор образцовых компрессионных манометров 1-го разряда с пределами измерений  $15 \pm 10^{-6}$  мм рт. ст., который позволил начать поверку в области измерений низких абсолютных давлений.

Последующие исследования лаборатории привели к созданию образцового электронного ионизационного манометра 2-го разряда на пределы  $10^{-3} \pm 10^{-10}$  мм рт. ст. В настоящее время образцовые установки лаборатории охватывают область абсолютных давлений  $15 \pm 10^{-10}$  мм рт. ст.

#### Образцовый термомолекулярный манометр 1-го разряда

Образцовый термомолекулярный манометр (рис. 1) осуществлен в 1952—1955 гг. (автор М. И. Дрига). Принцип действия прибора заключается в следующем. Стенки двух камер, соединенных между

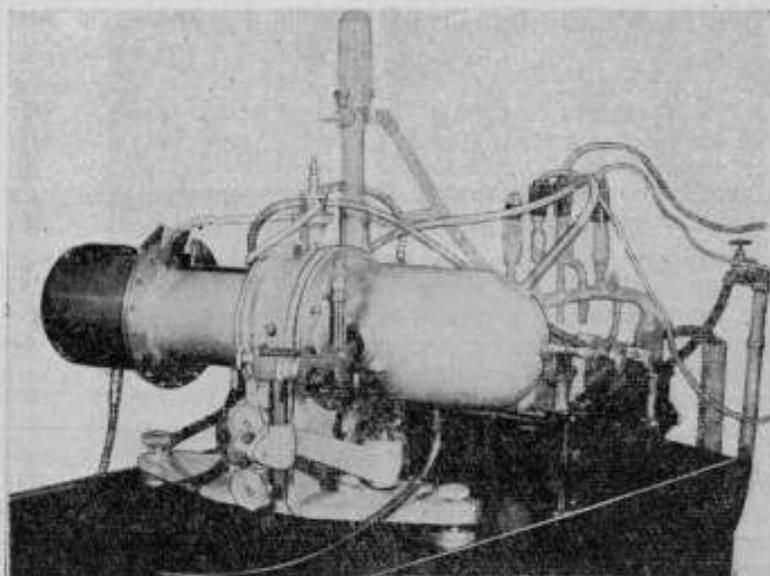


Рис. 1. Общий вид образцового термомолекулярного манометра ВНИИМ.

собой некоторым каналом, имеют разную температуру  $T_1$  и  $T_2$ , которая искусственно поддерживается постоянной. При состоянии газа в камерах, удовлетворяющем условию высокого вакуума (длина свободного пробега газа  $\lambda$  много больше размеров камер), давления  $p_1$  и  $p_2$  в камерах будут связаны с температурами  $T_1$  и  $T_2$  известным уравнением кинетической теории газов

$$\frac{p_1}{p_2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \quad (1)$$

Если в канал между камерами поместить поршень с известной площадью  $S$ , то на него будет действовать разность сил давления

$$F = (p_1 - p_2)S, \quad (2)$$

которую можно измерить, например, крутильными весами.

Таким образом, получается система двух уравнений (1) и (2) с двумя неизвестными  $p_1$  и  $p_2$ , при решении которой будут найдены оба значения давления. Одно из них — измеряемое.

Пределы измерения давления термомолекулярным манометром определяются следующим образом.

Как известно, верхний предел давления определяется условием высокого вакуума. При температуре воздуха  $T = 20^\circ \text{C}$  и давлении  $p = 10^{-4}$  мм рт. ст. длина свободного пробега газа  $\lambda = 42,7$  см. Это и будет верхним пределом измерения прибора.

Повышение давления на порядок приведет к уменьшению  $\lambda$  в 10 раз, т. е. вакуум при реальных рабочих размерах прибора перейдет из высокого в средний.

Нижний предел определяется усилиями, действующими на поршень, и возможностью их точного измерения. При комнатной температуре стенок камеры ( $T_1 \approx 300^\circ \text{K}$ ), в которой измеряется давление  $p$ , и при температуре стенок  $T_2 \approx 80^\circ \text{K}$  во второй камере, термостатированной жидким азотом, согласно уравнению (1) будем иметь

$$p_1 \approx 2p_2 \quad (3)$$

и

$$F \approx \frac{p_1}{2} S. \quad (4)$$

При диаметре поршня порядка 7 см и давлении  $p_1 \approx 10^{-6}$  мм рт. ст. разность сил, действующих на поршень, равна

$$F \approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ н} \approx 2 \cdot 10^{-5} \text{ зс.}$$

Очевидно, что измерение в условиях опыта такой малой силы взвешиванием или другим методом с достаточной точностью весьма затруднительно. Эта трудность и определяет главным образом нижний предел термомолекулярного манометра.

Следовательно, пределы измерения образцовым термомолекулярным манометром 1-го разряда будут  $10^{-4} \div 10^{-6}$  мм рт. ст.

Поршень манометра представляет собой систему тонких дисков ничтожно малой теплопроводности. Торцовые поверхности поршня имеют температуры, весьма близкие к температурам стенок камер.

Разность сил  $F$  измеряют при помощи микровесов, на одном конце коромысла которых укреплен поршень, на другом — небольшой легкий магнит. Весы уравниваются благодаря изменению тока в катушке, образующей с указанным магнитом магнитоэлектрическую систему. Катушка находится вне стеклянной вакуумной системы. Момент равенства результирующей силы давления и магнитоэлектрической силы фиксируется с помощью зеркальца, укрепленного на коромысле. Мерой измеряемого давления служит ток  $I$ , проходящий через катушку:

$$p = cI. \quad (5)$$

Для определения постоянной весов  $c$  единицу силы воспроизводят, навешивая рейтер на коромысло весов при помощи специального магнитного механизма внутри вакуумной системы.

Основными источниками погрешностей термомолекулярного манометра являются микровесы, необходимые для измерения малых сил, действующих на торцовые поверхности поршня, а также сложность учета касательных сил, действующих в кольцевом зазоре между поршнем и цилиндром, в котором он находится, вес частиц газа, сор-

бированных поршнем (при вертикальном расположении поршня), влияние внешних магнитных полей на подвижную систему, трудность точного измерения температур камер.

Исследование образцового термомолекулярного манометра ВНИИМ 1-го разряда показало, что средняя квадратичная погрешность измерения давления в указанном диапазоне составляет (5—8) %.

### Набор образцовых компрессионных манометров

В 1958—1961 гг. в лаборатории был создан набор образцовых компрессионных манометров (М. И. Дрига, М. А. Гуляев, А. В. Ерюхин, В. Н. Рыжов). В наборе (рис. 2) применены капилляры со шлифованными каналами. Как известно, от их качества в значительной степени зависит точность манометров.

Как конусность, так и эллиптичность каналов капилляров, изготовленных обычным способом — вытягиванием трубок из расплавленного стекла, — обычно существенно отклоняются от их некоторого среднего значения. При длине капилляра 300—400 мм эти отклонения могут достигать 0,2—0,3 мм.

Разработанная во ВНИИМ методика обработки капилляров со шлифованными каналами применялась для трубок с номинальным значением диаметров 0,5—5 мм. При этом случайные отклонения диаметра канала на участках длиной 300—400 мм характеризуются средним квадратичным значением, не превышающим 2 мкм.

Пригодными считаются только трубки, разность внутренних диаметров концов которых на длине 300—400 мм не превышает 0,1 мм. Измерять диаметры можно пробкой-калибром. Набор притиров для шлифовки каналов изготавливают из латуни или красной меди. Размеры притиров при их длине 20—50 мм на 0,02—0,1 мм меньше диаметра канала заготовки. Притиры привернуты или припаяны к стальному штоку длиной 400—450 мм и диаметром 0,6—0,7 диаметра притира.

Чтобы шток не касался стенок капилляра, применяют цилиндрическую оправку, один конец которой надевают на конец шлифуемого капилляра, другой конец имеет малое отверстие для прохода штока. Шлифующая жидкость — вода, в которой размешан (взвешен) оптический порошок, — подается на притир через окно сверху оправки. Шлифуют канал при скорости вращения вала 500 об/мин. Капилляр с оправкой на конце плавно перемещают вдоль оси притира в обоих направлениях с тем, чтобы он проходил по всей длине капилляра. В процессе шлифовки меняют 2—3 притира, используя все более мелкий порошок.

Средний диаметр шлифованного капилляра определяют двумя способами:

1. Капилляр погружают в стеклянную ванну с плоскопараллельным дном, заполненную толуолом, коэффициент преломления которого весьма близок к коэффициенту преломления молибденового стекла. Диаметр измеряют в проходящем свете на универсальном измерительном микроскопе типа УИМ-21. При наблюдении стенки капилляра почти «исчезают», а границы шлифованного канала видны четко и резко. При определении конусности канала его диаметр измеряют по длине в точках, лежащих через 1 см друг от друга; при исследовании на эллиптичность измерения проводят в двух взаимно-перпендикулярных сечениях.

Результаты обрабатывают методом дисперсионного анализа, позволяющим определить систематические отклонения диаметра капилляра от среднего значения и среднее квадратичное отклонение.

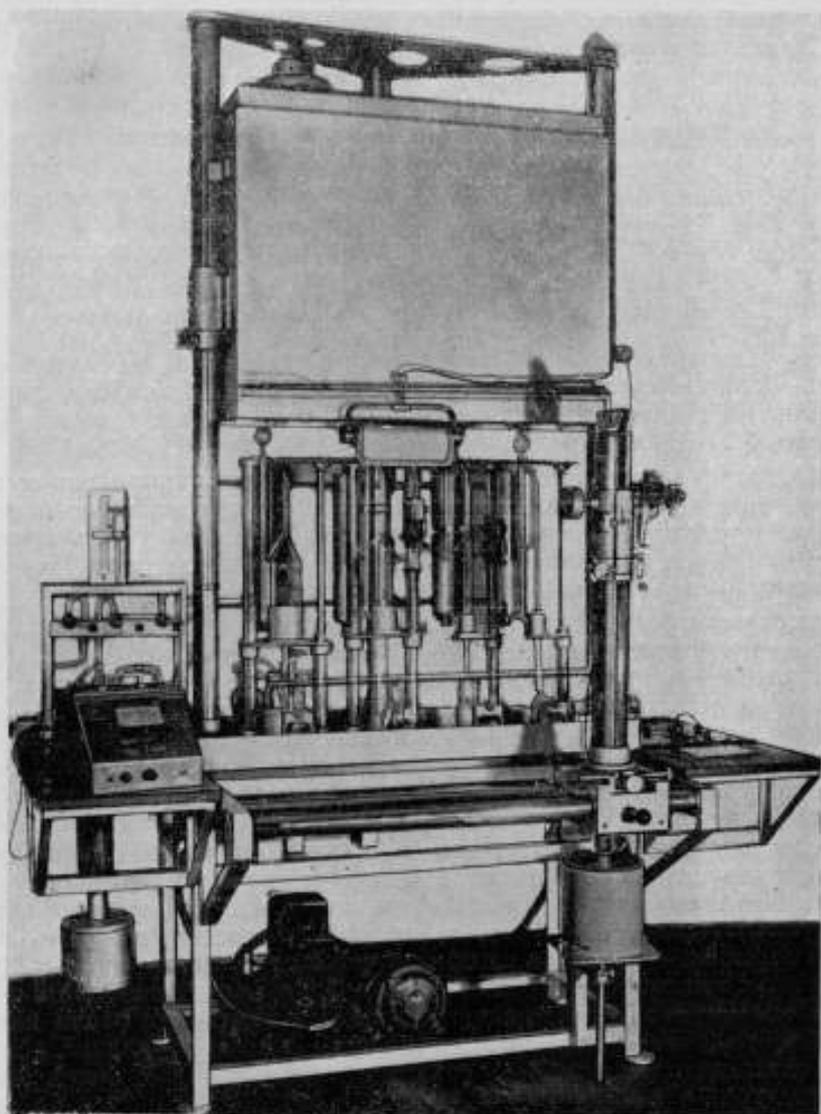


Рис. 2. Общий вид набора образцовых компрессионных манометров ВНИИМ.

2. Для определения среднего диаметра капилляра вторым способом заполняют его ртутью, измеряют высоту столба ртути, а затем взвешивают ее.

Применение шлифованных капилляров повышает точность измерений; кроме того, «прилипание» ртути к стенкам каналов в них уменьшается и тем самым обеспечивается плавность ее подъема.

Уравнение измерения образцовых компрессионных манометров 1-го разряда ВНИИМ отличается от уравнения обычных компрессионных

манометров тем, что в него вводятся следующие поправки, повышающие точность измерений:

1. Поправка  $\Delta_1$  на депрессию, которую полностью исключить не удается, хотя применение шлифованных капилляров в значительной степени ее снижает. Она вводится при исследовании для каждого манометра отдельно.

2. Поправка  $\Delta_2$  на разность форм и объемов мениска ртути в измерительном капилляре и куполообразного свода запаянного конца измерительного капилляра вводится также для каждого манометра отдельно.

3. Поправка  $\Delta_g$  на отличие ускорения силы тяжести в условиях измерения от стандартного ( $9,80665 \text{ м/сек}^2$ ), при котором была определена единица давления.

4. Поправка  $\Delta_p$  на отличие плотности ртути при температуре  $0^\circ \text{C}$  ( $13,5951 \text{ г/см}^3$ ), при которой определена единица давления.

Уравнение измерения образцовых компрессионных манометров имеет вид

$$p = \frac{C(h_c - h_u - \Delta_1)(h_0 - h_u - \Delta_2)(1 + \Delta_g)(1 + \Delta_p)}{1 - C(h_0 - h_u - \Delta_2)},$$

где  $h_c$ ,  $h_u$ ,  $h_0$  — соответственно отсчеты уровней ртути в сравнительном и измерительном капиллярах и отсчет высоты запаянного конца измерительного капилляра;

$C = \frac{\pi d^2}{4V}$  — постоянная манометра, причем

$d$  — диаметр капилляра,

$V$  — начальный объем сжатия.

Отсчеты производятся при помощи катетометра с ценой деления  $0,02 \text{ мм}$  или антипараллаксного нониуса с ценой деления  $0,05 \text{ мм}$ .

При конструировании манометров приняты меры к устранению откачивающего действия паров ртути, устремляющихся из манометра к охлаждаемой жидким азотом ловушке. Эти меры заключаются в охлаждении ртути, а также в создании значительного перепада давления при прохождении ртутных паров по трубке, соединяющей нижний и верхний резервуары манометра. Для этой цели трубка выбирается достаточно малого сечения.

В набор образцовых компрессионных манометров ВНИИМ входят 5 манометров с номинальными параметрами, указанными в табл. 1.

Таблица 1

Номинальные пределы, мм рт. ст.	Начальный объем сжатия $V$ , $\text{см}^3$	Диаметр капилляра $d$ , мм
$15 \div 1,5 \cdot 10^{-1}$	25	5
$1,5 \div 1,5 \cdot 10^{-2}$	50	2,5
$1,5 \cdot 10^{-1} \div 1,5 \cdot 10^{-3}$	200	1,5
$1,5 \cdot 10^{-2} \div 1,5 \cdot 10^{-4}$	800	1
$1,5 \cdot 10^{-3} \div 1,5 \cdot 10^{-5}$	1000	0,5

Предварительная оценка погрешностей и взаимное сличение манометров внутри каждого набора, а также двух наборов манометров позволили установить, что средняя квадратичная погрешность измерения на верхнем пределе давления не превышает  $0,3\%$  и, постепенно увеличиваясь, доходит до  $3\%$  на нижнем пределе.

В комплект набора манометров входит система насосов, печь для обогрева манометров, вакуумметр типа ВТ-2, коллектор для напайки исследуемых манометрических ламп. Набор снабжен блоком люминесцентных ламп для освещения капилляров, наблюдаемых в катетометр.

Лучшие из зарубежных образцовых компрессионных манометров фирмы Филипс и Японской электротехнической лаборатории (Токио) обеспечивают измерение давления до  $10^{-4}$  мм рт. ст. приблизительно с такими же погрешностями.

### Образцовый ионизационный манометр 2-го разряда

Абсолютные давления ниже  $10^{-4} \div 10^{-5}$  мм рт. ст. измеряют в настоящее время исключительно ионизационными манометрами того или иного типа. Они не являются абсолютными и требуют градуировки по абсолютному манометру другого вида.

Наиболее стабилен в работе ионизационный манометр с накаливаемым катодом, т. е. электронный ионизационный манометр. По его принципу в 1961—1963 гг. был создан образцовый ионизационный манометр ВНИИМ (А. В. Ерюхин, М. А. Гуляев и В. А. Рыжов).

Известно, что ионизационный манометр измеряет, строго говоря, не давление, а концентрацию в области своих электродов ионизированных молекул газа или ионов. При постоянном источнике ионизации, каким является, в частности, электронный ток  $I_e$ , эмитируемый катодом манометрической лампы, число ионов, пропорциональное числу молекул газа, служит характеристикой давления.

Для внутренней цепи межэлектродного пространства манометрической лампы может быть, таким образом, написано соотношение

$$\frac{I_i}{I_e} = K_T p, \quad (6)$$

где  $I_i$  — ток, определяемый только количеством образовавшихся ионов;

$K_T$  — теоретическая чувствительность манометрической лампы, зависящая от ее конструкции.

Уравнение (6) и принимается для расчета давления в обычных ионизационных манометрах, причем вместо  $I_i$  берется значение тока  $I_n$ , измеренное каким-либо прибором во внешней цепи лампы. В этом случае полагают, что

$$I_i \approx I_n.$$

Это приближенное равенство не удовлетворяется точно по следующим причинам:

1. Не все ионы улавливаются коллектором: часть из них идет к катоду, часть рекомбинирует в пространстве с электродами, часть осаждается на стенках колбы, заряжая ее поверхность. В этом случае может иметь место неравенство

$$I_i > I_n.$$

2. Во внешней цепи коллектора могут протекать и другие так называемые фоновые токи, измеряемые прибором. Из фоновых токов наиболее изучен фототок  $I_f$ , вызываемый облучением коллектора мягкими рентгеновскими лучами, возбуждаемыми на аноде при торможении

о него электронов эмиссии. В этом случае может соблюдаться неравенство

$$I_i < I_n.$$

В частности,  $I_n = I_f$  при  $I_f = 0$ , что чаще всего определяет нижний предел измерения ионизационного манометра.

Теоретическое исследование распределения токов в манометрической лампе дало следующее соотношение между измеряемым давлением и токами  $I_n$  и  $I_k$  соответственно в цепях ионного коллектора и катода манометрической лампы:

$$p = \frac{1}{K} \cdot \frac{I_n}{I_k} \cdot \frac{1 - \frac{I_f}{I_n}}{1 - \frac{\delta}{\beta} \left( \frac{I_n - I_f}{I_n} \right)}. \quad (7)$$

Здесь  $\beta$  и  $\delta$  — доли тока положительных ионов, идущих на ионный коллектор и на катод соответственно;

$I_f$  — ток фотоэлектронов, выбиваемых с коллектора рентгеновским излучением анода, включая возможный ток утечки через изоляцию.

Чувствительность  $K$  равна произведению коэффициента  $\beta$  и теоретической чувствительности. Выполнение условий

$$\frac{I_f}{I_n} < 0,01 \quad (8)$$

и

$$\frac{\delta}{\beta} \cdot \frac{I_n - I_f}{I_n} \ll 0,01 \quad (9)$$

позволяет с погрешностью не более 1% упростить уравнение (7):

$$p = \frac{1}{K} \cdot \frac{I_n}{I_k}. \quad (10)$$

При справедливости уравнения (10) значение чувствительности  $K$  можно было бы определить экспериментально сличением ионизационного манометра с другим манометром, дающим абсолютное значение  $p$ .

Измерение токов  $I_n$  и  $I_k$  при известном значении  $p$  позволяет вычислить  $K$  по уравнению (10). Подстановка значения  $I_k$  из уравнения (10) в условие (8) приводит его к следующему виду:

$$p > \frac{I_f}{0,01KI_k}. \quad (11)$$

Аналогичная подстановка в условие (9) дает

$$p \leq 0,01 \frac{\beta}{\delta K \left( 1 - \frac{I_f}{I_n} \right)}. \quad (12)$$

Условия (11) и (12) определяют нижний и верхний пределы применимости манометра.

Пределы линейности приходится устанавливать экспериментально: верхний — сличением с каким-нибудь образцовым манометром; нижний — по исследованию зависимости ионного тока от анодного напряжения при постоянных напряжениях на коллекторе, давлении и токе коллектора. По ходу этой зависимости можно судить об отсутствии или

наличии в токе ионного коллектора составляющей фототока и таким косвенным путем проверять, применимо ли уравнение (10) при тех или иных низких давлениях.

При проектировании, конструировании и исследовании образцового ионизационного манометра 2-го разряда ВНИИМ (рис. 3) были приняты все меры к увеличению пределов линейности приближенного уравнения (10).

