

КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

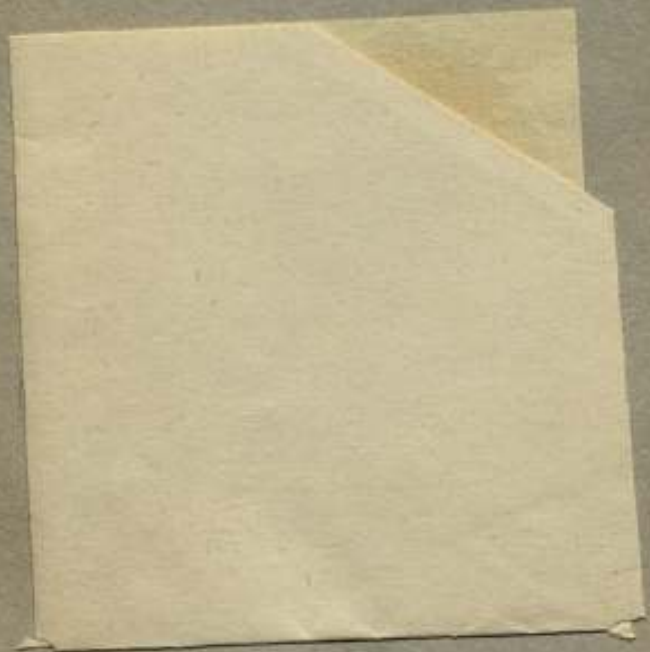
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ им. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

**РАБОТЫ
В ОБЛАСТИ ХИМИИ
И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ**

ТРУДЫ ВНИИМ

ВЫПУСК 5(60)

ИЗДАНИЯ ВНИИМ
ЛЕНИНГРАД 1947



КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

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

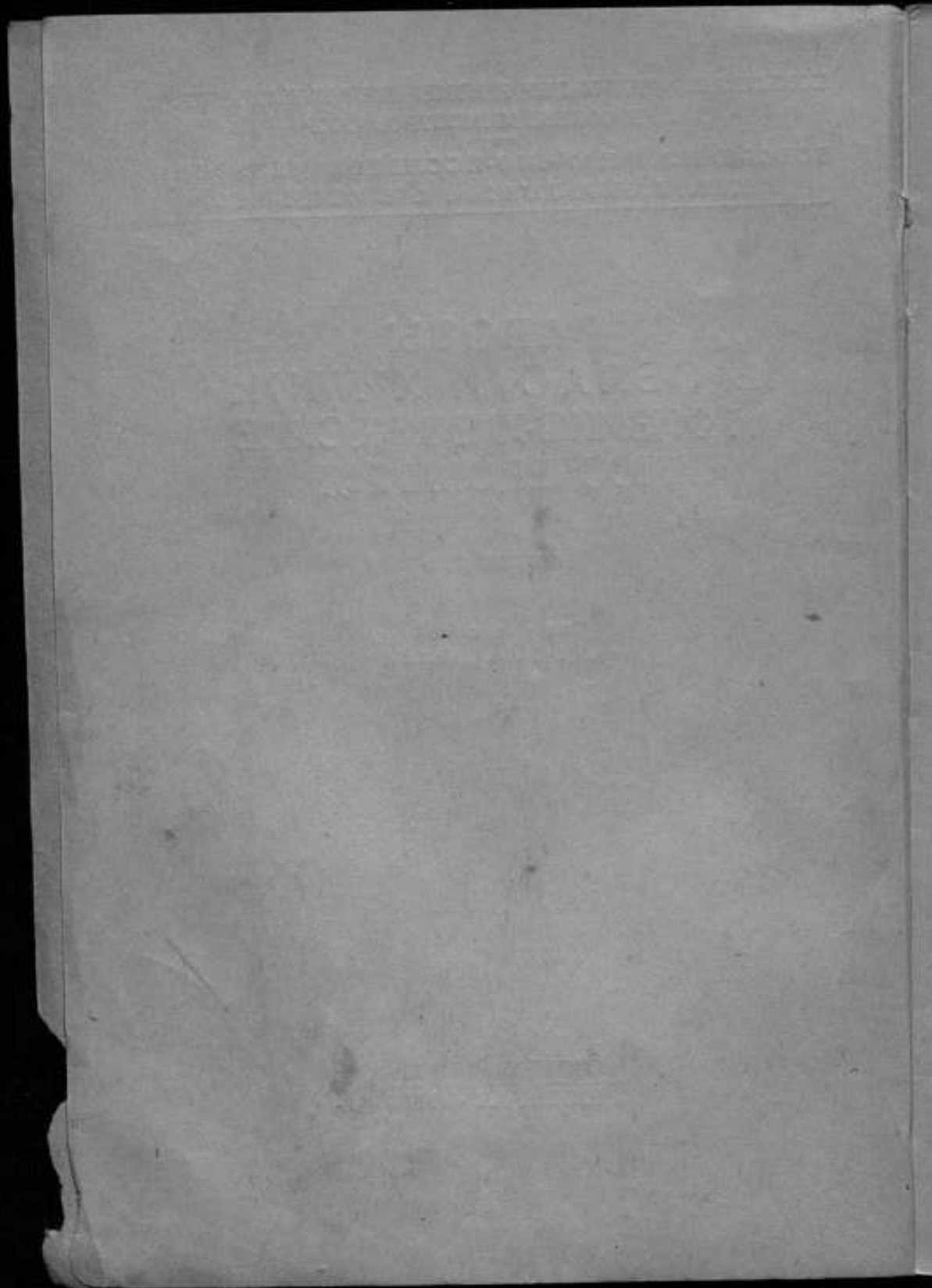
РАБОТЫ
В ОБЛАСТИ ХИМИИ
И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ

ВЫПУСК 5 (60)

Под редакцией
проф. С. В. ЛИПИНА



ИЗДАНИЕ ВНИИМ
ЛЕНИНГРАД · 1947



ОТ РЕДАКТОРА

Настоящий сборник содержит главнейшие работы, выполненные химической и ареометрической лабораториями еще до войны, но не опубликованные в условиях военного времени, а также работы, химической лаборатории, относящиеся к послевоенному периоду.

Различный тематический характер публикуемых ниже статей определяется разнохарактерностью работ, выполняемых химической лабораторией в зависимости от тех или иных запросов метрологии. Объединяющим их признаком является их метрологический характер.

Три первых работы предназначены служить основой при установлении единообразия измерений вязкости жидкостей, производимых при помощи двух приборов различного типа — капиллярных вискозиметров и вискозиметров Энглера.

Работа профессора А. Ф. Добрянского и В. Н. Кучинского не относится непосредственно к методике измерения вязкости. Она имеет, главным образом, практический интерес, но основывается на результатах весьма точных измерений, выполненных в химической лаборатории ВНИИМ в целях удовлетворения нужд нефтяной промышленности.

В связи с развитием гидрологических исследований, ценным вкладом в область измерения плотности морской воды является работа М. Д. Иппиц „Ареометр полного погружения“.

Работа М. А. Айзикович, в которой описана разработанная ею конструкция прибора для возгонки органических веществ, имеет более специальный характер и связана с текущей работой химической лаборатории по изготовлению стандартного препарата бензойной кислоты с определенной теплотой горения, служащего для определения водяного эквивалента калориметров, предназначенных для определения теплотворной способности топлива.

Две последних статьи представляют собой доклады, отмечающие особые даты в жизни Всесоюзного Института Метрологии — 100-летие государственной службы мер и весов СССР и 40-летие со дня смерти основателя Института, гениального русского ученого Д. И. Менделеева.

С. Липин

Э. П. ХАЛФИН

О ВЕРОЯТНЕЙШЕМ ЗНАЧЕНИИ ВЯЗКОСТИ ВОДЫ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ВБЛИЗИ 20° С

1. ОБЗОР ИМЕЮЩИХСЯ ДАННЫХ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Абсолютное значение вязкости воды при температурах около 20° С определялось неоднократно различными авторами и разными методами. Результаты некоторых определений, выполненных наиболее тщательно, приведены для сравнения в табл. 1.

В первом столбце таблицы даны номера определений, на которые мы будем ссылаться в дальнейшем, во втором столбце — температура, при которой производилось определение, в третьем — полученное значение вязкости, в четвертом — погрешность определения, либо непосредственно указанная автором, либо вычисленная нами из приводимых в статьях данных, в пятом столбце — метод, которым произведено определение вязкости, в шестом — автор, в седьмом, последнем столбце — ссылка на литературу, приведенную в конце настоящей статьи.

При рассмотрении этой таблицы видно, что данные, полученные различными авторами при одинаковых температурах, расходятся между собой гораздо больше, чем это соответствует погрешностям в отдельных работах. Это расхождение становится особенно резко заметным, если величины η , измеренные при различных температурах, привести к одной температуре.