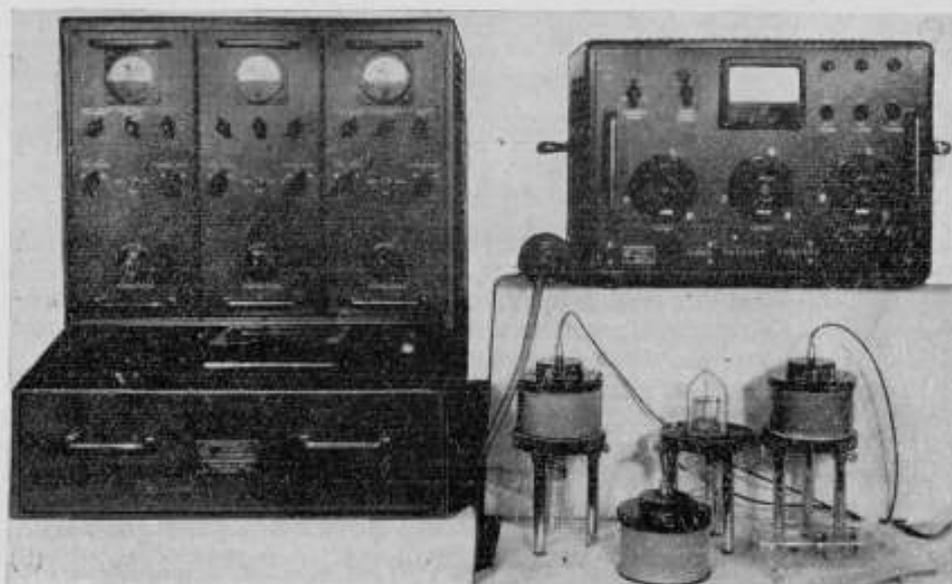


Рис. 3. Общий вид образцового ионизационного манометра ВНИИМ.

Образцовый ионизационный манометр 2-го разряда ВНИИМ на пределы измерения  $10^{-4} \div 10^{-10}$  мм рт. ст. включает три образцовые манометрические лампы, три блока для питания этих ламп, задающих на электродах ламп необходимый режим и измеряющих его, блок управления, электрометрический усилитель для измерения ионных токов и блок питания катушек, создающих продольное магнитное поле в манометрических лампах.

Три манометрические лампы были проградуированы по образцовому компрессионному манометру в пределах  $10^{-3} \div 10^{-5}$  мм рт. ст. и сличены между собой в условиях сверхвысокого вакуума.

Исследование образцового ионизационного манометра ВНИИМ 2-го разряда показало, что средняя квадратичная погрешность измерения в диапазоне  $10^{-3} \div 10^{-10}$  мм рт. ст. лежит в пределах (5—10) % соответственно.

#### Поверочные установки

Вакуумметры, основанные на применении электрических методов, требуют раздельной поверки манометрических преобразователей и измерительных блоков. Преобразователи поверяются на уже описанной аппаратуре.

Для поверки измерительных блоков отечественных ионизационных и термопарных вакуумметров типов ВИТ-1, ВТ-2, ВИ-3 и аналогичных им создан специальный измерительный стенд, позволяющий быстро

проводить все поверочные операции (рис. 4). Этот стенд внедрен в некоторых институтах и государственных контрольных лабораториях Госкомитета и на многих заводах и научно-исследовательских предприятиях страны, связанных с вакуумной техникой.

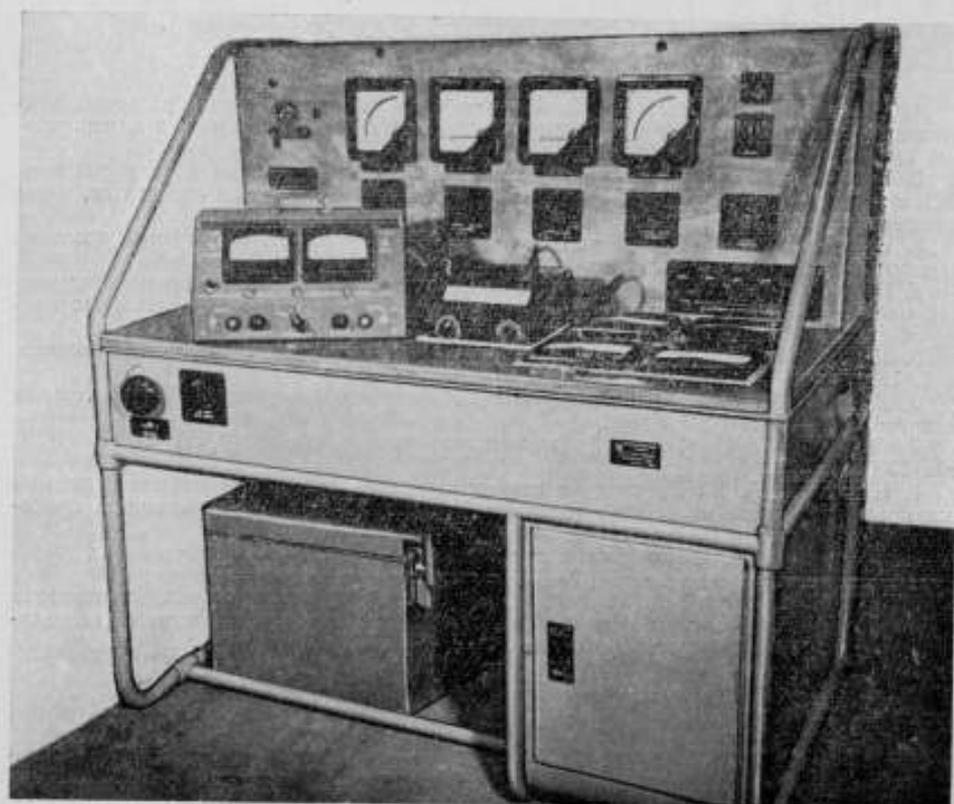


Рис. 4. Общий вид стенда для поверки вакуумметров ВНИИМ.

В настоящее время разработан новый универсальный стенд для поверки ионизационных, термомольных, а также и магнитных вакуумметров типов ВМ-1, ВМБ-2 и ВМБ-3.

Таким образом, созданная аппаратура позволяет измерять абсолютное давление в пределах и с погрешностями, указанными в табл. 2.

Таблица 2

Образцовый манометр ВНИИМ	Разряд	Пределы измерения, мм рт. ст.	Средняя квадратичная погрешность, %
Компресссионный	1	$15 \div 10^{-5}$	0,3—3
Термомолекулярный	1	$10^{-4} \div 10^{-6}$	5—8
Ионизационный	2	$10^{-3} \div 10^{-10}$	5—10

Дальнейшими перспективами развития лаборатории измерения вакуума является изыскание новых абсолютных методов измерения

давлений ниже  $10^{-5}$  мм рт. ст., расширение нижнего предела измерений давлений относительными методами до  $10^{-12}$  мм рт. ст. и ниже, повышение точности измерений, создание новых методов передачи единицы абсолютных давлений от образцовых к рабочим приборам, разработка новых быстрых эффективных методов поверки рабочих приборов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев М. А., Рыжов В. А., Обработка капилляров для образцовых компрессионных манометров, Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 50(110), 1961.
2. Гуляев М. А., Ерюхин А. В., Рыжов В. А., Наборы образцовых компрессионных манометров ВНИИМ, Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 50 (110), 1961.
3. Ерюхин А. В., Измерение давлений ниже  $10^{-3}$  мм рт. ст. ртутным компрессионным манометром, «Измерительная техника», № 6, 1962.
4. Ерюхин А. В., Рыжов В. А., Депрессия ртути в капиллярах компрессионных манометров, Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 66 (126), 1962.
5. Дрига М. И., Вакуумные крутильные микровесы, «Измерительная техника», № 5, 1955.
6. Дрига М. И., Новая конструкция абсолютного манометра, «Измерительная техника», № 4, 1957.
7. Дрига М. И., Тепловой (термомолекулярный) манометр, Труды ВНИИМ, вып. 37 (97), 1959.
8. Ерюхин А. В., Применение ионизационных манометров в качестве образцовых приборов, Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, 66 (126), 1962.
9. Ерюхин А. В., Поверка и градуировка электронных ионизационных манометров, «Измерительная техника», № 10, 1962.
10. Дрига М. И., Ерюхин А. В., Сравнение компрессионных и ионизационных манометров с термомолекулярным манометром, Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 66 (126), 1962.

## ИЗМЕРЕНИЕ ТВЕРДОСТИ

На основе осязательно-мышечных ощущений возникло несколько пар противоположных понятий, таких, например, как «сильный — слабый», «теплый — холодный», «шероховатый — гладкий», «твердый — мягкий» и некоторые другие. Первые две пары понятий уже давно получили строгое научное определение и нашли свое точное количественное выражение в единицах силы и температуры. Сравнительно недавно начались попытки создания методов численной оценки шероховатости поверхностей, понятие же твердости оказалось в исключительном положении, так как до сих пор оно не имеет общепризнанного научного определения и нет какой-либо единой шкалы для измерения этой величины. Для определения твердости предложено около сотни различных приборов, но измеряемые с их помощью величины, которые можно назвать «эмпирическими твердостями», служат только условными характеристиками материала, зависящими не только от его механических свойств, но и от условий измерения.

Если рассмотреть самые известные методы измерения твердости, можно заметить, что они основаны на двух принципах, каждый из которых хорошо согласуется с нашим повседневным опытом и осязательными представлениями. Согласно первому из них, твердость характеризуется в зависимости от образования невсезающей (т. е. пластической) вмятины на поверхности тела, согласно второму — в зависимости от образования царапины.

Заслуживает внимания тот факт, что оба принципа одновременно встречаются уже в работах Реомюра, относящихся к 1722 г.

Наибольшее значение для промышленной технологии в настоящее время приобрели статические методы измерения твердости, основанные на образовании вмятины («отпечатка») на малом участке плоской поверхности тела при осевом нагружении вдавливаемого наконечника стандартной формы, изготовленного из определенного материала и установленного перпендикулярно к испытываемой поверхности (стального шарика в методе Бринеля, алмазной квадратной пирамиды в методе Виккерса, алмазного конуса с закругленной вершиной в методе Роквелла). Имея в виду исключительно эти методы, твердость чисто формально определяют как свойство веществ, находящихся в твердом состоянии, сопротивляться образованию вмятины на небольшом участке их поверхности. Вдавливание наконечника характеризуется величиной

приложенного к наконечнику усилия и размерами образующегося отпечатка. Твердость выражается некоторой функцией усилия вдавливания и размера отпечатка, притом возрастающей для первого аргумента и убывающей для второго. Известно несколько различных предложений для выбора вида этой функции. Чаще всего вычисляют величину некоторого условного среднего напряжения, как это делается в методах Бриелля и Виккерса, но в широко распространенном методе Роквелла ограничиваются указанием некоторой линейной функции деформации.

Измерения твердости начали широко применяться с конца прошлого столетия. Именно в Главной палате мер и весов Д. И. Менделеевым были проведены первые в России работы в этой области.

Уже в 70-х годах прошлого столетия при проведении опытов по изучению упругости газов Д. И. Менделеев заинтересовался движением средней призмы коромысла весов на своей подушке. Он писал: «... особенно интересно было бы изучить влияние так называемого трения, которое можно найти, определив вес коромысла, положение центра его тяжести, длину плеча и наблюдая при данной перегрузке углы наклона. Весьма важно узнать, как изменяется это трение с нагрузкой, материалом призм и т. п. Определение времени окажется, вероятно, при этом полезным для изучения весов».

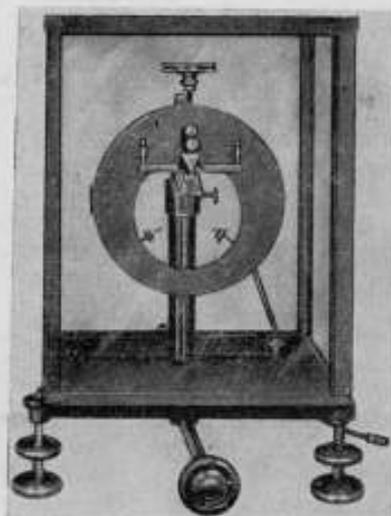


Рис. 1. Склерометрический маятник Д. И. Менделеева.

При восстановлении русских мер Д. И. Менделеев пришел к необходимости опытным путем исследовать колебания весов, и он вернулся к своему старому замыслу изучения влияния пары «призма — подушка». Для первых опытов были использованы однокилограммовые весы Неметца, у которых агатовая подушка с металлической подкладкой вдвигается в особый паз и очень легко может быть заменена. Для ее замены были изготовлены подушки из закаленной инструментальной стали, мягкого вольфрамового железа, латуни, красной меди, бычьего рога, целлулоида и олова. В результате выяснилось, что по мере уменьшения твердости подушки при переходе от агата к каучуку, во-первых, сильно уменьшается чувствительность весов (в 4—5 раз), во-вторых, уменьшается время колебаний (в 2,25 раза) и, в-третьих, увеличивается декремент колебаний (от 1,03 до 1,25).

Полученные данные побудили Д. И. Менделеева сконструировать особый прибор для измерения твердости — так называемой дифференциальный склерометрический маятник с длинным периодом качания. Прибор был изготовлен в двух вариантах — с кольцевым и подковообразным телом. Первый тип прибора представлен на рис. 1. Качающееся тело имеет форму диска диаметром 140 мм, толщиной 4,5 мм с эксцентричным круговым вырезом диаметром 73 мм. В верхней, наиболее широкой части образовавшегося кольца установлена сменная призма. Для перемещения центра тяжести кольца вне его над призмой расположена массивная гайка, а внутри выреза симметрично относительно вертикального диаметра, проходящего через лезвие призмы, установлены под углом  $120^\circ$  два радиальных стержня с резьбой и под-

фрагментов железа, латуни, красной меди, бычьего рога, целлулоида и олова. В результате выяснилось, что по мере уменьшения твердости подушки при переходе от агата к каучуку, во-первых, сильно уменьшается чувствительность весов (в 4—5 раз), во-вторых, уменьшается время колебаний (в 2,25 раза) и, в-третьих, увеличивается декремент колебаний (от 1,03 до 1,25).

Полученные данные побудили Д. И. Менделеева сконструировать особый прибор для измерения твердости — так называемой дифференциальный склерометрический маятник с длинным периодом качания. Прибор был изготовлен в двух вариантах — с кольцевым и подковообразным телом. Первый тип прибора представлен на рис. 1. Качающееся тело имеет форму диска диаметром 140 мм, толщиной 4,5 мм с эксцентричным круговым вырезом диаметром 73 мм. В верхней, наиболее широкой части образовавшегося кольца установлена сменная призма. Для перемещения центра тяжести кольца вне его над призмой расположена массивная гайка, а внутри выреза симметрично относительно вертикального диаметра, проходящего через лезвие призмы, установлены под углом  $120^\circ$  два радиальных стержня с резьбой и под-

вижными гайками. Призма опирается на подушку наверху весовой колонки, заключенной в стеклянный футляр на трех винтовых ножках. Прибор снабжен арретиром и «поддувалом» для раскачивания диска. Повороты углов отсчитываются через боковое стекло футляра с помощью зеркала, укрепленного на боковой стороне диска. Масса диска 529 г.

По поводу своих исследований Д. И. Менделеев писал: «Надо полагать, что примененный прием может дать новый, простой и точный способ для определения некоторых свойств твердых тел... может оказать особые услуги не только для скорого и точного определения твердости, но и в практике при сравнении разных дерев, камней, стекол, глазурей, металлов, их сплавов и т. п., так как времена колебаний... и их декременты можно наблюдать легко и очень скоро. Прибор этот уже находится в работе Главной палаты, и отчеты о наблюдениях явятся во Временнике Палаты».

К сожалению, эти отчеты опубликованы не были и даже описание самих приборов было сделано М. Н. Младенцевым только в 1929 г. — четверть века спустя после смерти Д. И. Менделеева, когда уже стал известен маятниковый прибор Герберта, сконструированный в 1928 г.

В начале текущего столетия твердость стали измерять вдавливанием стального шарика по Бринелю. В 1906 г. при исследовании рельсовой стали в механической лаборатории Института инженеров путей сообщения твердость измеряли не только по Бринелю, но и по методу П. В. Кубасова. Суть этого метода заключается в том, что в плоскую поверхность испытуемого тела вдавливают на заданную глубину, например на 3 мм, стальной, хорошо закаленный конус с углом заострения 90°. Числом твердости считается выраженное в килограммах-силы усилие, необходимое для этого вдавливания.

Метод Кубасова имеет два крупных недостатка: 1) глубина вдавливания с помощью незакрепленной гайки устанавливается недостаточно точно; 2) «твердость по Кубасову» определяется путем постепенного увеличения усилия вдавливания со значительной погрешностью и с большой затратой времени. Принцип вдавливания наконечника на заранее установленную глубину в 1929 г. был применен в приборе «Монотрон» американской фирмы Шора, но также не получил широкого распространения.

Для обеспечения единства измерения твердости в стране ВНИИМ как центральный метрологический институт располагает в настоящее время образцовыми приборами, стоящими во главе поверочной схемы по твердости. В СССР стандартизованы три статических метода измерений твердости вдавливанием: по Бринелю, по Роквелу и по Виккерсу.

Первой была создана образцовая аппаратура для измерения твердости по Бринелю. Приложение нагрузки в ней механизировано.

В 1957 г. под руководством С. А. Смолча был создан образцовый прибор для измерения твердости по Роквелу, имеющий следующие особенности:

- 1) станна обладает большой жесткостью, исключающей появление заметных упругих деформаций при приложении нагрузки;
- 2) части прибора, несущие измерительные устройства, не подвергаются воздействию рабочих нагрузок;
- 3) усилие вдавливания создается наиболее точным методом — непосредственным нагружением наконечника специальными гирями, укладываемыми на поддон;
- 4) наконечник вдаливается автоматически с помощью гидравлического привода;

5) заданный закон вдавливания осуществляется с большой точностью при каждом измерении;

6) кривая зависимости усилия вдавливания от времени может быть по желанию записана самопишущим прибором;

7) отсчетное устройство имеет повышенную чувствительность. На рис. 2 показана принципиальная схема прибора.

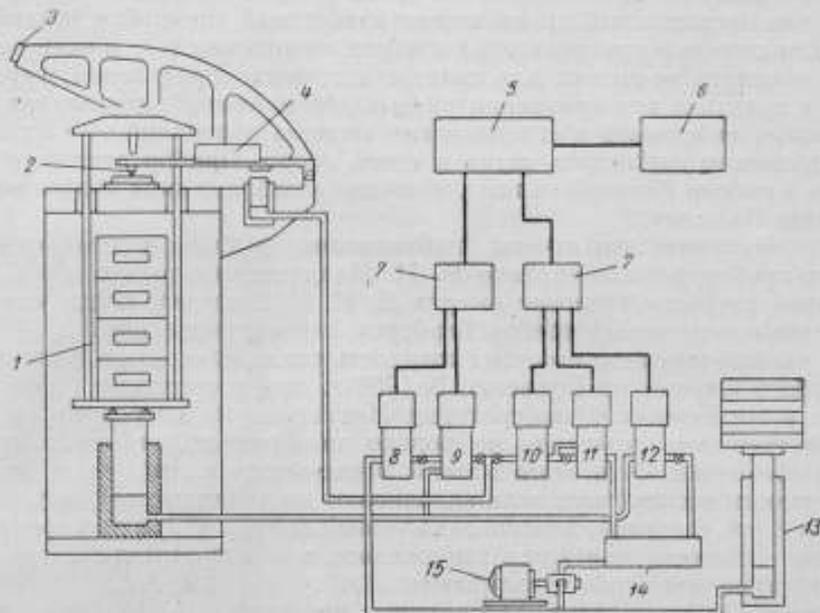


Рис. 2. Схема образцового прибора для измерения твердости по Роквеллу.  
1 — основная нагрузка, 2 — наконечник, 3 — оптическая ось микроскопа, 4 — предварительная нагрузка, 5 — пульт управления, 6 — блок питания, 7 — реле времени, 8—12 — дистрибуторы, 13 — гидроаккумулятор, 14 — сливной бак, 15 — насос.

Наконечник закреплен на коромысле, на конце которого находятся шкала и осветитель. Против шкалы на неподвижном кронштейне установлен отсчетный микроскоп. Перемещение шкалы, измеренное с помощью окулярного микрометра микроскопа, соответствует удвоенному перемещению наконечника. Предварительная нагрузка создается весом коромысла и может быть отрегулирована подвижным грузом. Повороты коромысла, необходимые для вдавливания наконечника и его освобождения, обеспечиваются малым гидравлическим подъемником.

Основная нагрузка создается весом гирь, лежащих на поддоне. Специальное захватывающее приспособление позволяет положить на поддон гири для получения какой-либо одной из трех возможных основных нагрузок: 50, 90, 140 кгс. Поддон подвешен к перекладке, опирающейся штырем на соосное наконечнику гнездо коромысла. Основная нагрузка прикладывается и снимается с помощью большого гидравлического подъемника, расположенного под поддоном.

Органы гидравлического привода и автоматического управления находятся в пульте управления. Давление масла, необходимое для действия подъемников, создается гидроаккумулятором, заряжаемым насосом. Во время измерений масляный насос выключают, чтобы избежать появления нежелательных вибраций. Переключение подачи масла, требуемое для выполнения той или иной операции, производится с помощью

пятиплунжерного дистрибутора. Время выполнения отдельных операций и их последовательность устанавливаются двумя электронными реле времени, а скорость каждой операции регулируется кранами у плунжеров.

При измерении твердости весь процесс нагружения протекает автоматически и управляется реле времени. Обязанности наблюдателя сводятся только к установлению нулевого деления окулярного микрометра и к отсчету по его шкале разности глубины погружения наконечника под действием основной и предварительной нагрузок. Число твердости находят в специальной вспомогательной таблице. Отдельные кнопки на пульте управления позволяют при желании выполнять операции вручную.