В табл. 2 даны значения вязкости, помещенные в табл. 1, и эти же данные, приведенные к температуре 20° С. Для пересчета мы пользовались температурным коэффициентом вязкости, вычисленным из сводной таблицы вязкости воды, данной Бингемом и Джэксоном [13].

Расхождение между температурными коэффициентами, вычисленными из этой таблицы и из другой известной сводной таблицы (International Critical Tables, 1929 г.; Техническая Энциклопедия, справочник, X, стр. 89), практически роли не играет, так как не превышает 1—2 единиц третьего знака после запятой.

Если каким-либо автором делались наблюдения при нескольких температурах в интервале 15—25° С, в таблице приведено

среднее значение величин вязкости, пересчитанных на 20° С; такие величины отмечены звездочкой.

Таблица 1

№	t° С	η	$\Delta\eta$	Метод	Автор	Литература
1	17	1,112	$\pm 0,003$	Затухание крутильных колебаний шара в жидкости	König	[1]
2	17	1,089		Истечение через капилляр	Poiseuille	[2]
3	17,5	1,065	1%	Затухание крутильных колебаний шара, наполненного жидкостью	Ladenburg	[3]
4	17,5	1,069	0,3—0,5%	Тоже	Andrade и Chiong	[4]
5	19,1	1,031	$\pm 0,005$	Вращение внешнего цилиндра относительно концентрического внутреннего	Shwezon	[5]
6	19,1	1,039	1%	См. № 3	Ladenburg	[3]
7	20	1,018		Вращение внешнего цилиндра относительно концентрического внутреннего	Leroux	[6]
8	20	1,021	$\pm 0,002$	Тоже	Drew	[7]
9	20	1,014		Затухание крутильных колебаний полого цилиндра, наполненного жидкостью	Mützel	[8]
10	20	1,008		Истечение через капилляр	Stotte	[9]
11	20	1,005	$\pm 0,001$	Истечение через капилляр	Bingham и White	[10]
12	20	1,003		Тоже	Sprung	[20]
12	20,13	1,024		Истечение через капилляр	Stephan	[11]
13	25	0,893	$\pm 0,002$	Тоже	Hosking	[12]
14	25	0,895		Как № 4	Andrade и Chiong	[4]

Из последней таблицы особенно ясно видно, что расхождение между отдельными результатами настолько велико, что простое усреднение их не может дать вероятнейшего значения вязкости воды при 20° С. Необходимо произвести анализ работ, отобрать из них наиболее тщательно выполненные, наиболее достоверные и уже из этих, более надежных данных, определить искомую вязкость.

Сводные таблицы для значений вязкости на основе анализа имеющихся работ были даны Бингэмом и Джексоном [13] и Дорсай (International Critical Tables изд. 1929 г.). Чем руководствовались авторы, устанавливая среднее значение вязкости,

в литературе не указано, то есть остается неясен принцип и метод отбора результатов. Обе сводные таблицы значительно различаются между собой, как это видно из табл. 3.

Таблица 2

η	$\Delta\eta$	Метод	№ по табл. 1	Автор	Литература
1,026	$\pm 0,003$	Затухание крутильных колебаний шара в жидкости	1	König	[1]
1,007*	$\pm 0,004$	Затухание крутильных колебаний шара, наполненного жидкостью	3	Ladenburg	[3]
1,005	$\pm 0,003$		4	Andrade и Chiong	[4]
1,005	$\sim 1\%$		Вращение внешнего шара относительно концентрического внутреннего		Zempen и Pogany
1,014		Затухание крутильных колебаний полого цилиндра, наполненного жидкостью	9	Mützel	[8]
1,008	$\pm 0,001$	Вращение внешнего цилиндра относительно концентрического внутреннего	5	Шведов	[5]
1,018			7	Leroux	[6]
1,01			8	Drew	[7]
1,026				Gurney	[19]
1,011	$\pm 0,001$		2	Poiseuille	[2]
1,008			10	Slotte	[9]
1,005			11	Bingham и White	[10]
1,032	$\pm 0,003$	Истечение через капилляр	14	Traube	[15]
1,008	$\pm 0,002$			Hosking	[16]
1,004	$\pm 0,003$			Hosking	[12]
1,0015	$\pm 0,001$			Tharpe и Rodger	[17]
1,003				Spring	[20]

Таблица 3

Темп. °C	Вязкость		Темп. °C	Вязкость	
	Bingham и Jackson	Dorsay		Bingham Jackson	Dorsay
15	1,1404	1,144 ₇	21	0,9810	0,984 ₃
16	1,1111	1,113 ₀	22	0,9579	0,960 ₈
17	1,0828	1,087 ₁	23	0,9358	0,938 ₀
18	1,0559	1,060 ₂	24	0,9142	0,916 ₁
19	1,0299	1,034 ₀	25	0,8937	0,894 ₉
20	1,0050	1,008 ₇	26	0,8737	0,874 ₈

Мы видим, что данные International Criticale Tables почти на $\frac{1}{2}\%$ выше данных Бингэма и Джэксона. Таким образом, несмотря

на большое число выполненных работ значения вязкости воды, которым можно было бы пользоваться как вталонным, до сих пор не получено.

Крупнейший авторитет по вопросам вязкости — Бингэм пишет, что критическое рассмотрение всех опубликованных исследований по вязкости воды приводит к заключению, что ни одна из работ не удовлетворяет всем требованиям точности и надежности, которые предъявляются к эталонным измерениям. Как выход Бингэм предлагает поставить вопрос об определении вязкости воды в ряде крупнейших метрологических институтов.

В настоящей работе мы пытаемся на основании анализа экспериментальных данных установить вероятнейшее значение вязкости воды при 20°C и близких температурах, в пределах той точности, которую дают лучшие из имеющихся измерений.

II. ЗАВИСИМОСТЬ ВЯЗКОСТИ ВОДЫ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

При анализе опубликованных работ необходимо иметь какой-либо объективный критерий, позволяющий оценить степень достоверности полученных автором результатов. Иногда автор сам указывает погрешность своих наблюдений, иногда по приводимым в статьях величинам или из протоколов, можно оценить среднюю погрешность опыта. Но, во-первых, такие данные приводятся авторами не всегда и, во-вторых, они позволяют оценить среднюю случайную погрешность опыта, но не дают никаких указаний на наличие возможных систематических погрешностей. Между тем наиболее вероятно, что именно систематические погрешности обуславливают то расхождение данных, которое видно из табл. 1 и 2.

Если автором производилось измерение вязкости жидкости при различных температурах, то критерием надежности полученных им результатов до известной степени может служить отношение найденных значений вязкости при различных температурах.

Зависимость вязкости воды от температуры определялась неоднократно различными авторами. Если, как это обычно бывает, определения ведутся в одном и том же приборе, то в отношении вязкостей константы приборов не входят (или входят только в поправки), и мы имеем дело с относительными измерениями, всегда более точными, чем абсолютные. Поэтому можно ожидать, что отношения вязкостей при разных температурах будут определены с большей степенью точности, чем абсолютные значения вязкости.

В табл. 4 приведено отношение вязкости воды при 25°C к вязкости при 0°C , определенное различными наблюдателями. Метод во всех случаях был один и тот же — истечение жидкости через капилляр.

Мы видим, что, действительно, отношения вязкостей при 25°

Таблица 4

	Bingham White [10]	Hosking [12]	White Twining [21]	Washburn Williams [22]	Applebey [23]
η_{25}/η_0	0,4979	0,4981	0,4978	0,4974	0,4984

Как среднее, получаем $\eta_{25}/\eta_0 = 0,4979 \pm 0,00025$.

и при 0°, полученные разными авторами, совпадают с очень большой степенью точности (0,05%). Это позволяет нам пользоваться отношением η_{25}/η_0 , как критерием надежности величин, полученных другими авторами.

Необходимо оговорить, что этот критерий является односторонним. Если отношение η_{25}/η_0 , полученное каким-либо автором, сильно расходится с приведенной выше величиной, то это дает нам серьезное основание подозревать наличие ошибки в эксперименте. Наоборот, совпадение отношения η_{25}/η_0 с величиной 0,4979 еще не гарантирует правильности абсолютных значений η_{25} и η_0 . Например, погрешность в определении диаметра капилляра не скажется на отношении η_{25}/η_0 , но значительно скажется на абсолютных значениях η .

Применим этот критерий к анализу сводных таблиц, составленных Бингэмом и Джэксоном [13] и Дорсай. К сожалению, точных измерений относительной вязкости воды в интервале 0—50° С произведено очень немного, и материал для сравнения незначителен.