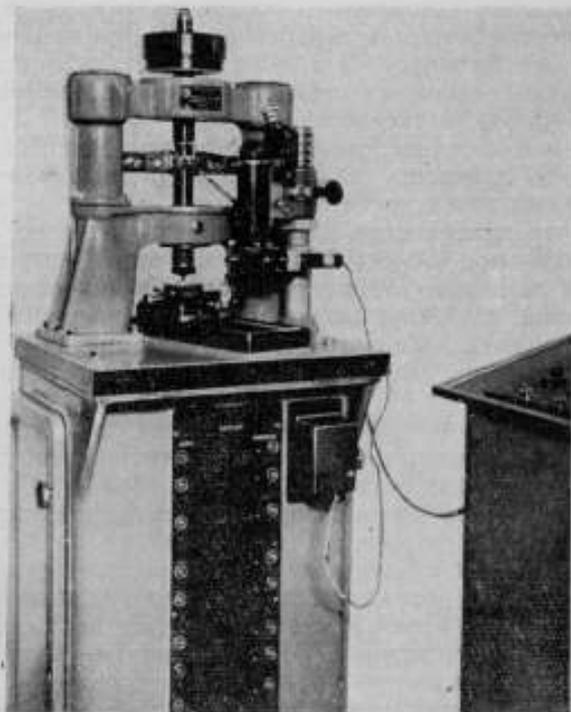


Рис. 3. Общий вид образцового прибора для измерения твердости по Виккерсу.

Средняя квадратичная погрешность измерения твердости не превышает 0,2 единицы Роквелла.

В 1957 г. под руководством Н. П. Славинной был создан образцовый прибор (рис. 3) для измерения твердости по Виккерсу. Особенности конструкции прибора совпадают с указанными ранее для образцового прибора по Роквеллу.

Наконечник закрепляется на нижнем конце шпинделя, который может перемещаться по вертикали в шариковых направляющих. Вес шпинделя с поддоном составляет наименьшую ступень нагружения — 5 кгс. Большие нагрузки (10; 20; 30; 50 и 100 кгс) получают наложением гирь на поддон. Поднимает и опускает грузовой поддон гидравлический подъемник.

Пульт управления (справа на рис. 3) имеет масляный насос, гидроаккумулятор, дистрибуторы и электронные реле времени. Реле времени

автоматически осуществляют опускание наконечника до соприкосновения его с поверхностью образца, приложение нагрузки с необходимой выдержкой времени, снятие нагрузки и подъем наконечника. После окончания этих операций образец вместе со столиком подводится под объектив микроскопа и измеряется длина диагоналей отпечатка. Средняя квадратичная погрешность измерения твердости составляет 0,3%.

Для обеспечения единства измерений твердости необходимы, кроме образцовых приборов, во-первых, проверка формы применяемых наконечников и, во-вторых, изготовление однородных образцовых мер твердости. Рассмотрим, как в настоящее время во ВНИИМ обеспечивается выполнение этих условий.

Проверка формы стальных шариков не представляет принципиальных затруднений, поэтому остановимся только на проверке алмазных наконечников конической и пирамидальной формы для измерения твердости по Роквеллу и по Виккерсу. Эта проверка складывается из внешнего осмотра, измерения основных геометрических параметров и определения показаний на мерах твердости.

При внешнем осмотре выясняется соответствие оправы алмаза техническим условиям, прочность заделки алмаза в оправе и состояние и качество рабочей поверхности алмаза.

Общий осмотр поверхности алмаза производится на стереоскопическом микроскопе при 50-кратном увеличении. Чистота поверхности определяется с помощью интерференционного микроскопа В. П. Ленина. Современное состояние технологии изготовления алмазных наконечников обеспечивает в большинстве случаев среднюю высоту микронеровностей не больше 0,06 мкм (13-й класс чистоты поверхности по ГОСТ 2789—59).

Алмазный конический наконечник Роквелла характеризуется двумя геометрическими параметрами: углом при вершине конуса и радиусом сферического закругления вершины.

Для измерения угла при вершине конуса применяется инструментальный микроскоп с угломерной головкой. Угол измеряется при 120-кратном увеличении в двух взаимно-перпендикулярных осевых сечениях, одно из которых параллельно плоскости лыски на хвостовике оправы наконечника. Угол алмазного конуса должен быть равен  $(120 \pm 0,5)^\circ$ , а разность углов в двух сечениях не должна превышать  $0,25^\circ$ . Правильность сопряжения закругления вершины с поверхностью конуса проверяется визуально одновременно с измерениями угла.

Для измерения радиуса закругления применяется микропроектор с 300-кратным увеличением. Теневое изображение контура наконечника в его осевом сечении проектируется на специальный подвижный экран с нанесенным на нем семейством равноотстоящих дуг окружностей, сопряженных со сторонами углов в  $120^\circ$ . Радиусы дуг соответствуют радиусам закругления вершины, возрастающим от 140 до 260 мкм через каждые 5 мкм. Радиус закругления теневого изображения наконечника определяется совмещением его с одной из линий на экране и измеряется в тех же двух осевых сечениях, в которых измерялись углы раскрытия конуса. Измерение радиусов закругления только в двух сечениях теоретически вполне оправдано, потому что, как известно из теории поверхностей, средняя кривизна поверхности в какой-либо точке, равная полусумме кривизны в двух взаимно-перпендикулярных сечениях, не зависит от выбора этих сечений.

Наконечник Роквелла должен быть такой формы, чтобы в точке пересечения оси конуса с поверхностью закругления нормаль к этой поверхности совпадала с осью. Радиус закругления в каждом из двух сечений

должен быть равен  $(200 \pm 5)$  мкм, а разность радиусов в этих сечениях не должна превышать 10 мкм.

У пирамидальных наконечников Виккерса есть два геометрических параметра: угол между противоположными гранями и длина «перемычки» — ребра на вершине пирамиды.

Углы между противоположными ребрами пирамиды измеряются при 120-кратном увеличении с помощью инструментального микроскопа, имеющего угломерную головку с ценой деления 1'. Среднее арифметическое полученных значений с помощью специальной вспомогательной таблицы переводится в значение угла между противоположными гранями, которое должно быть равно  $(136 \pm 0,5)^\circ$ . Длину «перемычки» оценивают визуально, исходя из увеличения микроскопа. Она не должна превышать 2 мкм. Для более полного и наглядного представления о форме рабочей части алмазных наконечников применяется предложенный А. Ю. Гиделем в 1956 г. способ нанесения на поверхность алмаза «ламинограммы». Сущность его очень проста. При вдавливании наконечника в металл на месте пересечения поверхности алмаза с поверхностью металла наблюдается адгезия частиц мелкодиспергированного металла. Если после вдавливания в металл рассмотреть наконечник в микроскоп, то при наблюдении в темном поле на поверхности алмаза будет видна яркая тонкая замкнутая линия. Если вдавить наконечник несколько раз в плоскую латунную пластинку перпендикулярно ее поверхности, последовательно уменьшая глубину вдавливания на некоторую наперед заданную величину «шага», то в результате получим ламинограмму — семейство кривых, характеризующих форму сечения поверхности алмаза равно отстоящими параллельными плоскостями, проходящими на разных расстояниях от вершины. С геометрической точки зрения ламинограмма представляет собой систему горизонталей, нанесенных параллельно основанию наконечника. В отличие от интерферограммы, которая способна охватить в глубину лишь десятки микрон, ламинограмма характеризует форму всей рабочей части наконечника. При выборе достаточно малого шага ламинограмма дает возможность оценить правильность формы всего наконечника.

Для получения ламинограммы при обычных работах, не требующих особой точности, наконечник вдавливают по очереди на глубину 300, 250, ..., 100, 50 мкм. Фотографирование обеспечивает 64-кратное увеличение.

Поскольку в настоящее время невозможно, исходя только из результатов измерения геометрических параметров наконечника, достаточно точно предсказать его показания, приходится сопоставлять эти показания с показаниями образцового наконечника на одном и том же приборе.

Для наконечников Роквелла такое сопоставление производят на трех образцовых мерах твердости ( $25 \pm 5$ ;  $45 \pm 5$ ;  $65 \pm 5$  единиц HRC). Отклонение среднего арифметического из пяти значений твердости на участке образцовой меры от среднего, найденного с помощью образцового наконечника на том же участке, не должно превышать  $\pm 0,5$  единицы HRC на каждой из трех мер. Для любого поверяемого наконечника в отдельности допускается отклонение только одного знака по всем трем мерам.

Показания наконечников Виккерса сопоставляются с показаниями образцового наконечника на трех образцовых мерах ( $HV = 450 \pm 50$  кгс·мм<sup>-2</sup>), градуированных при нагрузках 5, 30 и 100 кгс при обычной выдержке 10 сек. Отклонения средних арифметических из пяти измерений не должны превышать 1%.

Описанная методика применяется в полном объеме при исследовании образцовых наконечников. При поверке рабочих наконечников ограничиваются внешним осмотром их (без измерения шероховатости поверхности и нанесения ламинограмм), измерением основных геометрических параметров и поверкой сличением с образцовым наконечником на мерах твердости.

Для правильной передачи единиц твердости очень большое значение имеют образцовые меры. А. В. Смирнов занимается комплексом исследований, направленных на повышение однородности мер. Им разработаны требования как к исходному материалу, так и ко всей технологии изготовления. Меры низкой и средней твердости должны изготавливаться из стали типа 45, меры высокой твердости — из стали У9А или У10А. Для закалки мер сконструирована под руководством А. В. Смирнова специальная автоматическая печь, имеющая следующие особенности устройства:

- а) узкое пространство нагрева в металлическом муфеле в целях уменьшения доступа воздуха;
- б) плавную подачу мер, опускающихся из вертикального магазина;
- в) отбраковку непрогретых мер на выходе из муфеля при помощи магнита;
- г) принудительную циркуляцию закалывающего раствора;
- д) охлаждение закалочного бака до постоянной температуры водяной рубашкой;
- е) автоматическое управление и запись теплового режима печи.

В заключение приведем некоторые соображения о направлении дальнейших работ по твердости.

Раскрытие физического смысла любой величины состоит в установлении ее закономерных количественных связей с другими физическими величинами и константами. Отвлекаясь от возможности замены в ближайшем будущем статических методов измерения какими-либо иными принципиально отличными от них методами, а также от связанного с этой заменой радикального изменения самого смысла термина «твердость», следует признать необходимой разработку теории вдавливания применяемых наконечников в изотропное твердое тело.

Из двух возможных путей построения теории вдавливания — микроскопического (атомистического) и макроскопического (феноменологического) — наибольшее значение в настоящее время имеет второй, относящийся к механике твердого тела, которая представлена теорией упругости, теорией пластичности и реологией.

Реология — молодая наука о текучести, созданная в 20-х годах Бингамом, Скотт-Блэром и Рейнером, по отношению к металлам, интересующим нас в первую очередь, пока не дала ничего нового из-за отсутствия удовлетворительной реологической модели металла.

Решение в 1881 г. Генрихом Герцем общей контактной задачи в теории упругости явилось начальным моментом в развитии теории твердости, хотя его попытка установить понятие «абсолютной твердости» оказалась неудачной.

Современная теория пластичности, прибегая к значительной идеализации явлений, пока не может дать математически строгого решения задач о вдавливании применяемых на практике наконечников. Приближенные вычисления, выполненные А. Ю. Ишлинским в 1947 г. для шарика и И. Н. Тылевичем в 1959 г. для конуса с углом  $170^\circ$ , привели к заключению, что при вдавливании указанных наконечников в идеально пластичную неупрочняющуюся среду существует постоянное отношение порядка  $1/3$  между пределом текучести и числом твердости,

вычисляемым как среднее давление на поверхности отпечатка при заданном угле вдавливания и при заданном значении коэффициента трения между наконечником и средой.

Все иные связи между числами твердости металлов и их механическими константами («параметрами кривой одноосного растяжения») являются эмпирическими и устанавливаются статистическим путем для каждой отдельной группы металлов и сплавов.

При вдавливании шарика металл упрочняется и твердость (вычисляемая как среднее давление на поверхности отпечатка) изменяется в зависимости от усилия вдавливания (и от относительного диаметра отпечатка). Правильнее поэтому говорить не о «числе твердости», а о «кривой твердости». Вдавливание шарика при разных нагрузках дает большую информацию о свойствах металла, чем вдавливание конуса или пирамиды, так как твердость по конусу или твердость по пирамиде отвечает лишь одной точке на кривой твердости. Задача нахождения аналитического выражения кривой твердости тесно связана с задачей нахождения аналитического выражения кривой одноосного растяжения.

В ближайшее время в области измерений твердости можно наметить две основные задачи:

- 1) уточнить стандарты для общеупотребительных методов измерений;
- 2) установить связи чисел твердости с механическими константами на основе теоретических и экспериментальных исследований.

ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ, СКОРОСТЕЙ  
И УСКОРЕНИЙ

Работы по измерению перемещений, скоростей и ускорений ведутся уже давно во ВНИИМ. Однако долгое время они носили нерегулярный, несистематический характер, поскольку были рассредоточены в различных лабораториях института.

Первые работы в области измерения ускорения были проведены еще Д. И. Менделеевым. «Одной из целей, имевшихся в виду при самом учреждении Главной палаты, служила потребность в новом определении местного напряжения силы тяжести. . . .» — указывал он.

Известно, что Д. И. Менделеев предусмотрел строительство 38-метровой трубы, которая на 15 м углубляется в землю и предназначена специально для определения ускорения силы тяжести Земли с помощью длинных маятников и набора чечевиц в виде шаров весом в 2 пуда, изготовленных из различных металлов, в том числе и из золота. К сожалению, Менделеев не успел завершить эту работу. Ее продолжил в 1911 г. А. А. Иванов, который получил значение ускорения силы тяжести  $g$  с погрешностью  $\pm 30$  мг.

В 1936—1938 гг. В. Д. Басков и В. И. Старцев показали, что несовершенство линейных измерений длины того времени и невозможность термостатирования трубы, в которой помещался маятник, на всей ее длине ограничивают точность определения значения  $g$  величиной, полученной А. А. Ивановым.

Развитие техники потребовало значительного повышения точности определения силы тяжести, вследствие чего во ВНИИМ группой ученых под руководством П. Н. Агалецкого с 1946 по 1957 г. были успешно выполнены работы по определению значения  $g$  с погрешностью  $\pm 3 \cdot 10^{-5}$  м/сек<sup>2</sup> тремя независимыми методами:

- 1) совмещенного падения,
- 2) свободно падающего в вакуумной камере жезла,
- 3) поворотных дифференциальных кварцевых маятников.

Однако уровень современной техники, развитие ракетной навигации и космических полетов ставят в настоящее время задачу дальнейшего повышения точности значения  $g$ .

В 1930 г. И. В. Юдин начал работы по измерению угловых скоростей, итогом которых явились образцовые установки для проверки тахометров.

Технический прогресс народного хозяйства настоятельно требовал включения метрологии в широкую область измерения параметров движения, к которым относятся линейные и угловые перемещения скорости и ускорения. Особую важность представляли проблемы виброметрии. В связи с этим в конце 40-х годов во ВНИИМ была создана лаборатория скоростей, ускорений и вибраций, которую возглавлял П. Н. Агаецкий. Однако Великая Отечественная война остановила начатые работы, а созданные лабораторией установки были приведены в негодность или уничтожены. Лаборатория возобновила свою работу в 1953 г. под руководством В. Л. Лассана. Перед ней стояли теперь значительно более широкие и сложные задачи.

Бурное развитие техники, появление реактивных самолетов и ракет, повышение скоростей морских судов, угловых скоростей вращения станков и двигателей, задачи, связанные с шумовыми полями, повышение к. п. д. агрегатов определяли следующие основные проблемы, которыми должна заниматься лаборатория:

- 1) расширение диапазонов и повышение точности измерения угловых скоростей;
- 2) измерение параметров вибраций как линейных, так и угловых;
- 3) измерение ударных ускорений.

Главной задачей лаборатории была разработка образцовой аппаратуры и установок, основанных на абсолютных методах измерений, так как только применение абсолютных методов для создания высших метрологических звеньев обеспечивает единство измерения.

#### Измерения угловых скоростей

К 1953 г. ВНИИМ располагал образцовой тахометрической установкой с пределами измерений 30—30 000 об/мин с погрешностью 0,1%. Фактически предельная угловая скорость данной установки была

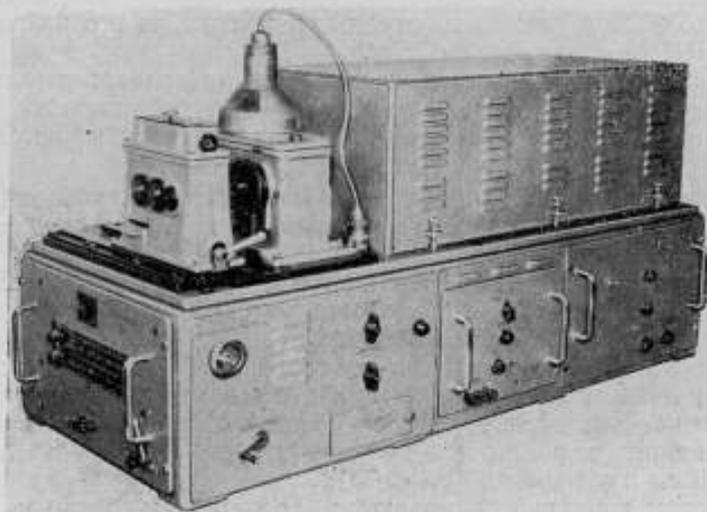


Рис. 1. Образцовая тахометрическая установка типа ОТХЗ-150.

10 000 об/мин, так как высокоскоростной шпиндель после минуты работы сильно нагревался. Появилась необходимость усовершенствовать установку, расширить ее пределы измерений и повысить их точность.

Результаты исследований, выполненных лабораторией, позволили создать в 1953 г. две образцовые тахометрические установки ТХ1-60 и ОТХ2-60 с пределами измерений 5—60 000 об/мин с погрешностью 0,01 и 0,1%. В обеих установках скорости вращения измеряются абсолютными методами: стробоскопическим и синхронизации. При этом значение угловой скорости зависит и определяется непосредственно частотой пьезокварцевого генератора, поверенного по эталону частоты и времени ВНИИМ. Установки ТХ1-60 и ОТХ2-60 были удостоены в 1961 г. малой золотой медали ВДНХ.

Дальнейшие изыскания лаборатории привели к созданию новой образцовой универсальной тахометрической установки типа ОТХ3-150 с верхним пределом измерения в 150 000 об/мин и погрешностью 0,01% (рис. 1), которая позволяет поверять и испытывать почти все существующие типы тахометров.

В настоящее время в лаборатории создается установка для испытаний на центробежную прочность различных деталей при скоростях вращения до 160 000 об/мин и, кроме того, аппаратура для измерения стабильности вращения в диапазоне угловых скоростей 300—3000 об/мин.

### Работы в области измерения параметров вибраций

Современная техника нуждается в измерении параметров вибраций в диапазоне частот 0,1—50 000 гц и виброускорений в пределах ( $10^{-6} \div 20\,000$ )g. В стране имеется большое количество отечественной и иностранной виброизмерительной аппаратуры, которая еще не прошла массовой государственной поверки. Из-за этого наблюдается значительный разброс в показаниях приборов. Их градуировка не соответствует установленным единицам измерения, а технические характеристики — их фактическим данным. Примером может служить случай, когда пьезодатчик, предназначенный для измерения ускорений по техническому паспорту до 2000 g, вышел из строя при испытании его на виброустановках ВНИИМ с ускорением 75 g.

Перед лабораторией также стояла сложная задача: создать набор образцовых установок, предназначенных для градуировки, поверки и испытания виброаппаратуры в указанных диапазонах частот и ускорений.

Естественно, что нельзя создать одну установку, которая охватывала бы весь диапазон частот и ускорений. Поэтому приходится разрабатывать набор вибрационных установок, каждая из которых работает в сравнительно узком диапазоне частот и ускорений. Последовательность выбора их для каждой создаваемой установки обусловлена запросами народного хозяйства.

В настоящее время сотрудник лаборатории В. С. Шкальников разработал ряд действующих образцовых виброизмерительных установок, с помощью которых можно создать в зависимости от частоты механические колебания правильной синусоидальной формы в диапазоне  $10 \div 10\,000$  гц и ускорений ( $0,1 \div 75$ )g.

Параметры вибраций измеряются абсолютным методом, амплитуды — оптическими, а частоты — путем сличения с эталонной частотой ВНИИМ. Максимальные, или эффектны, значения вибрационных скоростей и ускорений получают расчетным путем с помощью дифференцирования уравнения движения виброплатформы, совершаемого по закону синусоиды. Поэтому легко видеть необходимость воспроизведения установками колебаний, следующих закону синуса, так как чем

больше их отклонения от синусоидальной формы, тем, естественно, больше и погрешности измерений.

Другим необходимым свойством образцовых установок является однонаправленность создаваемых вибраций. Соблюдение этого условия позволяет всесторонне испытывать различные виброизмерители.

Как уже указывалось, только лишь абсолютные методы измерений могут обеспечить единство измерений в данной области, но они весьма трудоемки и требуют наблюдателей высокой квалификации. Поэтому в настоящее время ограничиваются относительными методами измерений, т. е. сравнением показаний образцового и поверяемого датчиков. При этом не следует забывать, что образцовый датчик должен быть обязательно поверен абсолютным методом, а кривая колебаний должна иметь определенную форму, при которой можно надежно обрабатывать результаты сличений.