В следующей табл. 5 отношения вязкости при разных температурах, взятые из таблиц Бингэма и Джэксона и Дорсай, сопоставлены с экспериментальными данными. (Мы отказываемся от

Таблица 5

t °C	White и Twining [21]	Washburn и Williams [22]	Hosking [12]	Bingham и Jackson [3]	Dorsay
0	1	1	1	1	1
5	0,8471	—	—	0,8475	0,8467
10	0,7269	—	—	0,7303	0,7301
15	0,6335	—	—	0,6363	0,6385
18	—	0,5898	—	0,5892	0,5911
20	0,5578	—	—	0,5608	0,5622
25	0,4979	0,4974	0,4981	0,4987	0,4989
50	—	0,3064	0,3067	0,3066	0,2062

использования данных Бингэма и Уайта [10], так как именно базируясь на них, составили свою таблицу Бингэм и Джексона. Для проверки же выгоднее сравнивать интерполированные значения с какими-либо независимыми изменениями.)

Из этой таблицы видно, что вообще при незначительном расхождении между таблицами числа Бингэма и Джексона лежат несколько ближе экспериментальным данным, чем числа Дорсай. Руководствуясь этим, мы пользовались первой из этих таблиц при приведении вязкости к температуре 20°C (табл. 2).

Остановимся еще на погрешности, которую мы можем совершить при пересчете вязкостей от одной температуры к другой. Как видно из табл. 5, расхождения между значениями, взятыми из таблицы Бингэма и Джексона, и данными непосредственных измерений составляют не больше 2—3 единиц третьего знака после запятой. Того же порядка может быть погрешность при пересчете. Однако если учесть, что пересчитываются значения вязкости, полученные при температурах близких 20°C и что расхождение между табличными и экспериментальными данными частично обусловлено и неточностью экспериментальных данных, мы можем оценить погрешность пересчета не более чем в 1—2 единиц третьего знака после запятой.

III. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ

Всякий метод, предназначенный для установления точного абсолютного значения какой-либо величины, должен удовлетворять следующим требованиям:

1. Быть точным, просчитываемым до конца, то есть в окончательное выражение для измеряемой величины не должны входить какие-либо поправки ad hoc или эмпирические, не рассчитываемые коэффициенты.

2. Допускать возможность прецизионного измерения всех величин, входящих в выражение для измеряемой величины.

3. Обеспечить возможность создания условий, необходимых для поддержания постоянства измеряемой величины во все время измерений (для вязкости таким существенно важным условием является поддержание постоянства температуры).

Рассмотрим существующие методы измерения вязкости с этой точки зрения.

1. Вращение внешнего шара относительно концентрического внутреннего

Исследуемая жидкость заполняет пространство между двумя концентрическими шарами. При вращении внешнего шара на внутренний шар действует закручивающий момент. Измерив этот момент (по закручиванию подвески внутреннего шара),

можно, зная размер шаров и скорость вращения шара, определить вязкость жидкости.

Теория метода исходит из общих уравнений Навье-Стокса, с обычным пренебрежением членами порядка выше первого, то есть метод применим только при малых скоростях вращения внешнего шара.

Для шара пограничные условия определены вполне точно, и поэтому метод является хотя и громоздким, но просчитываемым до конца, то есть удовлетворяет первому из перечисленных выше условий.

Однако технически этот метод сложен. Значительные трудности представляет точное измерение угла закручивания внутреннего шара (см. ниже анализ работы Гурней). Кроме того, из-за больших размеров установки трудно обеспечить постоянство температуры.

Измерения по этому методу производили Цемплен и Погани [14]. Полученные ими значения вязкости воды при 18°C колеблются от 1,046 до 1,089 *сг* (для одной пары шаров) и от 1,009 до 1,039 *сг* (для второй пары). Большой разброс внутри одной серии и, особенно, систематическое расхождение результатов с двумя парами шаров заставляет признать полученные этим методом результаты недостаточно надежными, для того, чтобы учитывать их при определении вероятного значения вязкости воды.

2. Затухание крутильных колебаний шара, наполненного жидкостью

Полый шар, наполненный испытуемой жидкостью, подвешивается на упругом подвесе и его заставляют совершать свободные крутильные колебания. Из-за существования градиента скорости в жидкости внутри шара происходит перенос количества движения в жидкость, тем самым перенос энергии и ее рассеяние, и колебания затухают. Зная размеры шаров, период и декремент колебаний, можно вычислить вязкость жидкости, заполняющей шар.

Как и в случае вращения шара, теория, хотя и очень громоздка и с рядом приближений, позволяет произвести расчет до конца.

В руках Ладенбурга [3] и Андраде и Хюнга [4] этот метод дал результаты очень близкие друг к другу и со сравнительно небольшим расхождением отдельных наблюдений (см. табл. 2).

3. Вращение внешнего цилиндра относительно концентрического внутреннего

По идее метод полностью подобен методу вращения внешнего шара (см. 1). Однако условия точного расчета и, тем самым, возможность применения этого метода для прецизионных измерений значительно неблагоприятнее.

Момент, действующий на единицу длины внутреннего цилиндра при вращении внешнего, может быть точно вычислен и притом довольно просто, для случая бесконечно длинных цилиндров. С большими трудностями и с рядом приближений он может быть вычислен для случая конечных цилиндров в бесконечной жидкости. Единственно же практически осуществимый случай — цилиндры конечных размеров в конечном сосуде — вообще не поддается расчету.

Экспериментаторы, работавшие по этому методу, прибегали к искусственным приемам и различным ухищрениям, чтобы создать условия, эквивалентные случаю двух бесконечно длинных цилиндров. Так, например, Гурней [19] пользовался двумя внутренними цилиндрами разной длины и, исходя из предположения, что влияние концов для обоих цилиндров одинаково, переходил к „идеальному“ цилиндру, длиной равной разности длин обоих цилиндров. Но основное предположение Гурнея — одинаковое влияние концов — кажется несостоятельным, так как расстояние между торцом цилиндра и дном сосуда (и поверхностью жидкости) в обоих случаях различно. Без специальной проверки этот прием не может считаться достоверным.

Другой прием перехода к бесконечному цилиндру заключается

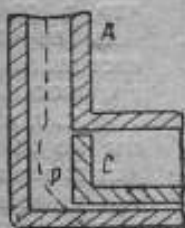


Рис. 1

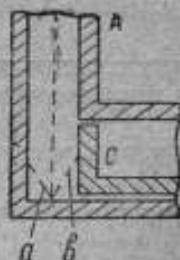


Рис. 2

в применении „охранных“ цилиндров. Закручиваемый цилиндр помещается между двумя другими цилиндрами, служащими его продолжением вверх и вниз. Однако при этом неизбежен зазор между цилиндрами, влияние которого учесть невозможно. Кроме того, если даже считать, что таким путем исключается влияние краев цилиндра, то влияние дна сосуда и свободной поверхности жидкости совершенно не исключается, но может быть весьма заметным. Дру [7], работая, правда, с коротким охранным цилиндром, нашел, что он недостаточен, и что нужно еще специальные устройства, обеспечивающие цилиндричность поверхностей равных скоростей. На рис. 1, заимствованном из статьи Дру, показана форма поверхности равных скоростей P вблизи дна A сосуда при наличии обычного охранного цилиндра C ; на рис. 2 — дополнительные насадки a и b , с помощью

которых Дру добился цилиндрической формы поверхностей.

Как видно, метод вращения внешнего цилиндра относительно концентрического внутреннего не может быть до конца рассчитан, потому что эксперимент ставится в условиях, отличных от тех, которые положены в основу теории. Таким образом этот метод непригоден для установления вероятного значения вязкости жидкости.

В 1925 г. появилась работа Леру [6], сделанная этим методом. Несмотря на обстоятельность работы и кажущуюся тщательность ее, результаты вызывают сомнения, так как температурная зависимость вязкости по Леру сильно отличается от той, которая дается другими наблюдениями (см. выше раздел II настоящей статьи). По данным Леру, можно вычислить отношение η_{25}/η_0 и оно оказывается равным

$$\eta_{25}/\eta_0 = 0,5075,$$

вместо выведенного выше среднего значения

$$\eta_{25}/\eta_0 = 0,4979 \pm 0,00025.$$

Такое большое расхождение (2%) лежит далеко за пределами возможных случайных погрешностей и свидетельствует о том,

что в работе Леру есть неучтенная им систематическая погрешность.

Исходя из этого, мы не считаем возможным пользоваться данными Леру, при всей кажущейся их тщательности, при вычислении вероятного значения вязкости воды.

Помимо теоретического несовершенства метода вращения внешнего цилиндра относительно концентрического внутреннего, этот метод представляет и значительные экспериментальные трудности и может

дать заметную ошибку. В цитированной выше статье Гурнея приведен запись отклонений внутреннего цилиндра, как функ-



Рис. 3

ции времени после включения мотора, вращающего внешний цилиндр (рис. 3.)

Из этого рисунка видно, что окончательное отклонение цилиндра не является строго постоянной величиной, а колеблется неравномерно, причем амплитуда этих колебаний достигает 0,5% всего отклонения. Естественно, что при таких условиях погрешность опыта может быть довольно большой. Каков характер отклонения в других случаях, авторы не указывают, но, несомненно, трудно добиться постоянства отклонения до сотых долей процента, которые требуются для прецизионных измерений.