Необходимо отметить, что относительные методы измерения можно применять лишь при наличии образцовой аппаратуры, проградуированной и поверенной абсолютным методом, а также при условии, что вибростенд, на котором расположен образцовый поверяемый датчик, обеспечивает вибрации правильной синусоидальной формы.

В лаборатории была выполнена также сложная работа по обеспечению необходимых условий для проведения вибрационных измерений. Оказалось, что при работе мощных вибрационных стендов могут возникнуть неблагоприятные условия для точных измерений в других лабораториях института. Кроме того, сами точные виброизмерения невозможны при наличии помех от работающих в соседних помещениях моторов, а также от транспорта и пр. В связи с этим был создан особый виброгасящий фундамент, на котором располагаются образцовые виброустановки ВНИИМ. Этот фундамент общим весом 28 т подвешен на пружинах и имеет собственную частоту колебаний, приблизительно равную 1,2 гц.

В настоящее время в лаборатории ведутся работы по созданию вибростендов в диапазоне ультразвуковых частот 10—50 кгц и инфразвуковых в пределах 0,1—10 гц.

В дальнейшем должен быть значительно расширен диапазон создаваемых и измеряемых ускорений.

### Измерение ударных ускорений

Испытания различных промышленных изделий, установок, приборов и материалов на ударные ускорения позволяют оценить длительность и надежность их работы. Основная измеряемая величина здесь — возникающее при ударе ускорение, определяемое акселерометрами различных типов.

Проверка данных акселерометров производится с помощью разработанных и изготовленных двух установок, создающих и измеряющих ударные ускорения.

Первая установка создает ударные ускорения в пределах  $(2 \div 40)g$  и измеряет их максимальные значения с погрешностью 3%, которая для данного вида измерений может считаться достаточно малой. Возникающие при ударе ускорения измеряют путем дифференцирования осциллограммы изменения скорости движения в момент удара каретки, несущей поверяемый акселерометр.

Вторая установка (рис. 2), разработанная А. И. Марциняком, создает ударные ускорения в пределах  $(10 \div 250)g$  с погрешностью около 2%.

Поверяемый акселерометр крепится на площадке, подвешенной на пружине. К нижней части площадки на стальной проволоке крепится груз, создающий силу, растягивающую пружину.

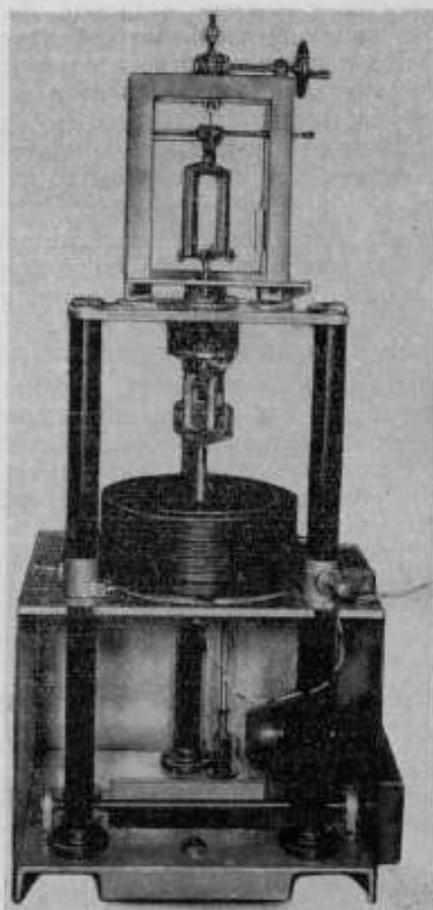


Рис. 2. Образцовая установка, воспроизводящая ударные ускорения в пределах  $(10 \div 250)g$ .

Если рассечь проволоку, то сила, равная весу отсеченного груза, будет воздействовать на площадку с акселерометром и сообщит им ускорение, равное частному от деления веса всего груза на массу площадки и акселерометра. Сейчас лаборатория разрабатывает установки для создания ударных ускорений до  $1000g$  и угловых до  $500 \text{ рад/сек}^2$  при частотах  $0,1 \div 5 \text{ гц}$ . Кроме того, проводятся работы по дальнейшему расширению пределов измерения параметров угловых (торсионных) колебаний.

### ТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ

В работах Д. И. Менделеева первое упоминание о значении точных измерений вибраций относится к 1904 г. Обнаружив неудовлетворительную точность записи колебаний на закопченной пластинке Мареевского хронографа, он сформулировал четкое требование к измерению основных параметров вибрации, указав, что необходимо:

«... достичь такой постановки опытов, чтобы можно было точным образом считать число колебаний и измерить величину амплитуды».

В более ранних работах Д. И. Менделеева мы уже видим бескомпромиссное требование к защите точных приборов от внешних сотрясений. Фундамент, на котором установлены весы в лаборатории мер массы, был тщательно исследован с помощью оригинального устройства, позволившего по характеру колебаний ртути оценить амплитуду колебаний рабочей поверхности устоя.

Следует заметить, что вопрос об антивибрационных защитах имеет первостепенное значение при точных метрологических исследованиях, так как все измерительные устройства требуют защиты от воздействия тряски, неизбежной даже в условиях расположения лаборатории вне черты города. Однако в настоящее время метрологические лаборатории не имеют надежных виброгасящих фундаментов и в этой части мы далеки от выполнения требований Менделеева об исключении внешних помех при измерениях высокой точности.

Лаборатория вибраций в своих работах в малой мере осуществила ценные указания великого творца отечественной метрологии Д. И. Менделеева: были лишь разработаны и изготовлены образцовые вибрационные установки и виброгасящий фундамент. Технические характеристики вибрационных установок ВНИИМ даны в табл. 1.

В основу разработки первичных образцовых вибрационных установок положены абсолютные методы измерений.

Установки представляют устройства как для воспроизведения механических колебаний, так и для измерения параметров, главными из которых являются амплитуды и частоты.

Пределы измерений и допустимые погрешности этих установок были определены в результате изучения современных задач виброметрии, анализа параметров существующих приборов для измерения вибраций,

Таблица 1

Тип установки . . . . .	BC300—П	B150	B1000	B50
Диапазон частот, гц . . . . .	50—10 000	500—2000	300—1000	10—50
Размах $2S$ , мкм . . . . .	1—1000	1—500	0,05—5 0,10—10 0,20—20	1—1500
Допустимые ускорения, g . . . . .	25	75	20	7,5
Грузоподъемность, кг . . . . .	5	5	0,5	75
Бсковые составляющие, % . . . . .	1	1	0,5	1
Коэффициент нелинейных искажений, % . . . . .	3	3	0,2	5
Направление колебаний . . . . .	0—90°	0—360°	Вертикаль- ное	Вертикаль- ное

а также с учетом перспектив развития этой области знаний. Такой анализ привел к следующему заключению:

1) диапазон частот, имеющих прикладной интерес, составляет  $1 \cdot 10^{-3} \div 1 \cdot 10^5$  гц, чисто промышленные частоты лежат в пределах  $0,5 \div 20\,000$  гц;

2) пределы измерения ускорений находятся в диапазоне от  $1 \cdot 10^{-6}$  g до ускорений, при которых можно ожидать молекулярного распада, что соответствует, по-видимому,  $1 \cdot 10^6$  g. Для этих чрезвычайно широких пределов измерений имеется измерительная аппаратура различных типов: от классической массы — пружины, далее приборов, основанных на пьезоэлектрическом эффекте, и до приборов, основанных на эффектах возбуждения и генерации излучения в твердых телах (лазеров).

Решение проблем единства вибрационных измерений одновременно для всех указанных пределов не представлялось возможным. Поэтому для создаваемой образцовой аппаратуры были выбраны пределы измерений, соответствующие  $0,1 \div 50\,000$  гц, и ускорения  $1 \cdot 10^{-6} \div 10^3$  g, в которых в настоящее время ведется наибольшее число исследований и натуральных испытаний. Но и эти пределы не дают возможности ограничиться единственной универсальной установкой и поэтому пришлось разработать и создать набор из шести установок, характеризуемый следующими данными:

частоты . . . . .	$0,1 \div 50\,000$ гц
амплитуды . . . . .	$5 \cdot 10^5 \div 1 \cdot 10^{-3}$ мкм
допустимые погрешности измерения:	
амплитуд . . . . .	$0,1 \div 10\%$
частот . . . . .	$1 \cdot 10^{-5} \div 3\%$

Число виброплатформ, входящих в набор образцовой установки, определяется весом поверяемых приборов, допустимой погрешностью измерения амплитуды и значением ее при заданной частоте.

При разработке виброплатформ образцовых установок с одной степенью свободы стремились создать колебательные движения, близкие к синусоидальным.

В настоящее время в зависимости от методов создания вибраций можно ограничиться приведенными ниже значениями коэффициентов нелинейных искажений виброплатформ:

механических . . . . .	5%
электродинамических . . . . .	1—3%
пьезоэлектрических . . . . .	0,1—1%

Эти пределы обусловлены прежде всего требованиями высокой точности измерения и, кроме того, необходимостью исключить влияния поперечных составляющих на показания различных виброизмерительных устройств. Соответствующие расчеты показали, что в зависимости от точности измерения для создаваемых установок ориентировочные значения влияния боковых составляющих не должны превышать, во всяком случае, 1—0,1%. Кроме того, при создании образцовых вибрационных установок необходимо исключить влияние колебаний грунта. Защитными для этой цели устройствами служат виброгасящие фундаменты, частота собственных колебаний которых находится вне пределов как частот, на которых производятся измерения, так и частот, являющихся помехами для других измерений.

Влияние колебаний грунта можно устранить двумя путями: 1) большой массой фундамента и 2) относительно небольшой, но укрепленной на амортизационных пружинах массой его. В табл. 2 даны характеристики двух типов фундаментов, построенных во ВНИИМ.

Таблица 2

Фундамент	Масса, кг	Частота собственных колебаний, гц	Амплитуды колебаний, мм	Год изготовления
Устой . . . . .	$1 \cdot 10^6$	5	6	1879
Виброгасящий фундамент . . .	$2,8 \cdot 10^4$	1,2	0,05	1956

Из таблицы видно, что устой весом 1000 т, на котором установлены метрологические весы, испытывает от воздействия внешних возмущающих сил колебания с амплитудой до 6 мм. Виброгасящий фундамент на пружинах-амортизаторах имеет массу в 30 раз меньше массы устоя, защитные же свойства его лучше более чем на два порядка. Наибольшая амплитуда колебаний устоя в дневное время не превышает 6 мм при собственной частоте 5 гц, т. е. находится в диапазоне частот, при которых работают двигатели транспорта и промышленного оборудования, создающие резонансные колебания системы. Собственная частота виброгасящего фундамента 1,2 гц, т. е. значительно ниже наименьшей рабочей частоты как вибрационных установок, так и внешних помех.

Образцовая вибрационная установка предназначена как для воспроизведения механических колебаний, так и для измерения их параметров: частоты, амплитуд смещения, скорости и ускорения, а также для проверки и градуировки на ней виброметров и акселерометров. Она является совокупностью устройства, воспроизводящего колебания, и измерительных приборов, объединенных в одно целое общей схемой.

## Измерение частоты

Частота колебаний может быть измерена на всех установках по шкале звукового генератора с погрешностью  $\pm 2\%$ . Для ряда работ такая точность достаточна. Более точно частота колебаний платформы измеряется сравнением ее с частотой, генерируемой измерителем типа УЧ-2; при этом погрешность любого значения в диапазоне  $16 \div 50\,000$  гц не превышает  $\pm 3 \cdot 10^{-2}\%$ .

Еще более точно частота колебаний платформы измеряется методом сравнения частот звукового генератора с частотой 1000 и 10 000 гц образцовых генераторов лаборатории времени ВНИИМ. При этом погрешность измерения дискретных значений частоты не превышает  $\pm 1 \cdot 10^{-5}\%$ .

## Измерение амплитуды

Для измерения амплитуды колебаний виброплатформы применяются оптические устройства с микроскопом и интерферометром. Линейное перемещение или размах колебаний измеряется микроскопом типа МПВ-1 с окулярным винтовым микрометром, поверенным по образцовым шкалам. В диапазоне частот  $10 \div 300$  гц и при амплитудах смещения  $10 \div 1000$  мкм погрешность измерений составляет  $\pm 1$  мкм, т. е.  $0,1 \div 10\%$  в относительных величинах. В диапазоне частот  $300 \div 10\,000$  гц амплитуды смещения рабочего стола вибростендов равны  $0,1 \div 10$  мкм, в диапазоне  $10 \div 50$  кГц не превышают 0,1 мкм.

Таблица 3

Наименование интерференционных методов и их краткая физическая сущность	Пределы измерения, мкм
Метод сравнения амплитуд колебаний с длиной световой волны монохроматического света наблюдением максимумов освещенности интерференционной картины Способ Г. Остерберга	0,104—0,802
Модуляционный метод в оптической интерференции, позволяющий измерять разность хода лучей с помощью резонансного фильтра, настроенного на частоту модуляции. Постоянная слабая фототока подается на электронизмерительный прибор Способ Т. С. Горелика	0,001—1,50
Многочувствительный метод, основанный на наблюдении периодических максимумов и минимумов семейства интерференционной картины Способ С. Таланского, Б. Бадслей	0,0005—1,04
Измерение вибраций посредством интерферометра типа „Физо“, использующего импульсы лампы „Сенто“ монохроматического света с регулированием фазы Способ Е. Смита, С. Эдельмана, Е. Джонса, В. Шмидта	0,0005—0,08
Стробоинтерференционный метод измерения амплитуд колебаний в длинах световых волн источника света. Основан на измерении размаха черной ахроматической полосы вследствие интерференции двух лучей Способ ВНИИМ	0,05—5,00 0,10—10,00 0,20—20,00

Для того чтобы погрешность измерения указанных амплитуд находилась в пределах  $0,1 \div 10\%$ , необходимо повысить точность измерения на порядок, что требует применения других методов измерения, в частности, интерференционного.

В табл. 3 приведены основанные на литературных источниках данные, характеризующие разрешающую способность и погрешности измерения. Эти данные позволяют разделить на две группы интерференционные устройства, предназначенные для измерения амплитуд смещения. К первой группе относятся устройства, служащие для измерения весьма малых амплитуд смещения и применяемые для изучения колебаний пьезокристаллов, главным образом в ультразвуковом диапазоне частот, ко второй — устройства для измерения амплитуд смещения на пьезоэлектрических вибрационных установках от долей световой волны до  $3\lambda$ , т. е. в звуковом диапазоне частот.

Электродинамические вибростенды имеют более широкий диапазон амплитуд смещений  $0,1 \div 10$  мкм. Для этих установок во ВНИИМ разработано стробоинтерференционное устройство, измеряющее амплитуды колебания.

На установке ВНИИМ можно измерять амплитуды смещения также и методом счета исчезновений интерференционной картины.

На вибростендах вследствие высокой стабильности и синусоидальности колебаний платформ при коэффициенте нелинейных искажений  $0,2\%$  интерференционное устройство позволяет наблюдать десять исчезновений интерференционной картины. Это расширяет диапазон измерения амплитуд методом Г. Остерберга до  $1,3$  мкм и в диапазоне  $0,1 \div 1,3$  мкм позволяет сличать их с результатами, полученными стробоинтерференционным методом, а также дает возможность исключить промахи при измерениях методом Г. Остерберга в момент включения сигнала в подвижную систему. Расчет оценки погрешности измерений амплитуды приведен в табл. 4.

Таблица 4

Размах $2A$ , мкм	Число полос, $k$	$\frac{\sigma_k}{k^2} \cdot 10^4$	Число штрихов шкалы, $n$	Цена деления шкалы, мкм/дел	Относительная погрешность, %
0,05—5,0	8	9,8	54,6	0,05	0,031
0,10—10,0	12	4,4	33,5	0,10	0,021
0,20—20,0	16	2,3	22,3	0,20	0,014

В первом столбце указаны пределы измерения размаха колебаний, в последнем — среднее относительное квадратичное отклонение измеряемой амплитуды смещения. Если цена деления  $0,2$  мкм/дел, измерение размаха может быть обеспечено с относительной погрешностью  $\delta = 0,014$ , которая не превышает  $0,031$  при цене деления  $0,05$  мкм/дел.

Из табл. 4 видно, что шкалу прибора следует градуировать при больших значениях  $k$  и  $n$ . Однако опыт показал, что при большем  $k$  крайние полосы нечетки и это затрудняет их совмещение со штрихом шкалы. Данные таблицы рассчитаны для погрешности наведения  $0,25$  полосы, в то же время в отдельных случаях ее можно уменьшить до  $0,1$  полосы.

Анализ стробоинтерференционного метода измерения амплитуд смещения показал, что наибольшую часть суммарной погрешности составляет погрешность наведения в определенной точке шкалы черной хро-

матической полосы. Четкость очертания ее различна и зависит от источника освещения. Градуировка шкалы производится при использовании лампы накаливания и фильтра.

Для сравнения результатов измерений амплитуды смещения стробоинтерференционным методом и методом исчезновения интерференционной картины амплитудная характеристика снимается в зоне резонансной частоты подвижной системы, в диапазоне амплитуд  $2S = 0,1-2,7$  мкм.

Кроме того, этими методами возможно измерить амплитуды смещения и менее 0,1 мкм: методом исчезновения при  $1/4$  перекрытия интерференционной картины можно измерить амплитуды 0,026 мкм, стробоинтерференционным методом — 0,025 мкм.

Амплитудная характеристика датчика вибрационной установки практически линейна и оба метода измерения амплитуд до  $2S = 2,7$  мкм обеспечивают одинаковую точность.

### Измерение скоростей и ускорений косвенными методами

Амплитуду ускорения и скорости колебаний вибрационной установки можно измерять, используя прямые методы измерений амплитуды и частоты механических колебаний и вычисляя значение интересующих величин по общеизвестным формулам. Однако при массовых поверках виброметров и акселерометров применение метода прямых измерений оказывается трудоемким, поэтому применяется метод непосредственного сличения показаний поверяемого прибора с образцовым.

В качестве образцового прибора используют пьезодатчик, встроенный в колебательную систему вибрационной установки, сигнал его измеряют ламповым вольтметром, который периодически поверяют. Измеряемую величину при этом определяют косвенным методом на основании данных прямых измерений амплитуды и частоты, произведенных с высокой точностью. Чувствительным элементом измерителя скорости и на высоких частотах — измерителя амплитуды смещения является катушка, помещенная в магнитное поле постоянного магнита.

Для измерения ускорений в установках применяются хорошо изученные пьезодатчики. Датчики из титаната бария имеют более низкую электрическую добротность и худшую термостойкость, чем из кварца. При одинаковых геометрических размерах и значениях входной емкости чувствительности измерителей вибраций из кварца и титаната бария будут отличаться в два раза.

Керамика ЦТС-19 имеет температуру Кюри  $300^\circ\text{C}$ , что позволяет припаивать пластинки к подвижной системе и массе датчика, обеспечивая этим надежную работу его без дополнительных крепежных устройств различной жесткости, значительно снижающих собственную частоту датчика.

Если не вносить поправки и погрешность датчика ограничить 1%, а линейную характеристику датчик имеет только до 1000 гц, то в диапазоне 500 — 2000 гц необходимо применять датчик с собственной частотой не менее 20 000 гц. Чтобы расширить пределы измерения до 10 000 гц, необходим датчик с резонансной частотой не ниже 45 кгц, при этом погрешность измерений возрастет в 6 раз и достигнет 6,5%.

Разработанные и созданные во ВНИИМ вибрационные установки основаны на различных принципах возбуждения механических колебаний: вибрационные платформы типов В10, ВС300-П, В150, В1000 работают на электродинамическом принципе, В50 — на механическом и В50К — на пьезоэлектрическом.

### Вибрационные платформы типов В10, ВС300-П и В150

Внешний вид вибрационных платформ типов ВС300-П и В150 показан на рис. 1 и 2. В вибрационных установках колебания платформы вызывают взаимодействия двух электромагнитных полей, что позволяет получить диапазон частот  $0,1 \div 10\,000$  гц при нагрузках  $0,1 \div 5$  кг.

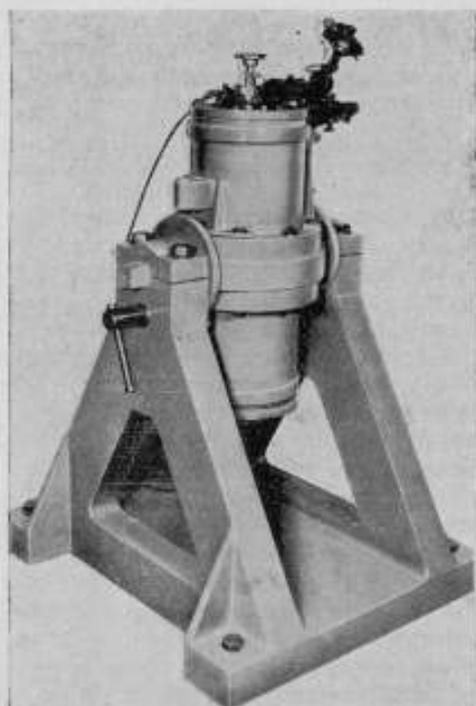


Рис. 1. Внешний вид вибрационной платформы типа ВС300-П.

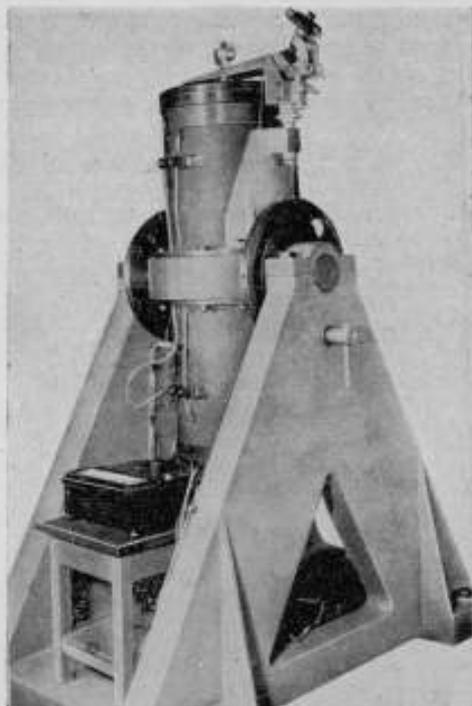


Рис. 2. Внешний вид вибрационной платформы типа В150.

Виброплатформы типов В10, ВС300-П и В150 с двумя подвижными катушками, размещенными друг от друга на расстоянии  $0,6 \div 1$  м, связаны между собой жестким стержнем и подвешены на плоских пружинах. Катушки находятся в поле электромагнитов постоянного тока. Платформа типа В10, кроме того, имеет обмотку для магнитной подвески колебательной системы с заданной жесткостью. Магнитная цепь вибратора состоит из двух магнитопроводов. Для уменьшения входного сопротивления подвижных катушек с ростом частоты у виброплатформ типов ВС300-П и В150 омеднены керны и фланцы. У виброплатформ типов ВС300-П и В1000 ширина полюсного наконечника больше длины рабочей части катушки и при малых амплитудах колебаний обмотки подвижных катушек не попадают в области полей рассеивания, чем уменьшаются нелинейные искажения системы. Разнесенные подвижные катушки и относительно малый зазор между полюсными наконечниками позволяют значительно уменьшить боковые составляющие колебаний.

Виброплатформа создает колебания, амплитуды которых, зависящие от нагрузки, обратно пропорциональны частоте. Плавное изменение амплитуды колебаний нарушается резкими увеличениями при определенных значениях частот, соответствующих резонансу отдельных час-

тей колебательной системы переходников и средств крепления. В пределах  $1000 \div 10\,000$  гц вибрационные установки создают колебания лишь при определенных дискретных значениях частот, подаваемых на катушки. Эти частоты соответствуют основной и дополнительным кратным частотам собственных колебаний стержня.

При некоторых частотах наблюдается резкое уменьшение амплитуды колебаний платформы, что объясняется распространением упругих волн в противофазе вдоль стержня (соединяющего катушки). В этих случаях для увеличения амплитуд колебаний изменяют направление тока в одной из катушек. Практически на этих частотах производится исследование амплитудной характеристики и вибропрочности акселерометров.

### Вибрационная платформа типа В1000

Виброплатформа типа В1000 (рис. 3) предназначена для интерференционных измерений амплитуд смещения. Чтобы амплитуда колебаний платформы была стабильна, упругий элемент и подвижная катушка изготовлены из одной заготовки.

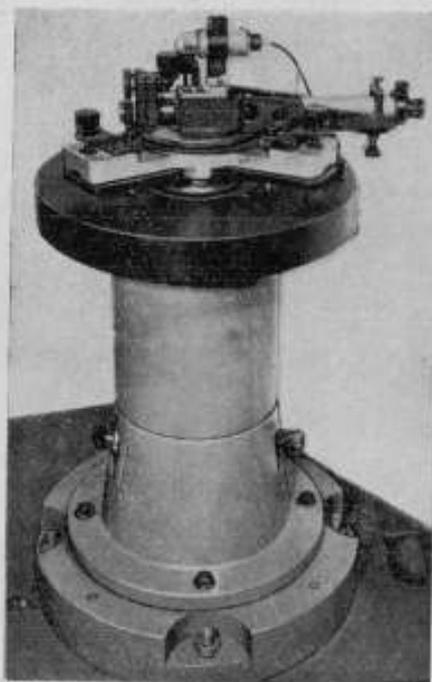


Рис. 3. Внешний вид вибрационной платформы типа В1000.

Упругий элемент представляет собой трубчатый стержень, испытывающий знакопеременную нагрузку растяжение — сжатие. Размеры стержня выбраны таким образом, чтобы создаваемое напряжение было значительно ниже предела пропорциональности при максимальной амплитуде. Отношение толщины трубки к ее диаметру, так же как и отношение диаметра к длине рабочей части трубки, составляет 0,1. Динамические характеристики такого упругого элемента в условиях знакопеременной нагрузки мало отличаются от характеристик идеальной пружины.

В основание магнитопровода жестко крепится хвостовик колебательной системы. Частота собственных колебаний ее в зависимости от конструкции и материала подвижной системы обычно лежит в пределах  $600 \div 1000$  гц.

### Механическая вибрационная платформа типа В50

Эта виброплатформа построена на принципе масса — пружина. В качестве вибратора применена система с эксцентриками в виде двух барабанов, имеющих расположенные по окружности отверстия. В отверстия симметрично вставляются валки различного веса, чем изменяется величина кинетического момента, а следовательно, и возмущающая сила. Симметричное распределение масс обеспечивает соблюдение допусков на статическую и динамическую балансировку.

Динамическая уравновешенность вибратора проверялась вращением как незаполненных, так и заполненных валками барабанов, с угловой скоростью  $314$  рад/сек. Если амплитуда колебания платформы не пре-

вышла 1 мкм, то это служило указанием на достаточную динамическую уравновешенность вибратора и всей колебательной системы. Если при колебании платформы  $2S = 1000$  мкм горизонтальная составляющая колебаний не превышала 1%, то это также свидетельствовало о динамической уравновешенности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Менделеев Д. И., Временник Главной палаты мер и весов, ч. 7, 1905.
2. Долинский Е. Ф., «Измерительная техника», 3, 1958, стр. 22.
3. Шкалик В. С., Вибрационный фундамент для точных измерений, Труды БНИИМ, вып. 37 (97), 1959.
4. Шкалик В. С., Стенды для поверки виброизмерительной аппаратуры, Сб. «Вибростенды», под ред. А. Н. Бурато, ЛДНГТ, 1960.
5. Шкалик В. С., Образцовая виброустановка, Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 50 (100), 1961.
6. Шкалик В. С., Образцовая установка для создания и измерения вибраций в диапазоне частот 10—50 гц, Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 50 (100), 1961.

## РАЗВИТИЕ РАБОТ ПО ИЗМЕРЕНИЮ МАССЫ

Измерение массы является наиболее распространенным видом измерения в науке, технике, народном хозяйстве.

Еще в 1893—1898 гг. в Главной палате мер и весов по инициативе Д. И. Менделеева были выполнены метрологические работы по измерению массы и по возобновлению прототипа основной русской меры — фунта. Кроме того, были проведены на высоком метрологическом уровне сличения русских прототипов фунта с национальным прототипом — килограммом № 12 и установлено точное соотношение между ними.

Для проведения сличений необходимо было оснастить лабораторию измерения массы, созданную в 1874 г. В. С. Глуховым, современным оборудованием, а также уточнить теорию точных весов и разработать методику сличений эталонов.

Все эти работы были блестяще осуществлены под руководством и при непосредственном участии Д. И. Менделеева его учениками и соратниками: А. Н. Доброхотовым, В. Д. Сапожниковым, Ф. П. Завадским, Ф. И. Блумбахом.

Результаты исследований по измерению массы Д. И. Менделеев обобщил в книге «Опытное исследование колебания весов и возобновление прототипа или основной образцовой русской меры массы в 1893—1898 годах», которая и поныне является настольной книгой для специалистов в области измерения массы. Многие положения, высказанные в ней, не устарели, и в настоящее время она продолжает служить образцом постановки и решения метрологических задач в области измерения массы.

Д. И. Менделеев предложил также новый метод точного взвешивания при постоянной нагрузке, т. е. идею создания одноплечих весов. В 1932—1933 гг. одноплечие весы создал И. Д. Менделеев — сын Д. И. Менделеева. В настоящее время эти весы нашли всеобщее признание. По существу, все аналитическое весостроение как в СССР, так и за рубежом перешло от двухплечих весов к одноплечим.

Д. И. Менделеев создал также все материально-технические предпосылки для проведения метрической реформы. Однако в СССР метрическую систему начали применять лишь с 1918 г. Работы по созданию эталонов массы в этой системе и по дальнейшему усовершенствованию теории весов и методов точного взвешивания проводили ученики Д. И. Менделеева и его последователи: А. Н. Доброхотов, Л. А. Богуславская, В. А. Мюллер, С. Д. Гидаспов, Н. М. Рудо, Г. Д. Кокош.

Требования к точности измерения массы непрерывно растут, особенно они повысились в послевоенные годы в связи с развитием химии и точных физических исследований, связанных с атомной техникой.

Основной эталон массы СССР по точности ( $2 \cdot 10^{-9}$ ) и стабильности обеспечивает современные требования, предъявляемые к точности измерения ее. Однако рабочие эталоны и методика передачи единицы массы рабочим и образцовым гилям, существовавшие до 1956 г., при измерении не давали необходимой точности.

Поскольку требования к точности измерения массы в науке и технике повысились, изменились также требования, предъявляемые к рабочим, образцовым гилям и рабочим эталонам массы. Поэтому в 1955—1956 гг. были начаты исследования по реорганизации эталонов единицы массы, которые проводились параллельно в области рабочих, образцовых и эталонных мер.

В области рабочих мер массы уже создан новый ГОСТ на гири, который в настоящее время внедряется в практику.

Новый ГОСТ 7328—61 «Гири», вводимый с 1963—1965 гг., предусматривает новые точные гири классов 1, 1а и частично 2-го. Старые аналитические гири 1-го класса по точности соответствуют гилям 2-го и частично 3-го классов нового ГОСТ. Для внедрения точных гирь необходимо было сначала повысить точность аттестации образцовых гирь 1-го разряда примерно в два раза по сравнению с существовавшей ранее, а также стабильность массы образцовых гирь 1-го разряда и рабочих эталонов.

До 1956 г. единицу массы от основного эталона СССР к образцовым и рабочим мерам массы передавали через два эталона-копии: платино-иридиевый килограмм № 26 и платино-иридиевый килограмм  $R_1 \frac{\text{PtIr}}{\text{кг}}$ .

Килограмм № 26 заменяет основной эталон—килограмм № 12 во время его нахождения в Международном бюро мер и весов. Второй эталон-копия применялся до 1955 г. для сличений с ним рабочих эталонов единицы массы.

До 1941 г. в институтах Госкомитета было четыре рабочих эталона. Однако в послевоенные годы потребность в рабочих эталонах возросла, поэтому их число было доведено до семи. В ближайшие годы количество рабочих эталонов необходимо увеличить.

Рабочие эталоны до 1956 г., как правило, сличались с эталон-копией  $R_1 \frac{\text{PtIr}}{\text{кг}}$  один раз в год. До 1950 г. стремились сличать его с основным эталоном СССР не чаще одного раза в 5 лет, однако практика последующих лет показала, что необходимы более частые сличения.

Поскольку увеличилось количество рабочих эталонов и нестабильность их массы (бронзовых рабочих эталонов) доходила до 0,6—0,7 мг за год эксплуатации, было необходимо почти ежегодно сличать эталон-копию с основным эталоном, что совершенно недопустимо, но и в этом случае не обеспечивалась точность поверки образцовых гирь 1-го разряда даже по старым нормам. Так появилась необходимость усовершенствовать эталоны единицы массы и создать новые рабочие эталоны, обладающие требуемой стабильностью массы.

В нашей стране эталоны делятся на три категории: основной эталон СССР, эталоны-копии, рабочие эталоны. Вводить в поверочную схему промежуточное звено между рабочими эталонами и эталонами-копиями

для повышения сохранности основного эталона СССР и копий нецелесообразно, поэтому число копий основного эталона СССР было увеличено до пяти.

Для изготовления новых копий нужно было подобрать материал, который обеспечил бы наибольшее постоянство массы эталона, наибольшую достоверность и точность при сличениях рабочих эталонов с эталонами-копиями.

В лаборатории измерения массы ВНИИМ, Международном бюро мер и весов и в метрологических институтах ряда стран в течение ряда лет проводились работы по изысканию материалов для изготовления эталонов массы. Исследовались сплавы менее дорогие, чем сплав платины с иридием, из которого изготовлены международный и национальный прототипы килограмма и эталон-копия  $R_1 \frac{\text{PtIr}}{1 \text{ кг}}$ , имеющие плотность  $19 \cdot 10^3 \div 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

В результате было установлено, что эталоны-гири, изготовленные из сплавов, близких по плотности к платино-иридиевому, не обладают достаточной стабильностью массы. Лучшими по стабильности оказались гири из нержавеющей немагнитной стали. Поэтому в конце 1955 г. на рижском заводе «Эталон» из этой стали было изготовлено по заказу ВНИИМ 17 килограммовых гирь. Они имеют форму прямых цилиндров, высота которых равна их диаметру; на верхнем основании каждой из них электрическим полировальником нанесен номер.

В качестве копий основного эталона СССР из изготовленных гирь были выбраны три: № 6, 8, 15. Семь гирь были направлены в качестве рабочих эталонов для Свердловского филиала ВНИИМ, ВНИИГК, ХГИМИП, НГИМИП, контрольной поверочной лаборатории ВНИИМ, Латвийской ГКЛ и ВНИИМ. Новые копии и рабочие эталоны утверждены Ученым советом ВНИИМ.

В работе по реорганизации эталонов единицы массы принимали участие все сотрудники лаборатории измерения массы ВНИИМ.

Увеличение числа эталонов-копий с двух до пяти с одновременной заменой прежних материалов нержавеющей сталью заставило разработать новую методику сличений эталонов-копий с основным эталоном СССР.

До 1956 г. масса эталона-копии № 26 определялась сличением в Международном бюро со свидетелями международного килограмма, а масса эталона-копии  $R_1 \frac{\text{PtIr}}{1 \text{ кг}}$  — на основании многократных прямых сличений с основным эталоном СССР. Если такую методику принять для определения массы пяти эталонов-копий, то основной эталон должен применяться в 140—160 взвешиваниях, что недопустимо. Поэтому при сличениях эталонов-копий с основным эталоном перешли от прямых измерений к косвенным. Учитывая специфические особенности износа эталонов единицы массы, решили проводить неполные круговые сличения эталонов-копий с основным эталоном, а именно сначала сличать с ним только две копии, а затем во всех возможных комбинациях сличать копии между собой и на основании результатов определять массу каждой из копий методом наименьших квадратов.

Благодаря применению метода матриц при решении условных уравнений различного достоинства, составленных по результатам отдельных сличений, получились простые формулы для расчета поправок эталонов-копий и оценки их точности. При этом точность результатов поверки по новой методике повысилась, причем для обнаружения систематиче-

ских погрешностей к совокупным измерениям различного достоинства применяли критерий Пирсона.

Таким образом, в настоящее время для поверочных работ основной эталон СССР применяется значительно реже.

Точность и достоверность передачи единицы массы к образцовым и рабочим гилям повысилась благодаря введению новой методики и повышенной стабильности массы рабочих эталонов в течение одного года применения от 0,7—1 мг до 0,02—0,05 мг. Возрос запас точности: он составил примерно 1:10, а не 1:3. От ежегодной поверки рабочих эталонов перешли к поверке один раз в два года.

В 1963 г. работы по усовершенствованию эталонов массы были продолжены. Для институтов Госкомитета и некоторых ГКЛ 1-го разряда было создано шесть наборов эталонных гирь от 1 до 500 г. Для создания точных образцовых весов первоначально начали разрабатывать требования к их метрологическим характеристикам. Часть образцовых весов будет изготовлена в 1965 г., а работу по созданию всех весов полностью предполагается завершить к 1968 г. Весами новой конструкции будут обеспечены институты Госкомитета и некоторые ГКЛ 1-го разряда.

Область измерения массы условно можно разделить на три части: измерение малых (2 г и менее), средних (2 г ÷ 20 кг) и больших масс (20 кг и более).

Измерение больших масс исключительно важно для народного хозяйства. Многие товары перевозятся железнодорожным и автомобильным транспортом, однако до настоящего времени состояние весового хозяйства на железных дорогах и на предприятиях отстает от современных требований. Расхождения в результатах взвешивания на вагонных весах часто возникают из-за отсутствия поверочных средств.

Работы по измерению больших масс во ВНИИМ не велись, этим частично занимались в Свердловском филиале ВНИИМ и ВНИИГК.

В области измерения малых масс исследования ведутся во ВНИИМ. До 1959 г. малые массы измеряли только на равноплечих призматических весах с погрешностью не менее  $\pm 0,001 \div 0,002$  мг.

В 1959 г. во ВНИИМ были созданы крутильные кварцевые весы для измерения малых масс с погрешностью  $\pm 0,0001$  мг. Однако на этих весах можно измерять массы, не превышающие 1 мг. Задача аттестации миллиграммовых наборов гирь 1 ÷ 500 мг с высокой точностью оставалась неразрешенной. С 1963 г. в лаборатории ведутся работы по созданию астазированных кварцевых весов с ценой деления 0,00001 мг и предельной нагрузкой до 500 мг, предназначенных для калибрования миллиграммовых наборов гирь 1 ÷ 500 мг и наборов рейтеров 0,05 ÷ 1 мг. При измерении масс 0,05 ÷ 1 мг ожидаемая точность измерения должна быть  $1 \cdot 10^{-5}$  (погрешность не более 0,00001 мг).

В области измерения масс необходимо повысить точность эталонов и точность передачи единицы массы к образцовым и рабочим гилям. Эту работу можно разделить на два этапа. Первый из них — усовершенствование существующих эталонов, второй — исследования по переходу на естественную единицу массы.

Как уже отмечалось, при переходе от эталонов к образцовым гилям 1-го разряда и рабочим гилям классов 1 и 1а по новому ГОСТ на гири существует запас точности. Но уже в настоящее время известен ряд причин, препятствующих дальнейшему повышению точности. Особенно важно сейчас усовершенствовать методы очистки эталонов перед сличениями. Важность методов очистки эталонов массы перед сличениями выяснилась при втором сличении национальных прототипов килограмма

в Международном бюро мер и весов, которое было начато перед войной и закончено в 1948 г. Оказалось, что способ очистки прототипов путем протирания их замшей, смоченной в спирте, не эффективен.

После проведения ряда исследований было предложено протирать платино-иридиевые эталоны замшей, смоченной в спирте или бензоле, а затем промывать парами дважды дистиллированной воды. Этот метод пригоден лишь для платино-иридиевых эталонов, так как он вызывает нестабильность массы эталонов из нержавеющей стали до  $0,01 \div 0,02$  мг, которая сохраняется в течение двух—трех лет. Во ВНИИМ, так же как и в Международном бюро мер и весов, поверхность этих эталонов очищают, протирая только замшей, смоченной в спирте. Но этот метод недостаточно эффективен.

В настоящее время объемы эталонов определены с точностью  $0,001 \div 0,002$  см<sup>3</sup>. Этого пока достаточно, но для дальнейшего повышения точности сличений необходимо определить объемы эталонов с точностью  $0,0003 \div 0,0004$  см<sup>3</sup>.

Для повышения точности измерений нужно создать новые метрологические весы на 1 кг, более совершенные, чем весы Рупрехта. За основу целесообразно взять одноплечие весы, возможно, с электрической следящей системой.

Международный прототип килограмма невоспроизводим. Он подвержен механическому износу даже при самом тщательном и осторожном применении. Платино-иридий, из которого он изготовлен, как и другое любое вещество, испаряется. За счет этого, несомненно, появляются потери в массе.

Существующая единица массы и весовой метод обеспечивают измерения массы с наивысшей точностью  $2 \cdot 10^{-9}$  лишь в незначительном диапазоне, приблизительно  $20$  кг  $\div$   $20$  г. При измерениях масс, больших  $20$  кг и меньших  $20$  г, относительная погрешность тем больше, чем значительнее измеряемая масса отличается от диапазона  $20$  кг  $\div$   $20$  г. Например, массы порядка десятых долей миллиграмма и десятков тонн измеряются с относительной погрешностью  $1 \cdot 10^{-5} \div 1 \cdot 10^{-4}$ . Массы меньше  $0,01$  мг измерить существующим эталоном массы или весовым методом практически нельзя.

Учитывая все это, следует поставить вопрос о переходе на естественные эталоны массы, используя физические законы, связывающие массу с другими величинами и константами.

В настоящее время необходимо работать над созданием принципиально новых методов измерения очень малых масс, порядка сотых и тысячных долей миллиграмма, и больших масс, порядка десятков тонн. Следует автоматизировать и повысить точность взвешиваний на вагонных весах.

Переход аналитического весостроения от равноплечих весов без встроенных гирь к одноплечим весам со встроенными гирями на полную нагрузку и намечающееся стремление применять электрические отсчетные и компенсирующие устройства в этих весах ставят перед нами задачу по уточнению и разработке некоторых положений теории весов и методов их поверки, по разработке новых нормативных документов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Менделеев Д. И., Опытное исследование колебания весов и возобновление прототипа или основной образцовой русской меры массы в 1893—1898 гг., ГОНТИ, 1931.