4. Затухание крутильных колебаний полого цилиндра, наполненного жидкостью

Принцип метода таков же, как для случая затухания крутильных колебаний шара (см. выше п. 2).

Как и в случае закручивания внешнего цилиндра, теория не может быть доведена до конца, и метод непригоден для установления точных значений вязкости.

Резюмируя все сказанное о перечисленных методах, мы приходим к выводу, что, ввиду теоретических и экспериментальных трудностей, ни один из них не может быть рассматриваем, как основной при определении вероятного значения вязкости. Как указывает один из авторов, работавших по аналогичному методу, „математические основы этих методов очень громоздки, и экспериментальные исследования ставятся больше для проверки теории, чем для получения точных значений коэффициента внутреннего трения“ [24].

5. Истечение через капилляр

Исследуемая жидкость протекает через капилляр, диаметр и длина которого известны. По размерам капилляра по скорости течения и разности давлений на концах капилляра можно вычислить значение коэффициента внутреннего трения жидкости.

Этот метод выгодно отличается от перечисленных выше и своей теоретической простотой и относительной простотой эксперимента. Так как именно этим методом произведены лучшие исследования по измерению вязкости, мы остановимся на нем несколько подробнее (теорию метода см., например, Барр. Вискозиметрия, стр. 13—35).

Если принять, что вся разность давлений на концах капилляра расходуется на преодоление сил трения в капилляре, то вязкость жидкости определяется из уравнения

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta p l}{8 l V}, \quad (1)$$

где r — радиус капилляра,
 l — длина его

V — объем жидкости, протекшей через капилляр за время t при разности давлений Δp .

Однако разность давлений расходуется не только на преодоление сил трения, но и на ускорение жидкости — на создание кинетической энергии струи. При введении этой поправки формула (1) примет вид:

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta p t}{8 V} - m \frac{\rho V}{8 \pi r t}, \quad (2)$$

где ρ — плотность жидкости и

m — численный коэффициент, зависящий от режима входа и выхода жидкости из капилляра и изменяющийся в довольно широких пределах [27, 28].

Наконец, нужно еще учесть возможность того, что жидкость может испытывать сопротивление не только при движении внутри капилляра, но и вне его, в толще жидкости. Это эквивалентно тому, что „эффективная“ длина капилляра будет больше его геометрической длины. Обычно это „увеличение длины“ выражается в долях радиуса.

$$l_{\text{эф}} = l_{\text{geom}} + nr,$$

где n — эмпирически устанавливаемый численный коэффициент.

Окончательная формула для вязкости принимает вид:

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta p t}{8 V (l + nr)} - m \frac{\rho V}{8 \pi r t (l + nr)}, \quad (3)$$

Мы видим, что теория метода истечения через капилляр до конца не просчитывается, так как в формулу (3) входят постоянные m и n , не могущие быть вычисленными теоретически.

Несмотря на это, метод истечения через капилляр позволяет получить абсолютное значение вязкости с большой точностью. Во-первых, величины m и n могут быть определены опытным путем для установки, в которой производится измерение вязкости, и во-вторых, условия эксперимента можно подобрать такими, что второй член формулы (3) будет мал по сравнению с первым, а величина nr — мала по сравнению с l . При этих условиях некоторая возможная неточность в определении величин m и n мало скажется на значении η .

Определению величин m и n посвящен целый ряд исследований. Для вискозиметров типа Торпе и Роджера, которыми произведены наиболее точные измерения, Госкинг [12] нашел следующие данные

$$m = \text{от } 1,13 \text{ до } 1,21, \text{ среднее } 1,16,$$

$$n = 0.$$

Риман [26], специально изучавший этот вопрос, нашел для

капилляров, обрезанных под прямым углом (то есть употребляемых в вискозиметрах типа Торпе и Роджера), значение

$$m = 1,124 (\pm 0,006),$$

которое совпадает с выведенным Бусинеском, из общих соображений значением $m = 1,12$.

В пределах достигнутой до настоящего времени точности при измерении вязкости, погрешность до нескольких сотых в определении m не играет практически никакой роли. В дальнейшем мы будем пользоваться для расчетов общепринятым значением $m = 1,12$ и полагать, в соответствии с результатами большинства исследований, $n = 0$.

Именно методом истечения через капилляр получены наиболее точные значения для коэффициента внутреннего трения воды. Американская Society of Rheology постановив выбрать за эталон вязкости вязкость воды при 20°C , наметила, как метод измерения ее, метод истечения через капилляр [25].