2. Менделеев Д. И., О весе литра воздуха, «Временник Главной палаты», № 1, 1902.
3. Доброходов А. Н., «Временник Главной палаты», вып. 1(13), 1928.
4. Доброходов А. Н., «Временник Главной палаты», вып. 2(14), 1928.
5. Jacob M., *Microtechnique*, v. IV, № 4, 1950.
6. Voinure A. I., *Revue de Metrologie Pratique*, v. XI, 1950.
7. Voinure A. I., *Microtechnique*, № 3, 1952.
8. Крахмальникова Г. А., Труды ВНИИМ, вып. 27(87), 1955.
9. Bigg a. Bursh, *British J. of Applied Physics*, v. 2, № 5, 1951.
10. Standards of Mass, NBS Technical News Bulletin, v. 35, № 1, 1951.
11. Смирнова Н. А. и Рудо Н. М., Реорганизация в области эталонов единицы массы, «Измерительная техника», № 6, 1961.
12. Смирнова Н. А., Новые эталоны единицы массы, «Измерительная техника», № 4, 1960.
13. Смирнова Н. А., Оценка погрешностей при сличениях эталонов-копий с первичным эталоном единицы массы СССР и некоторые изменения в пользовании ими, Труды институтов Комитета стандартов, вып. 57(117), 1962.
14. Тютикова М. И. Крутильные весы с кварцевой нитью, Сб. «Новые измерительные приборы и методы их поверки», вып. 4, Стандартгиз, 1962.
15. Смирнова Н. А., Теория автоматических коромысловых весов с электрическим компенсатором веса, «Измерительная техника», № 10, 1960.

## СВЕТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ВО ВНИИМ

В настоящей статье имеется в виду кратко изложить историю развития фотометрической лаборатории ВНИИМ, показав преемственность и внутреннюю связь тех работ, которые велись ею за время существования. При этом, поскольку основным назначением метрологического института является обслуживание народного хозяйства в различных областях измерений, эта история до некоторой степени должна отразить развитие и отечественной светотехники.

Фотометрическая лаборатория Главной палаты мер и весов была организована Д. И. Менделеевым в 1900—1901 гг. в связи с появлением в эти годы электрического уличного освещения и некоторого круга задач световых измерений. Первые 10—15 лет ее существования задачи эти были ограничены благодаря зачаточному состоянию светотехнической промышленности. Ограниченными оставались при этом и технические возможности лаборатории и ее деятельность. Световые измерения сводились в это время к сравнительной оценке источников света — первых электрических ламп накаливания — по силе света, экономичности и сроку службы. Основное оборудование лаборатории, исключительно импортное, состояло из одной светомерной скамьи (длиною 2,5 м, расположенной на рельсах для расширения пределов измерений) и потенциометра для электрических измерений; в качестве эталонов применялись фитильные лампы Гефнера, полученные, как и все остальные приборы, из Германии. Это оборудование позволяло производить перечисленные выше испытания, число которых вплоть до 1916 г. составило всего около сотни. С началом войны 1914 г. потребность в световых измерениях, видимо, еще более сократилась, и деятельность Главной палаты мер и весов в этом направлении на ряд лет была фактически прекращена.

Возобновление, а вернее, организация заново фотометрической лаборатории, постоянно действующей и по настоящее время, относится к 1923—1924 гг., что позволяет сейчас отметить 40-летие ее существования. Этот период может быть разделен на два основных этапа с Великой Отечественной войной 1941—1945 гг. в качестве границы. Последняя, с одной стороны, отмечает время насильственного нарушения в нормальном развитии ведущихся работ, с другой, совпадает с некоторым переломным моментом в истории развития отечественной светотехники и ее задач.

Период 1924—1941 гг. — это начальный период для светотехники в Советском Союзе. По существу, только в это время, в связи с задачами электрификации страны создается ламповая промышленность; постепенно организуются основные заводы — ламповые и светотехнической арматуры; создаются отдельные, сперва ограниченные по числу, институты и лаборатории, связанные так или иначе с областью световых измерений. В это время еще не существует специализированных заводов светотехнического оборудования и светоизмерительных приборов; нет институтов и организаций, занимающихся специально вопросами освещения; нет — во всяком случае в начале этого периода — ни разработанных методов измерений, ни специального отечественного оборудования. Основной круг вопросов светотехники этого времени связан с разработкой способов рационального освещения, методов оценки последнего, методов измерений характеристик источников света (ламп накаливания), светильников и т. д.

Во второй послевоенный период, начиная с 1946 г., существенно расширяется сеть светотехнических организаций, специализированных в разных направлениях; расширяется и круг вопросов, которые входят в сферу их деятельности. Характерными особенностями для светотехники этого времени являются: развитие физических методов измерений, обладающих высокой чувствительностью и повышенной относительной точностью; разработка и расширенное применение новых источников света (с особыми свойствами, в частности, со сложным спектральным составом излучения), требующих новых методов измерений; расширение пределов измерений за границы видимого спектра, обусловленное развитием новых источников света и новых приемников излучения.

Соответственно техническому уровню и состоянию светотехнических организаций в эти два периода изменялись характер, количество и содержание их метрологических запросов. Фотометрическая лаборатория стремилась удовлетворять эти запросы, прежде всего, в соответствии с основным своим назначением, а частично и сверх того — в меру своих физических возможностей.

Восстановлению световых измерений в Главной палате мер и весов в связи с задачами молодой развивающейся области техники оказали содействие Л. В. Залуцкий и М. А. Шателен. По их инициативе было принято решение о возобновлении деятельности эталонной фотометрической лаборатории. Основным назначением последней было поддержание единства измерений в данной области. Именно эта задача, в ее расширенном понимании, является стержневой для деятельности лаборатории с момента ее основания и во все последующие годы. Для решения этой задачи в разное время и в различных соотношениях велись работы следующих основных направлений:

- 1) эталонные работы, включающие: а) установление основного светового эталона и других световых эталонов для различных световых единиц и б) создание образцовых мер, служащих для передачи значений световых единиц;

- 2) разработка способов точных световых измерений и специальной измерительной аппаратуры;

- 3) метрологические исследования источников света, приемников лучистой мощности и светотехнических образцов и материалов;

- 4) поверочные работы и испытания;

- 5) разработка стандартов, правил, норм и пр.

Световые измерения понимались при этом, как измерения лучистой мощности, выполняемые в пределах видимого спектра и в соответствии

со свойствами человеческого глаза (вне зависимости от применяемых средств и способов измерений).

Эталонные работы имели, естественно, наибольший удельный вес во всей деятельности лаборатории. Их направление и метрологический уровень всегда соответствовали современной международной технике измерений и международным техническим соглашениям СССР. В 1925 г. на основе этих работ в СССР была введена система международных световых единиц. Первый основной световой эталон состоял из группы ламп накаливания, сличенных с национальными эталонами Англии и Франции. Преимуществом по сравнению с последними было применение в его составе только вольфрамовых ламп накаливания. Впоследствии (в 1948 г.) это обстоятельство облегчило практический переход к новому световому эталону в виде полного излучателя, обеспечив сравнительно небольшое — только на 0,5% — изменение в значениях световых единиц СССР. В это же время значения световых единиц Англии, США и Франции, опиравшиеся ранее на эталонные лампы с угольной нитью, были изменены на 1,0—1,9%.

Исходя из основного светового эталона 1925 г., воспроизводившего единицы освещенности и силы света, в последующие годы были созданы производный эталон люмена, а также многочисленные эталоны-свидетели, эталоны-копии и другие вторичные эталоны. Сложная система групповых эталонов, состоящих из ламп накаливания, должна была обеспечивать хранение и передачу световых единиц, несмотря на такие свойства ламп, как невозпроизводимость и изменение основных характеристик со временем. Ту же цель повышения надежности хранения и передачи единиц преследуют периодические международные сличения световых эталонов. Для проведения этих сличений через Международное бюро мер и весов и для выработки международных метрологических рекомендаций в области световых измерений по одновременному предложению М. А. Шателена (от СССР) и Национального бюро эталонов США был организован при Международном комитете мер и весов (МКМВ) Консультативный комитет по фотометрии.

В 1937 г. МКМВ принял решение о переходе в дальнейшем к новому световому эталону в виде черного тела — полного излучателя при температуре затвердевания платины, эталону, воспроизводимому и постоянному, излучательные свойства которого связаны с физическими свойствами чистого металла и определяются законами теплового излучения. В ближайшие за этим годы фотометрическая лаборатория выполнила ряд сложных и тонких подготовительных работ весьма широкого профиля (по плавке и обработке окиси тория, изготовлению и обработке сосудов для черного тела, измерениям пропускания оптических систем, подбору голубых поглотителей и др.). В результате всех этих работ измерения яркости полного излучателя были произведены впервые в июне 1941 г. Война привела сначала к отсрочке внедрения проведенных работ, а впоследствии — к необходимости повторения и даже полного возобновления некоторых выполненных ранее этапов.

Переход к новому световому эталону согласно международным соглашениям состоялся с 1 января 1948 г. Предварительно лабораторией были изготовлены новые сосуды с платиной и выполнены многократные измерения яркости полных излучателей. Погрешность воспроизведения яркости черного тела была определена примерно в 0,1—0,2%.

Некоторым недостатком нового эталона является низкая температура плавления платины, лежащая на нижнем пределе рабочих температур вольфрамовых ламп накаливания. Отсюда вытекают неизбежные погрешности воспроизведения световых единиц при более высоких цве-

товых температурах, вызываемые трудностями разноцветных световых измерений. Кроме того, точность воспроизведения световых единиц посредством нового светового эталона оказалась ограниченной по причинам сложного определения пропускания оптической системы, неравномерного разогрева массы металла в тигле и др. Сложность работ с новым световым эталоном обусловила необходимость создания и применения в повседневной практике эталонов-копий в виде ламп накаливания. Такие группы ламп для единиц освещенности и силы света и светового потока во всех направлениях были созданы при различных цветовых температурах.

Световой эталон в виде полного излучателя к 1 января 1948 г. был осуществлен в пяти, а позднее — в восьми национальных лабораториях. Конструкция его во всех странах в основном отвечает спецификации, предложенной в свое время НБЭ США. С переходом к новому эталону ожидалось существенное повышение согласованности в световых измерениях различных стран. Для проверки этого предположения с 1948 по 1962 г. проведено четыре международных сличения по четырем — пяти группам ламп различного назначения и с различными характеристиками. Результаты этих сличений показали, с одной стороны, что значения световых единиц СССР близки к средним международным данным (среднее отклонение от среднего международного составляет около  $\pm 0,5\%$ ), а с другой, что ожидавшееся сближение в значениях национальных единиц не достигнуто (наибольшие отклонения отдельных лабораторий лежат в пределах около  $\pm 1,0-1,3\%$ ).

В последние годы дополнительно исследованы возможные систематические ошибки измерений в различных лабораториях; в отдельных лабораториях сделаны попытки улучшить условия эксперимента. Во ВНИИМ разработаны и введены в действие новые экспериментальные установки, позволившие снизить погрешность воспроизведения световых единиц посредством полного излучателя до  $\pm 0,1\%$  за счет одновременных с плавкой измерений коэффициента пропускания оптической системы и лучшего перемешивания массы металла при плавках. Некоторые другие усовершенствования были внесены в условия измерений в лабораториях США и Канады. Тем не менее вопрос дальнейшего сближения в значениях световых единиц различных стран остается открытым.

В 1957 г. для экспериментального сравнения действующих значений световых и энергетических единиц была проведена работа по опытному определению светового эквивалента лучистой мощности. Измерения этой величины (значение которой можно вычислить теоретически, исходя из принятых значений яркости черного тела при температуре затвердевания платины и постоянной излучения  $C_2$ ) были выполнены посредством термостолбиков различного вида, снабженных цветными жидкими поглотителями с пропусканием, воспроизводящим по спектру кривую относительной видности. Чувствительность термостолбиков, соединенных с этими поглотителями, была заранее определена в энергетических единицах. Согласованность световых и энергетических единиц, действующих в стране, была установлена в пределах около  $\pm 1,5\%$ . Практически это отвечает погрешностям энергетических измерений и воспроизведения энергетических единиц. Результаты этой работы, вполне удовлетворительные с точки зрения поставленной задачи, указывают на возможность применения в дальнейшем такого пути для поисков нового способа воспроизведения световых единиц посредством эталонного приемника излучения вместо эталонного источника.

Световые эталоны 1925 г. не имели строго определенных характеристик спектрального состава излучения. Это не имело особого значения до появления новых источников света со сложным спектральным составом (типа люминесцентных и различных других газоразрядных ламп) и до расширенного применения различных приемников излучения с различной собственной спектральной чувствительностью. В 30-х годах для получения необходимых характеристик излучения лабораторией были установлены приближенные значения цветовых температур. Для этого применялся способ уравнивания цвета; измерения с полным излучателем — черным телом при температуре затвердевания платины — проводились непосредственно и через голубые стекла с известными коэффициентами спектрального пропускания. В 1946—1947 гг. шкала цветных температур была уточнена и расширена в пределах 2850—1500° K по методу относительных спектральных измерений в видимой области спектра. Эти измерения опирались на предварительно выполненные исследования спектральных приборов — двойных монохроматоров — в отношении их спектрального пропускания и дисперсии и на измерения распределения энергии посредством неселективных приемников чистой мощности. Погрешность воспроизведения шкалы цветовых температур в указанных пределах составляла около  $\pm 10^\circ$  K (или около  $\pm 0,5\%$ ) в распределении энергии. (Шкала цветовых температур была установлена фотометрической лабораторией ВНИИМ на несколько лет раньше того, как этим вопросом для целей цветовой пирометрии начала заниматься лаборатория высоких температур.)

В настоящее время образцовые лампы для распределения энергии, градуированные в 1947—1948 гг., проверяются новым методом — путем относительных сличений по спектру с черным телом при температуре затвердевания платины.

Для воспроизведения единиц яркости еще в 1928—1931 гг. разработан способ изготовления из сернистого бария белых пластинок с высокими рассеивающими свойствами; тогда же был создан набор таких образцовых пластинок с известными коэффициентами яркости и отражения.

В 1951 г. повторные исследования и аттестация образцовых пластинок выполнены измененным методом с помощью фотоэлементов; теперь эти измерения проводятся еще раз посредством нового оригинального способа, совершенно отличного от прежних и более точного. Применение новых методов и новой измерительной аппаратуры — в данном случае, как и в некоторых других, — одновременно отвечает и возросшим возможностям современной техники и метрологическому правилу проверки конечного результата измерений различными путями с целью исключения возможных систематических погрешностей.

В воспроизведении световых единиц и выполнении световых измерений существенную роль играют свойства глаза — его спектральная чувствительность, или — для среднего глаза — так называемая относительная видимость. Работы по опытному определению относительной видимости ставились во ВНИИМ дважды. Первые пробные измерения выполнялись в 1938—1939 гг.; повторные — по способу одноцветного фотометрирования — в 1950—1951 гг. В последнем случае для 50 наблюдателей были проведены определения как спектральной чувствительности, так и кривых сложения. По сравнению с данными относительной видимости 1924 г. получены существенные отклонения (до 10-кратного) в области 400—450 мμ; в остальных участках видимого спектра заметных изменений не обнаружено. В связи с тем, что по международным соглашениям, исходя из статистического характера самой величины, до сих пор

сохранили в силе данные относительной видности, принятые в 1924 г., результаты ВНИИМ имеют значение лишь дополнительного исследования.

Все перечисленные выше работы были непосредственно или тесно связаны с воспроизведением световых единиц и созданием световых эталонов. При их осуществлении по необходимости разрабатывались методы точных световых измерений и создавалась нужная измерительная аппаратура. Уже в первые годы были разработаны способы перехода от единиц освещенности к единицам яркости и светового потока, способы измерений коэффициентов яркости и отражения, способ разноцветных световых измерений, сводящий последний к одноцветным, и др. Одновременно разрабатывалось необходимое оборудование как метрологического, так и практического назначения: светомерные скамьи, светомерные шары особой конструкции, яркомеры, вращающиеся поглотители, распределительные фотометры, люксметры, ряд вспомогательных приспособлений для точной установки приемников и источников света при измерениях и т. д. В результате значительная часть специального оборудования лаборатории принадлежит к числу собственных разработок.

Измерительная аппаратура, созданная в первые годы, нашла в свое время широкое применение и за пределами ВНИИМ. В 30-х годах мастерскими Главмервес был выпущен мелкими сериями ряд перечисленных выше приборов. В это время, как указывалось выше, в стране не существовало специализированных заводов светоизмерительных приборов, и лаборатория, разрабатывая аппаратуру для своих целей, частично обслуживала и нужды промышленности.

После войны с появлением специальных оптико-механических заводов и ряда ведомственных и других институтов светотехнического профиля для лаборатории ВНИИМ отпала необходимость в создании приборов общего назначения. Послевоенные ее разработки носят поэтому более узкий, чисто метрологический характер. Вместе с тем, развитие физических методов измерений поставило в этом отношении совершенно новые задачи. Измерительные схемы с физическими приемниками имеют ряд конструктивных, технологических, метрологических особенностей. Причиной их являются как специфические свойства самих приемников по сравнению с глазом, так и требования повышенной точности измерений, обусловленные высокой пороговой чувствительностью самих измерительных схем. Отсюда возникают задачи разработки и осуществления новых методов измерений различных световых величин и характеристик, конкретные задачи отдельного вида измерений, как, например, в случае газоразрядных источников излучения, обладающих специфическими световыми и электрическими характеристиками и особыми зависимостями их от внешних условий. Соответственно в эти годы разрабатываются объективные методы и установки для точных измерений: яркости черного тела, коэффициентов яркости и отражения рассеивающих образцов, спектральных коэффициентов пропускания цветных и серых поглотителей, световых и спектральных характеристик люминесцентных ламп, спектральной чувствительности и других характеристик приемников излучения, и т. д. Одновременно велись и ведутся исследования новых типов измерительных фотоэлементов с низким напряжением насыщения и повышенной стабильностью. (Разработка этих фотоэлементов выполняется по техническому заданию лаборатории Московским электроламповым заводом.) Созданы и создаются специальные измерительные установки для проверки свойств фотоэлементов этого типа (линейности, чувствительности, распределению чувстви-

тельности по поверхности катода и др.) и для малых фототоков (фотоусилители разных типов). Ведутся также разработка и исследования различных неселективных приемников излучения типа термопар и термостолбиков для измерений в монохроматическом и белом свете.

### Обслуживание промышленности поверками и испытаниями

Для передачи значений световых единиц с помощью специальных источников света лаборатория еще в начале 30-х годов разработала конструкцию и технические условия на особые светоизмерительные лампы накаливания. (Эта разработка осуществлена на Московском электроламповом заводе, который вплоть до последних лет выпускал 12 типов светоизмерительных ламп для воспроизведения единиц силы света и светового потока.) В 1963 г. прежний ОСТ на светоизмерительные лампы пересмотрен и переработан; в него включены новые типы ламп и дополнительная характеристика цветовой температуры.

С 1939 г. в целях единообразия световых измерений светоизмерительные лампы поверяются при определенных значениях цветовой температуры.

Специальные поверки светоизмерительных ламп накаливания на распределение энергии и на цветовые температуры позволяют применять их как источники света с определенным спектральным составом излучения (например, при спектральных исследованиях различных новых источников света и приемников излучения).

С 1931 г. по настоящее время лаборатория распределяет сернобариевые пластинки, поверенные на коэффициент яркости; в сочетании со светоизмерительными лампами силы света эти пластинки воспроизводят единицу яркости. Те же пластинки, а также поверенные на общий коэффициент отражения, служат одновременно для определения отражательных свойств образцов различных материалов — бумаги, текстильных изделий, керамики, муки и пр.

В факультативном порядке, по мере возможности, производятся испытания и определение общей и спектральной чувствительности, а также других характеристик различных приемников излучения.

Периодически распределяются наборы стеклянных цветных и серых образцов с известными коэффициентами пропускания в видимой области спектра.

Силами поверочной лаборатории регулярно производится поверка рабочих селеновых люксметров, выпускаемых отечественной промышленностью. Для массовой поверки разработана поверочная установка, работающая по способу сличения с образцовым люксметром.

Новой формой технической помощи является участие в государственных испытаниях светоизмерительных приборов, выпускаемых нашей промышленностью. За последние годы проведено около 10—12 испытаний типа различных приборов.

Первым сотрудником фотометрической лаборатории, ее организатором и бессменным руководителем с момента основания и до середины 1957 г. был проф. П. М. Тиходеев. Основными сотрудниками, авторами и исполнителями перечисленных выше работ были: в первый период ее деятельности П. М. Тиходеев, М. В. Соколов, Е. Д. Девяткова, К. И. Несмачный, Н. И. Пестова-Герлинг, А. М. Сабуренков; во второй период — П. М. Тиходеев, В. Е. Карташевская, А. М. Сабуренков, Т. Н. Андреева. Лабораторией опубликовано около 70 работ, разработано около 50 приборов и установок.

Дальнейшее развитие работ предполагается в следующих направлениях:

1. Поиски новых путей воспроизведения световых единиц и усовершенствование существующих.

Работы этого направления имеют в виду как дальнейшее повышение точности воспроизведения единиц для обеспечения растущих запросов техники, так и исследование возможности объединения собственно световых эталонов и эталонов энергетических единиц.

2. Расширение области точных световых измерений по пределам и по номенклатуре измеряемых величин. При этом имеются в виду и различные источники излучения и широкий спектральный диапазон их применения. Сюда относятся, в частности, такие задачи, как разработка точных методов измерений: неселективного ослабления световых пучков в  $10^3$  :  $10^6$  раз, спектральных характеристик источников и приемников излучения (распределения энергии, спектральной чувствительности и др.) в видимой и ближних смежных областях спектра, и т. д.

3. Расширение области точных измерений — световых и энергетических — в отношении различных характеристик (поглощения, рассеяния, отражения, излучения и др.) разных веществ и зависимостей этих характеристик от разных физических условий (температуры, освещения, длины волны и пр.).

## ЦВЕТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Трехцветная колориметрия представляет раздел физики, тесно прилегающий к физиологической оптике. Область ее применения весьма широка. Она включает в себя почти все отрасли знаний, где используется зрение.

Колориметрия как наука сформировалась во 2-й половине прошлого столетия в работах классиков естествознания — Гельмгольца, Максвелла, Грассмана, Кенига. Однако в ту пору она не находила практического применения из-за слабого развития техники и промышленности. В то время все практические задачи, связанные со зрительными оценками, ограничивались фотометрированием источников света, которые представляли собой раскаленные тела (например лампы с угольной нитью). Правда, с появлением вольфрамовых ламп возникли трудности для фотометрирования из-за разноцветности полей зрения в фотометре, а люминесцентное освещение заставило фотометристов перейти к использованию колориметрических методов.

В настоящее время особый интерес к вопросам цветоведения и колориметрии связан с быстрым развитием мировой промышленности, искусства и культуры. Сейчас нет ни одной отрасли народного хозяйства, где бы не требовались цветовые измерения. Это, в первую очередь, — химическая, лакокрасочная, текстильная, полиграфическая, бумажная, керамическая и другие виды промышленности, а также цветные кино, фото и телевидение, цветная печать, изобразительное искусство, архитектура, ботаника, агротехника, медицина, криминалистика, военное дело и т. д.

В отличие от других физических приемников, реакция которых может быть выражена скалярной величиной, глаз человека занимает особое положение. Он реагирует на излучение одновременно всеми тремя содержащимися в нем светочувствительными рецепторами, изменяя чувствительность в процессе наблюдения, т. е. адаптируется. В настоящее время мы не знаем способов измерения реакций приемников глаза, а потому глаз в колориметрии используется как нуль-прибор. Его зрительная реакция трехмерна, поэтому цвет как существенно трехмерная векторная величина определяется тремя координатами. С точки зрения воздействия на глаз трехцветные координаты являются необходимыми и достаточными характеристиками излучений.

Научная колориметрия основана на результатах опытов по смешению цветов, сформулированных в законах Грассмана. Она справедливо завоевала свое место в практике, вытеснив ложные цветовые теории Геринга, Оствальда и др.

В истории русской науки первое упоминание о цвете мы находим у М. В. Ломоносова. В 1756 г. он выступил с докладом «Слово о происхождении света новую теорию о цветах представляющее» в публичном собрании Академии Наук июля 1 дня 1756 года говоримое Михайлом Ломоносовым», в котором изложил свои мысли об объективной природе цвета.

В первые годы организации Главной палаты мер и весов Д. И. Менделеев вел переписку с министерством финансов о создании колориметрической лаборатории. Естественно, что в то время Д. И. Менделеева интересовал раздел колориметрии, связанный со спектральным анализом, — так называемая концентрационная колориметрия.

Успехи колориметрии как физической науки о цвете связаны с тем грандиозным развитием физики, которое началось с первых дней советской власти.

Первые колориметрические работы были проведены в двух крупных институтах: Институте биофизики в Москве и в Государственном оптическом институте (ГОИ) в Ленинграде. Основатель ГОИ, Д. С. Рождественский, проявлял живой интерес к этой области. В Москве работали супруги В. И. и Н. Т. Федоровы и Н. Д. Ньюберг, в Ленинграде — супруги Л. И. Демкина и Г. Н. Раутиан. Вскоре как теоретические, так и экспериментальные работы этих ученых получили признание в нашей стране и за рубежом.

Колориметрическая лаборатория, созданная во ВНИИМ в 1939 г., имела следующую тематику:

- 1) разработка ГОСТ на основные понятия колориметрии,
- 2) создание экспериментальной установки для измерения функций сложения цветов.
- 3) исследование явления цветовой адаптации глаза.

Великая Отечественная война прервала эти работы в самом начале. Они возобновились лишь в 1945 г. в составе фотометрической лаборатории на базе сохранившегося оборудования.

Первой работой по колориметрии, законченной во ВНИИМ в 1946 г., было исследование закономерности явления цветовой адаптации глаза на специально сконструированном приборе. Позднее, в 1951 г., был создан макет таблиц для испытания цветного зрения, в основу которого положены результаты изучения дефектных форм цветного зрения, полученные в ГОИ. Постановка более актуальных колориметрических работ по профилю ВНИИМ и необходимость организации колориметрических проверок потребовали создания лабораторной базы, и поэтому эти первые работы не получили дальнейшего развития.

Колориметрия во ВНИИМ должна была прежде всего разрешать метрологические задачи, т. е. задачи унификации и стандартизации цветовых измерений. Для этого было необходимо образцовое оборудование. Поскольку точность колориметрических измерений в конечном счете определяется различительной способностью глаза, а визуальный метод измерения цвета по отношению к двум другим (расчетно-спектрофотометрическому и объективному) — исходный, то сначала был сконструирован и изготовлен именно визуальный колориметр.

В 1953 г. решением дирекции ВНИИМ колориметрические работы были переведены в оптическую лабораторию, в рамках которой к концу 1958 г. было закончено полное исследование образцового визуального

колориметра, приобретен и исследован лучший отечественный спектрофотометр СФ-2М, разработан и осуществлен фотоэлектрический компаратор цвета для измерения малых цветовых различий. Из прозрачных и заглушенных оптических стекол и керамики были созданы и аттестованы наборы образцов цвета для контроля за показаниями образцовых приборов.

Таким образом, во ВНИИМ были обеспечены все три метода цветовых измерений: визуальный, расчетный и объективный в форме образцового оборудования, т. е. было сделано все необходимое для начала колориметрических исследований и поверок.

Следует отметить, что в визуальном колориметре был использован впервые в нашей стране метод измерения цвета в условиях близости спектральных составов колориметрических полей зрения. Это устранило систематические погрешности, возникающие из-за индивидуальных особенностей зрения наблюдателей и существенно повысило точность визуальных измерений.

В дальнейшем тематика колориметрических работ выбиралась в полном соответствии с требованиями и нуждами промышленных предприятий.

Общему развитию колориметрии, а также общению специалистов нашей страны значительно способствовала Постоянная колориметрическая комиссия при ВНИИМ, организованная в 1956 г. по идее Комитета стандартов. Комиссия объединяет всех наиболее квалифицированных колориметристов и представителей главных промышленных организаций. Ее основные задачи — обсуждение и координация научно-исследовательских работ, осуществление связи с промышленностью и информация о достижениях в области колориметрии. На 11 пленарных заседаниях и 12 заседаниях бюро комиссии обсуждались вопросы измерения белизны, колориметрического приборостроения и объективной колориметрии, рекомендации Международного комитета по колориметрии, доклады советских специалистов — участников международных совещаний по колориметрии, постановка и результаты отдельных исследований, ГОСТ и т. д.

В 1958 г. была организована колориметрическая группа в составе 5 человек. Располагая необходимым оборудованием, эта группа начала метрологические исследования. Прежде всего, было уделено большое внимание вопросу измерения белизны, который в настоящее время является весьма актуальным для многих областей промышленности, и вопросу создания белого образца в колориметрии.

В результате колориметрических исследований целого ряда белых промышленных изделий разных производств были установлены границы цветовой области, связанной с понятием «белизна». Колориметрическое и спектрофотометрическое исследование различных химически чистых белых веществ позволило дать рекомендации о степени их пригодности в качестве рабочих образцов белой поверхности в светотехнике и колориметрии.

Рекомендуемый Колориметрическим комитетом E-1.3.1 Международной осветительной комиссии переход от относительных измерений спектрального коэффициента отражения к абсолютным был осуществлен путем измерения окиси магния в шаре Тейлора. В связи с этой работой создан образцовый набор из 12 белых молочных стекол, спектральные коэффициенты отражения которых измерены абсолютным методом.

В своей деятельности колориметрическая группа не отмежевывалась от других насущных вопросов сегодняшнего дня. Так, в целях унификации цветковых измерений были разработаны, изготовлены и аттестованы

для нужд промышленности наборы стеклянных образцов цвета, обеспечивающие многие ГОСТ на сигнализацию, образцовые десятицветные шкалы для маркировки и клеймения металлов, а для нужд торговли и лесохимической промышленности — стеклянные нормалы цвета капи-фоли.

Одну из важных задач унификации и стандартизации цветов представляет разработка колориметрических ГОСТ. Эта задача, как уже упоминалось, ставилась еще в 1940 г. Дело в том, что среди практиков, занимающихся колориметрией, не было единообразия в пользовании понятиями, терминами и обозначениями. Поэтому к 1961 г. был разработан проект ГОСТ, в котором определены основные колориметрические понятия и величины.

Колориметрическая группа принимала участие в работах по тематике, предлагаемой Международным колориметрическим комитетом E-1.3.1. Это участие выразилось:

- 1) в опытной проверке функций сложения, установленных в 1959 г. в работах Стайлса — НФЛ (Англия) и Сперанской — ГОИ (СССР);
- 2) в исследовании вида равнояркой поверхности в цветовом пространстве;
- 3) в международных сличениях стеклянных светофильтров дневного света и отражающих образцов.

С 1960 г. колориметрическая группа приступила к созданию образцового атласа цветов как общегосударственной цветовой нормалы. Этот атлас должен служить средством, обеспечивающим централизованный контроль над разнообразными ведомственными цветовыми шкалами, «цветниками» и так называемыми «эталоном» цвета.

В 1962 г. работа закончилась осуществлением 27 опорных шкал со 120 образцами. Шкалы были изготовлены в пяти экземплярах и аттестованы на образцовом оборудовании. В качестве материала были использованы наиболее стойкие пигменты Ленинградского завода художественных красок. Связующим веществом служила поливинилацетатная эмульсия. Впоследствии группа разработала способ изготовления образцов с защитной матированной ацетобутиратцеллюлозной пленкой, поглощающей ультрафиолетовое излучение.

Параллельно с расширением шкал еще до получения полноцветного атласа группа приступила к тиражу опорных шкал для нужд промышленности и народного хозяйства. В 1963 г. ВНИИМ подготовил к выпуску 12 наборов защищенных пленкой образцов цвета для компараторов цвета Светотехнического института. В 1964 г. вместе с комбинатом графических работ Ленинградского художественного фонда запланирован выпуск 200 экземпляров атласа по заказу многих организаций страны.

В результате научной работы по созданию атласа должна быть осуществлена визуальная равноступенчатая сетка цветовых координат, веществом воспроизведенная в образцах цвета. Можно предполагать, что равноступенчатый цветовой атлас будет использован для аналитического выражения метрики цветового пространства. Для практики он важен, кроме того, как система цветовых допусков и основа для построения рациональной системы цветовых названий. При его построении предполагается использовать метод Н. Д. Ньюберга, предложенный на первом совещании Постоянной колориметрической комиссии.

Выпуск атласа требует разработки нового образцового оборудования более высокого класса точности главным образом в части спектрофотометрических измерений темных образцов и измерения индикатрисы рассеяния.

Однако задача точного измерения цвета отражающих образцов не встречает принципиальных трудностей и разрешается с помощью ныне существующей колориметрической системы относительных единиц.

Основные научные проблемы колориметрии лежат в области абсолютных измерений цвета. С появлением цветных люминофоров, светящихся составов, различного типа люминесцентных, неоновых, натриевых ламп, а также оптических отбеливателей возникает необходимость дальнейшего развития колориметрической системы, опирающейся на методы энергетических измерений.

---

## СЕНСИТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Крупнейшие исследователи в области фотографии Е. Ф. Буринский, А. И. Прилежаев, С. О. Максимович и другие в своих работах всегда опирались на достижения русской науки, связанные с именами М. В. Ломоносова и Д. И. Менделеева. За 125 лет своего существования фотография получила значительное развитие. Трудно назвать такую область науки или техники, в которой бы методы фотографии не использовались для оценки изучаемого явления.

Сенситометрия — это область измерительной техники, занимающаяся изучением различных свойств светочувствительных материалов.

Результаты сенситометрических измерений очень широко используются в науке, технике и народном хозяйстве — в фотографии черно-белой и цветной, в аэро съемке, кинематографии, спектральном анализе, при изучении ядерных процессов, явлений радиоактивности и при исследовании космоса.

Основными метрологическими задачами в области сенситометрических измерений являются: 1) разработка образцовых методов и установок для измерения основных характеристик черно-белых и цветных светочувствительных материалов (общей, эффективной и спектральной светочувствительности, оптических плотностей фотографических почернений, разрешающей способности и др.) и 2) поддержание единства измерений в стране с помощью созданных для этого средств.

Для решения метрологических задач в области сенситометрии в 30-х годах в ХГИМИП была создана специальная сенситометрическая лаборатория. В ней были осуществлены образцовые измерительные приборы и установки для поверки сенситометров и денситометров, налажено производство с некоторыми конструктивными изменениями рабочих сенситометров типа Эдера—Гехта, проведен ряд исследований по синтезу красителей, необходимых для изготовления фотослоев с различной спектральной чувствительностью.

Совместно с ВНИИМ ХГИМИП разработал в 1933 г. общесоюзный стандарт на основные понятия и величины фотографической сенситометрии.

Как мы видим, во ВНИИМ работы по сенситометрии велись еще в 30-х годах (И. П. Тарасов и др.), но более широкое развитие они получили с 1946 г., когда в институте была создана сенситометрическая лаборатория под руководством Ю. Н. Гороховского. В период с 1949 по 1963 г. лабораторией (а затем группой) руководил И. А. Черный.

Первоочередной и наиболее важной задачей в период с 1947 по 1951 г. было введение в СССР новой единой системы сенситометрии в соответствии с ГОСТ 2817—50 [1] вместо устаревшей системы Хертера — Дриффельда.

ГОСТ предусматривает использование для определения основных свойств светочувствительных материалов сенситометров типа ФСР-4, представляющих собой экспозиционные приборы.

Принцип действия стандартного сенситометра состоит в том, что испытуемый светочувствительный слой освещают световым потоком определенного спектрального состава. Для засвеченных образцов фотографических материалов определяют стандартными методами: общую и эффективную светочувствительности, коэффициент контрастности, оптическую плотность вуали, широту фотографического материала и др. Образцы засвечиваются в условиях, приближающихся к условиям практического использования фотоматериалов.

Во ВНИИМ совместно с Государственным оптическим институтом им. С. И. Вавилова (ГОИ) и заводом-изготовителем сенситометрической аппаратуры усовершенствована сенситометрическая аппаратура, что позволило значительно повысить сходимость показаний между отдельными экземплярами сенситометров, используемых в промышленности.

Для поддержания единства сенситометрических измерений во ВНИИМ осуществлена образцовая сенситометрическая установка типа ФСР-4. Одновременно были разработаны и созданы средства и методы поверки сенситометрической аппаратуры: фотоэлектрической, по-узловой и общей поверки сенситометров, уточненный метод определения константы оптического клина; приборы для определения в сенситометрах скорости срабатывания затвора и для контроля цветовой температуры лампы накаливания [2].

ВНИИМ периодически поверяет [3, 4] образцовые сенситометры основных предприятий химической промышленности, сенситометрической инспекции Научно-исследовательского кинофотоинститута (НИКФИ), завода-изготовителя сенситометрической аппаратуры.

В области денситометрических измерений, оптических плотностей фотографических почернений, во ВНИИМ была выполнена большая работа [5, 6] по созданию образцовых денситометрических установок и определению соотношений между различными видами [7] встречающихся в практике оптических плотностей (диффузная, интегральная, регулярная и эффективная).

В качестве образцового денситометра для измерения диффузных оптических плотностей почернений выбран поляризационный денситометр Мартенса, который предварительно был с большой тщательностью поверен при помощи набора неселективных образцовых секторных дисков.

Для измерения интегральных оптических плотностей почернений разработан и осуществлен уникальный интегрирующий денситометр системы ВНИИМ (рис. 1).

В работе [6] показано, что значение интегральной оптической плотности превышает значение диффузной не более чем на 0,05.

Установлены следующие весьма важные требования к конструкции денситометров, обеспечивающие измерения оптических плотностей в соответствии с ГОСТ 2817—50.

В денситометрах с диффузным освещением измеряемого образца воспринимающее устройство должно собирать лучи, угловое отклонение которых от нормали не должно превышать  $10^\circ$ .

В денситометрах, в которых образец освещается светом, близким к направленному, воспринимающее устройство должно собирать лучи, угловое отклонение которых от нормали не должно превышать  $60^\circ$ .

Важнейшим структурным свойством фотографических светочувствительных материалов является разрешающая способность  $R$  [7], т. е. свойство разделять мельчайшие детали оптического изображения.

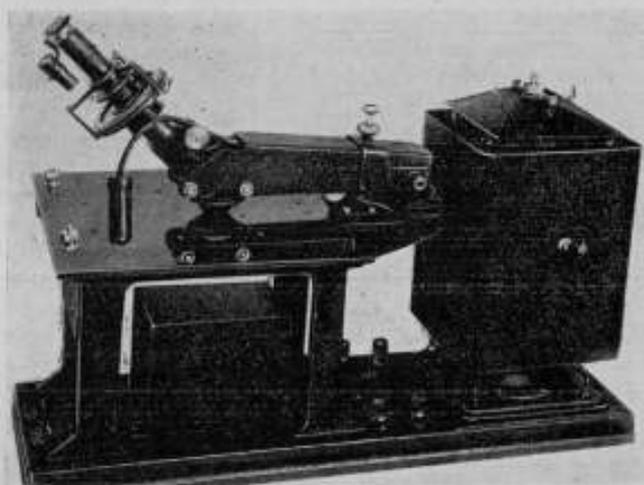


Рис. 1. Интегрирующий денситометр системы ВНИИМ.

Метод резольвометрического испытания фотографических материалов стандартизован [8], но в настоящее время ГОСТ во многих пунктах устарел и должен быть пересмотрен.

Под разрешающей способностью фотографического слоя всегда следует понимать результат совместных действий светочувствительного слоя и определенной оптической системы. Нередко встречаются попытки рассматривать «собственную разрешающую способность» светочувствительного слоя в отрыве от оптической системы.

В настоящее время в промышленности для оценки разрешающей способности фотографических материалов используются проекционные резольвометры с оптическими системами, имеющими апертуры 0,2, иногда 0,1, а также 0,3, что неизбежно приводит к нарушению единства резольвометрических измерений в стране.

Для проведения широких исследований по выяснению зависимости разрешающей способности от величины апертуры и типа объектива во ВНИИМ был разработан и создан [9, 10] проекционный резольвометр типа РП-1 с тремя сменными объективами (апохроматы) ОС-16 и ОС-8 и планахромат ОХ-10.

Многочисленные исследования [11, 12] показали (рис. 2), что при испытании крупнозернистых слоев разрешающая способность их  $R \approx 50$  лин/мм, практически не изменяется с ростом апертуры объектива. При апертуре  $A = 0,05$  (относительное отверстие 1:10) уже получается предельное значение разрешающей способности данного слоя. В этом случае ее значение лимитируется свойствами слоя, дальнейшее увеличение апертуры объектива не может повысить разрешающую способность.

Для более высокодисперсных светочувствительных слоев разрешающая способность существенно возрастает с увеличением апертуры. Так,

при переходе от апертуры 0,1 к апертуре 0,3 разрешающая способность этих слоев может возрасти почти в два раза.

При увеличении апертуры оптической системы свыше 0,3 разрешающая способность начинает постепенно падать, как это видно из рис. 2, где приведены зависимости от апертуры разрешающей способности нескольких фотографических слоев в интервале  $A = 0,075 - 0,65$ . На оси абсцисс даны соответствующие им значения относительных отверстий оптической системы — микрообъекта апохромата типа ОС-8 ( $A = 0,65$ ;  $F = 8,4$  мм).

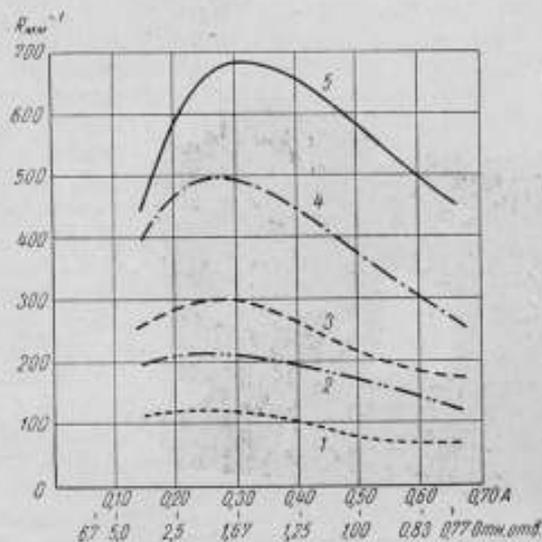


Рис. 2. Зависимость между разрешающей способностью и апертурой (относительным отверстием) микрообъектива для различных фотографических материалов.

1 — киногетатив типа А-2; 2 — микрат-200; 3 — микрокопи фирмы Дюпон (США); 4 — микрофильм фирмы Дюпон (США); 5 — микрат-600.

Исследования, выполненные на различных галодосеребряных желатиновых слоях промышленного и собственного изготовления [13], показали, что максимум определяемой разрешающей способности достигался во всех случаях при апертуре  $A = 0,3$ , т. е. при относительном отверстии 1:1,7. Эти результаты получены с помощью хорошо исправленных и отлично изготовленных микрообъективов различных типов: ахроматов, апохроматов, планохроматов и планапохроматов, имевших  $A = 0,2 - 0,65$ . Апертура могла уменьшаться диафрагмированием, причем истинная действующая апертура была во всех случаях известна из прямых измерений с помощью апертометра Аббе.

Некоторые типы применявшихся объективов испытывались в нескольких экземплярах. Наблюдавшаяся картина оставалась во всех случаях одинаковой, хотя абсолютная величина измеряемой разрешающей способности немного различалась [12] для объективов различных типов. Можно утверждать, что при одинаковых апертурах (достигнутых с помощью диафрагмирования микрообъективов различной начальной апертуры) более высокое значение разрешающей способности получается [12] всегда при использовании микрообъектива с более высокой апертурой.

Если явление возрастания определяемой разрешающей способности вполне ясно, то получение ее максимума, наблюдаемого при определенной, притом всегда одинаковой, апертуре, не зависящей от типа объектива, несомненно, требует объяснения. Причина этого явления лежит, как видно, вне оптической системы и объясняется структурой галодосеребряных желатиновых светочувствительных слоев. Если бы они не являлись суспензией микроскопических и субмикроскопических зерен или если бы эти зерна имели сферическую форму, то данное явление не могло бы иметь места.

В действительности фотографический слой образован системой плоских кристалликов, обладающих гораздо более высоким коэффициентом преломления, нежели заключающая их среда. Кристаллики лежат во

много рядов, одинаково ориентированных (вследствие высыхания слоя и уменьшения его толщины примерно в 20 раз) и расположенных своими плоскостями параллельно поверхности слоя. Поэтому рассеяние света внутри слоя в сильной степени зависит от наклона падающих лучей: оно минимально при нормальном падении пучка и растет с его наклоном. Очевидно, что наименее рассеялся бы нормально падающий пучок с апертурой, близкой к нулю, но от такого пучка нельзя ждать оптического изображения высокой разрешающей способности.

По мере увеличения апертуры возрастают углы падения лучей, образующих изображение, и вследствие этого увеличивается рассеяние света в слое. Следовательно, одновременно с возрастанием оптической разрешающей способности возрастает рассеяние света в слое. Оба явления неразрывно связаны и протекают совместно. Пока наклоны лучей невелики, разрешающая способность в фотографическом изображении возрастает с увеличением апертуры пучка. Разрешающая способность достигает максимума при наклоне крайних лучей светового пучка на  $17^\circ$  к нормали, как это следует из экспериментов [12]. При дальнейшем увеличении апертуры, а следовательно, и наклона лучей начинает превалировать влияние рассеяния света, и разрешающая способность в фотографическом изображении падает.

Так как апертуре 0,3 соответствует теоретическая-оптическая разрешающая способность  $R \approx 1000$  лин/мм, то при меньших апертурах вообще не может быть достигнуто значение  $R = 1000$  лин/мм, каков бы ни был испытуемый слой. С другой стороны, как было уже показано, при апертурах, превышающих 0,3, определяемая разрешающая способность оказывается всегда меньше, чем при апертуре 0,3.

На основании приведенного выше анализа можно сделать следующий вывод: наибольшая разрешающая способность какого бы то ни было галондо-серебряного слоя, определяемая проекционным методом с помощью любой оптической системы, не может превышать 1000 лин/мм или, другими словами, никакое фотографическое изображение, полученное с помощью оптической системы, не может содержать более 1000 линий на миллиметр.

Из этого основного вывода следует несколько частных, имеющих практический интерес:

1. В резольвометрах целесообразно применять оптические системы с апертурой около 0,3, при которой достигается наивысшее предельное значение разрешающей способности. При резольвометрических испытаниях, когда  $A = 0,2$ , получить разрешающую способность  $R > 600$  лин/мм вообще невозможно.

2. Светочувствительные слои, практически одинаковой высокой разрешающей способности, близкой к предельной при данной апертуре (например,  $R = 500-600$  лин/мм при  $A = 0,2$  или  $R = 800-1000$  лин/мм при  $A = 0,3$ ) располагаются в ряд по возрастающей разрешающей способности в зависимости от крутизны восходящей ветви кривой  $R = f(A)$ .

3. Создание фотографических слоев, обладающих при испытаниях в резольвометрах разрешающей способностью, приближающейся к предельной для данного прибора (например, выше  $R = 800$  лин/мм при  $A = 0,3$ ), связано с большими эмульсионно-технологическими трудностями, так как необходимо синтезировать слои с фактически гораздо более высоким разрешением.

4. Применение ультрасветосильной, притом практически безаберрационной, оптики с относительными отверстиями выше 1:1,7 неизбежно влечет за собою снижение фотографической разрешающей способности. Однако это не приложимо к объективам, обладающим значительными

абберациями. Это обстоятельство должно приниматься во внимание при проектировании, например, светосильных спектрографов с высоким разрешением и т. п. приборов.

5. Широугольные объективы не могут обладать высокой фотографической разрешающей способностью по полю из-за возрастания рассеяния света в слое с увеличением угла падения его пучков.

В целях достижения единообразия, повышения точности, улучшения и дальнейшей стандартизации резольвометрических измерений в 1962 г. была выполнена работа по созданию нового проекционного резольво-

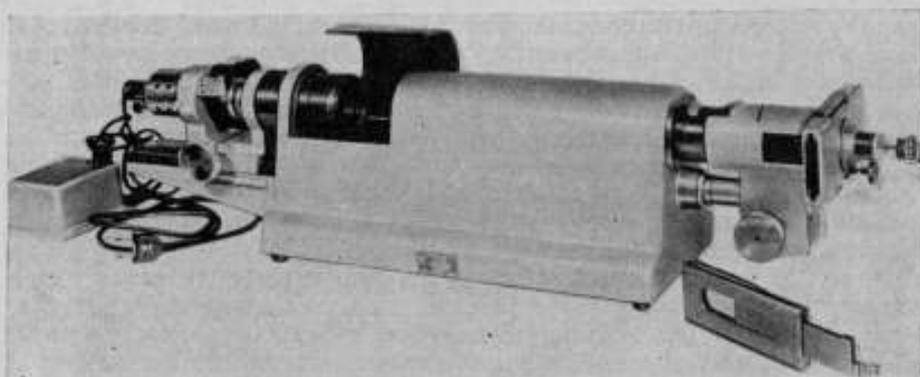


Рис. 3. Проекционный резольвометр типа РР-2.

метра типа РР-2 (рис. 3). При разработке было обращено особое внимание на удобство эксплуатации прибора в условиях производства и возможности использования его для научно-исследовательских целей.

Применение в резольвометре двух спиралеобразных штриховых мер абсолютного контраста позволяет измерять разрешающую способность в пределах  $17 \div 1000$  *лин/мм*.

В резольвометре применен высококачественный микрообъектив типа ОС-16 (апохромат;  $F = 15,7$ ;  $A = 0,3$ ), изготавливаемый серийно оптической промышленностью. Перед ним (по ходу лучей) установлена присосная диафрагма, позволяющая получать апертуры: 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25 и 0,30.

Микрообъектив типа ОС-16 заключен в специальную втулку, в которую на мелкой резьбе ввернут колпачок. Торец колпачка обработан как оптическая поверхность и служит опорной плоскостью для прижатия испытуемого фотографического материала. Через отверстие ( $\varnothing = 2$  мм), имеющееся в торце колпачка, создается изображение миры на светочувствительном слое. Резольвометр грубо юстируется только при выпуске из производства. Для этого применяется указанное выше оригинальное устройство, состоящее из втулки и специального колпачка. Колпачок юстируется относительно микрообъектива так, чтобы его опорная поверхность оказалась в плоскости наилучшего изображения, и затем жестко фиксируется клеем.

Для тонкой фокусировки прибора в процессе работы перемещают миру по специальной шкале длиной 100 мм. Перемещение миры на 0,1 мм соответствует изменению положения изображения (относительно микрообъектива) на 0,1 мкм.

Этот результат, сравнимый с длиной световой волны, говорит о большой точности фокусировки прибора.

В отличие от имеющихся приборов резольвометр типа РР-2 имеет особый механизм, обеспечивающий точное нахождение экспонируемого участка фотографического материала в фокальной плоскости микро-объекта. Кроме того, в нем имеются два револьверных диска: один — с набором из восьми нейтрально-серых светофильтров со степенями оптической плотности 0,30, позволяющих осуществлять экспонирование по шкале освещенности при постоянной выдержке, создаваемой затвором типа ФЗШ-13с; второй — содержит пять цветных сенситометрических светофильтров и один нейтрально-серый.

Прибор позволяет получить резольвограмму, состоящую из 60 изображений мира; воспроизводимость показаний резольвометра не превосходит  $\pm 5\%$ .

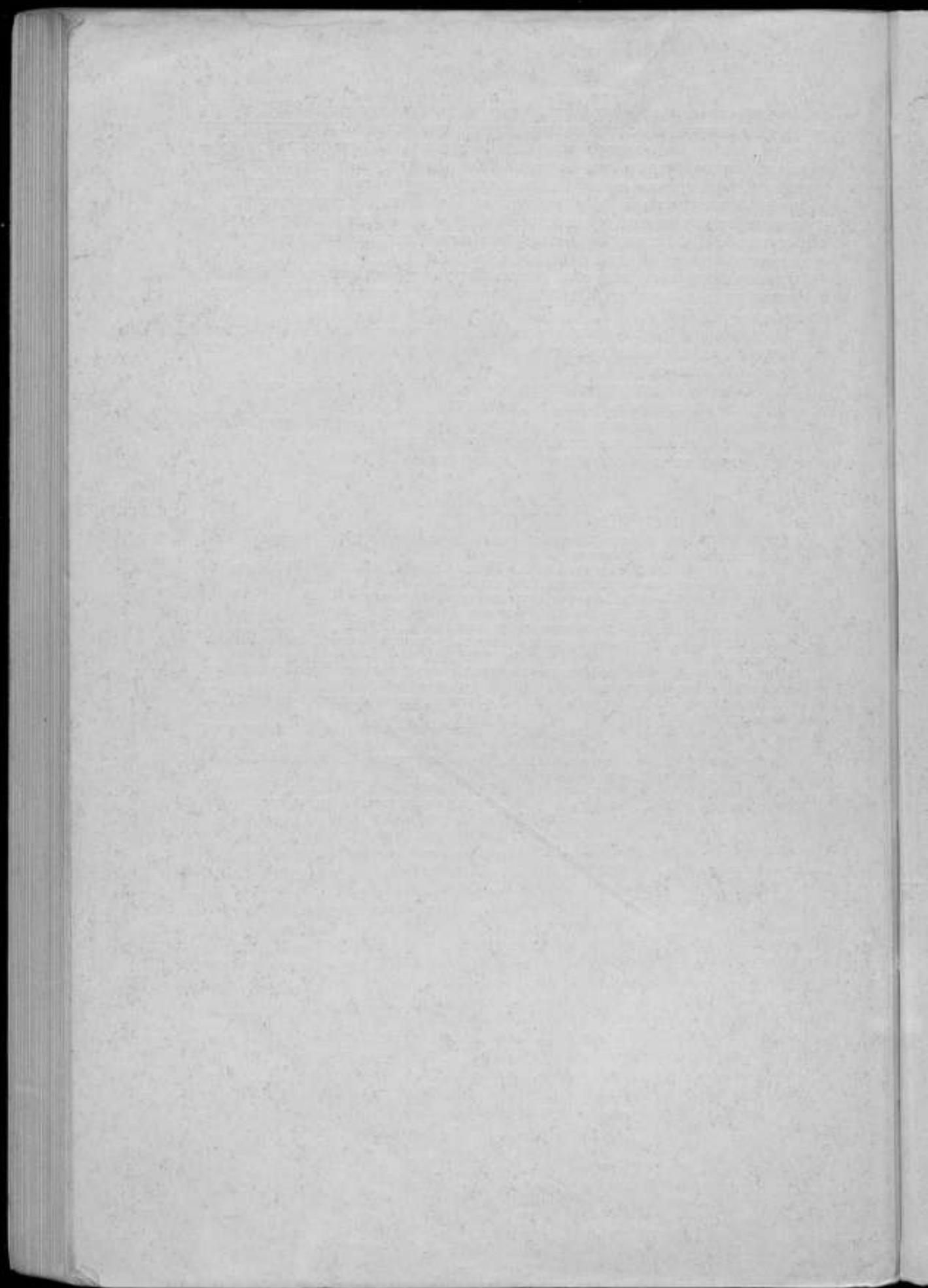
Проекционный резольвометр типа РР-2 экспонировался в 1963 г. на Всесоюзной выставке достижений народного хозяйства и был отмечен серебряной медалью.

Во ВНИИМ будут продолжены работы по повышению точности резольвометрических измерений в стране.

Ближайшей целью является решение ряда метрологических задач черно-белой и цветной сенситометрии применительно к ультрафиолетовым, инфракрасным и специальным излучениям.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 2817—50. Фотографические материалы на прозрачной подложке. Метод общесенситометрического испытания.
2. Коридорф В. А., Черный И. А., Труды ВНИИМ, вып. 26(86), 1955, стр. 85.
3. Поверочные схемы, Стандартгиз, 1960, стр. 58.
4. Инструкция 273—58 по проверке сенситометров, Стандартгиз, 1958.
5. Коридорф В. А., Труды ВНИИМ, вып. 16(76), 1951, стр. 50.
6. Коридорф В. А., Успехи научной фотографии, т. IV, 1955, стр. 67.
7. ГОСТ 2653—44. Основные понятия и величины фотографической сенситометрии. Терминология.
8. ГОСТ 2819—45. Фотографические материалы на прозрачной подложке. Метод резольвометрического испытания.
9. Коридорф В. А., Черный И. А., «Оптико-механическая промышленность», № 5, 1959, стр. 16.
10. Коридорф В. А., Черный И. А., «Новые измерительные приборы и методы их поверки», вып. 4, 1961, стр. 32.
11. Коридорф В. А., Черный И. А., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 56(116), 1961, стр. 118.
12. Коридорф В. А., Черный И. А., ЖНИПФик, № 6, 1961, стр. 454.
13. Коридорф В. А., Черный И. А., Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов, вып. 56(116), 1961, стр. 124.



## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие . . . . .	3
В. В. Бойцов. 130 лет со дня рождения Д. И. Менделеева и 70 лет ВНИИМ (Вступительное слово) . . . . .	5
В. О. Арутюнов. Д. И. Менделеев — метролог . . . . .	12
Е. Т. Чернышев. Главная палата мер и весов — ВНИИМ (созданная Д. И. Менделеевым) за 70 лет существования . . . . .	24
К. П. Широков. Поверочные схемы как основа метрологического обслуживания народного хозяйства СССР . . . . .	33
Б. Н. Олейник, К. П. Широков. О переходе в СССР на Международную систему единиц (СИ) . . . . .	41
С. В. Горбачевич. Работы ВНИИМ в области основных констант . . . . .	44
Б. М. Яновский. Работа ВНИИМ по созданию эталонов абсолютных электрических единиц . . . . .	51
Т. Б. Рождественская. Метрологические работы в области измерения тока, напряжения и мощности при повышенных частотах . . . . .	65
Е. Н. Чечурина. Магнитные измерения характеристик материалов в переменных полях . . . . .	76
Е. Д. Колтик. Работы ВНИИМ в области фазовых измерений . . . . .	83
Н. Р. Батарчукова. Работы ВНИИМ по воспроизведению метра в длинах световых волн . . . . .	92
И. И. Киренко. Развитие термодинамической температурной шкалы	102
Ф. З. Алиева. Развитие платиновой термометрии . . . . .	109
А. Н. Гордов. Измерения переменных температур . . . . .	115
Б. Н. Олейник. Работы в области измерения тепловых величин . . . . .	123
Л. К. Каяк, А. Н. Корблева. Дилатометрические измерения . . . . .	127
Д. К. Козлов. О состоянии и перспективах работ в области физико-химических измерений . . . . .	135
К. К. Аглицев. Измерения ионизирующих излучений . . . . .	142
И. А. Ярицына. Нейтронные измерения . . . . .	147
М. Ф. Юдин. Дозиметрия ионизирующих излучений . . . . .	152
Ф. М. Караев. Измерения активности радиоактивных источников . . . . .	160
С. А. Шестопалова. Ядерная спектроскопия . . . . .	175
В. Н. Титов. О развитии работ по измерению времени и частоты в СССР	180
Д. П. Марковский. Измерение коротких промежутков времени . . . . .	184
Б. Е. Рабинович. Точные измерения мощности и напряжения на высоких частотах . . . . .	191

	Стр.
Л. П. Блинова. Акустические измерения во ВНИИМ . . . . .	203
Е. Ф. Додинский. Измерение давлений . . . . .	211
М. А. Гуляев. Измерение вакуума . . . . .	218
Б. И. Пилипчук. Измерение твердости . . . . .	229
В. Л. Лассан. Измерение перемещений, скоростей и ускорений . . . . .	238
В. С. Шхаликов. Точные измерения параметров вибраций . . . . .	243
Н. А. Смирнова. Развитие работ по измерению массы . . . . .	252
В. Е. Каргашевская. Световые измерения во ВНИИМ . . . . .	258
Е. Н. Юстова. Цветовые измерения . . . . .	265
В. А. Корндорф. Сенситометрические измерения . . . . .	271

Редактор издательства *Н. Н. Александрова*

Техн. редактор *К. М. Волчок*

Корректор *Л. Е. Дмитриева*

Подписано в печать 21/1 1965 г.

Уч.-изд. л. 24,06.

Формат бумаги 70×108<sub>16</sub>

Печ. л. 17,5 и 1 вклейка

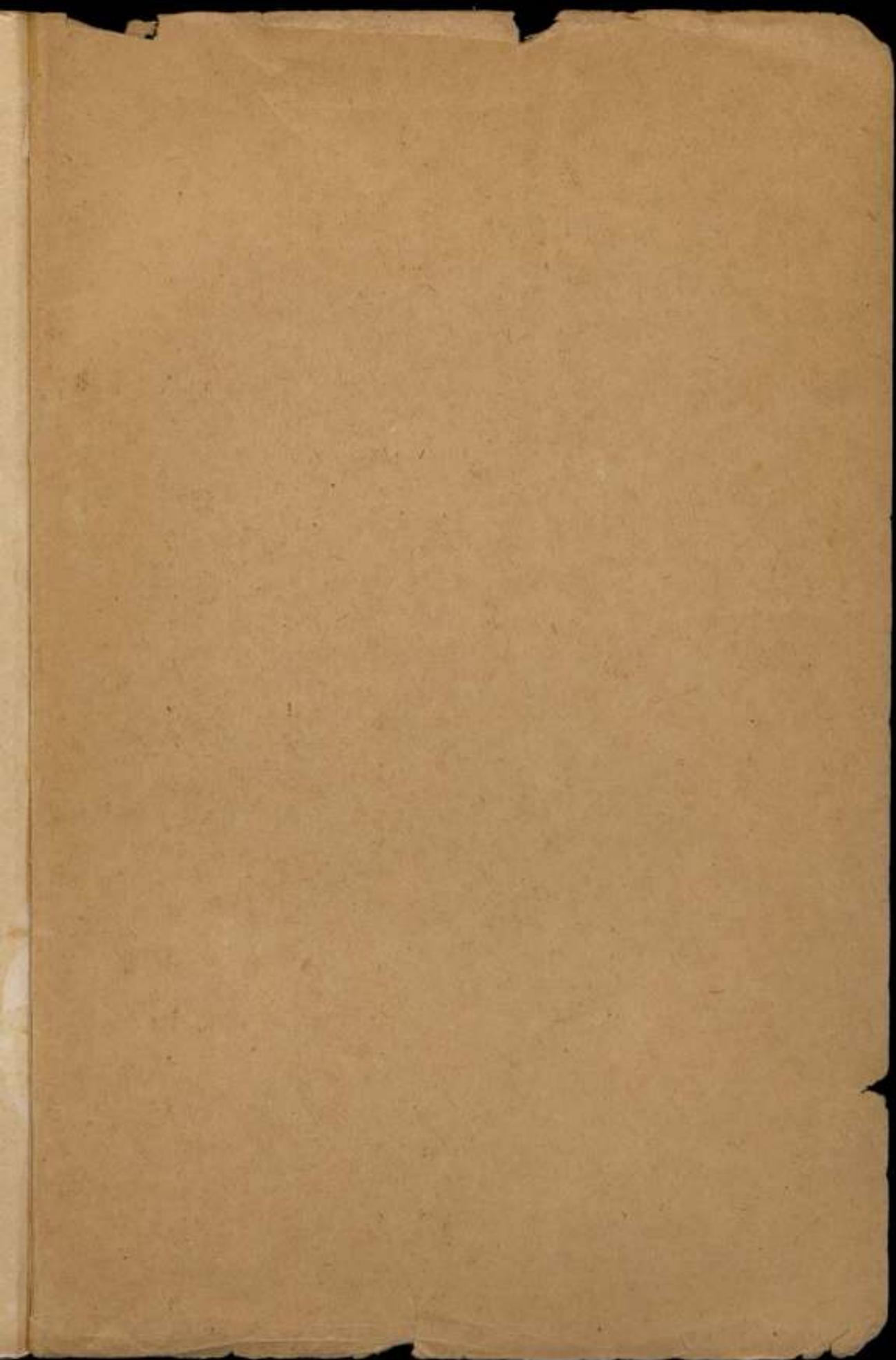
М-20031.

Тираж 1000

Цена 1 р. 68 коп.

Заказ 1630

Картофлянка ВМФ



Цена 1 р. 68 к.