IV. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНЕЙШЕГО ЗНАЧЕНИЯ ВЯЗКОСТИ ВОДЫ ПРИ 20°C И БЛИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ПО ОПУБЛИКОВАННЫМ РАБОТАМ

После того, как Пуазейлем был указан метод и произведены первые измерения, целый ряд авторов определял вязкость воды по истечению через капилляр (см. сводку в табл. 2).

Первые работы, естественно, не обладают той степенью точности, которая присуща более поздним исследованиям, в которых учтен опыт всех предыдущих работ. В первых работах не обращалось, например, зачастую внимания на условия вытекания жидкости из капилляра, так что сейчас трудно определить необходимое значение величин m и n и произвести пересчет полученных величин. Например, следует упомянуть, что в V издании таблиц Ландольдта и Бернштейна значение η_{20} для воды, вычисленное редактором таблиц (Штекелем) из результатов Спринга, равно $1,03 \text{ сП}$, а в I дополнительном томе другим редактором (Егск'ом) из тех же данных вычислено $\eta_{20} = 0,9978 \text{ сП}$. Форма сосудов вискозиметра не обеспечивала достаточно точного определения объема протекшей жидкости, среднего давления на жидкость и т. д. Поэтому мы воспользуемся данными старых работ только как ориентировочными, а окончательный результат выведем из более поздних работ, выполненных с максимальной тщательностью.

В своей сводке Бингем и Джэксон дают следующие (обработанные) значения η_{20} :

Пуазейль (1846 г.)	— 1,006 сП
Саотте (1883 г.)	— 1,007 сП
Спринг (1876 г.)	— 0,998 сП

Перейдем теперь к рассмотрению более новых работ.

1. Работа Торпе и Роджера [17]. Эта работа является по существу первым прецизионным исследованием по вискозиметрии, в котором обращено должное внимание как на тщательность постановки опыта, так и на точность измерения и вычисления всех входящих в формулу (3) величин. Построенный авторами вискозиметр, с небольшими изменениями, применялся и всеми последующими исследователями. Так как вискозиметр этот уже неоднократно описывался (см., например, Барр „Вискозиметрия“, стр. 47; Гатчек „Вязкость жидкостей“, стр. 49), мы не будем останавливаться на описании его конструкции.

Капилляр Торпе и Роджера имел длину 49,3 мм, диаметр 0,16 мм. Скорость течения воды при температурах вблизи 20°C составляла около 30—40 см/сек., что соответствует числу Рейнольдса $Re \approx 50-60$. При этих значениях Re течение полностью ламинарное и формула (3) применима.

Поправка на кинетическую энергию в опытах Торпе и Роджера была невелика. Для воды при 5° она составляла 0,16%, при 22°C — 0,4%. Поправка вычислена авторами, полагая $n=1$. Величину n в формуле (3) авторы полагали равной нулю. Торпе и Роджер получили следующие данные для вязкости воды при разных температурах (табл. 6).

Таблица 6

$t^{\circ} C$	η	$t^{\circ} C$	η	$t^{\circ} C$	η
5,45	1,494	47,03	0,576	89,90	0,3165
13,53	1,181	55,53	0,501	93,09	0,289
22,02	0,955	64,01	0,4415	100,00	0,283
30,72	0,786	72,54	0,3415	—	—
39,32	0,662	80,75	0,3525	—	—

Из этих данных авторы получили интерполированием значения вязкости воды для круглых значений температуры (табл. 7).

Таблица

$t^{\circ} C$	η	$t^{\circ} C$	η	$t^{\circ} C$	η
0	1,778	35	0,720	70	0,406
5	1,5095	40	0,6535	75	0,3795
10	1,3025	45	0,597	80	0,356
15	1,1335	50	0,5475	85	0,335
20	1,0015	55	0,5065	90	0,3155
25	0,891	60	0,4680	95	0,2985
30	0,7975	65	0,4355	100	0,283

Однако, интерполяция произведена неудачно. В этом можно убедиться, вычислив разности первого и второго порядков между интерполированными значениями η . Такой расчет приведен в табл. 8, причем мы ограничились только более важной для нас областью температур от 0 до 50°C.

Таблица 8

$t^{\circ} \text{C}$	η	$\Delta \eta$	$\Delta^2 \eta$
0	1,778		
5	1,5095	0,2685	0,0615
10	1,3025	0,2070	0,0380
15	1,1335	0,1690	0,0370
20	1,0015	0,1320	0,0215
25	0,891	0,1105	0,0180
30	0,7975	0,0935	0,0160
35	0,720	0,0775	0,0110
40	0,6535	0,0665	0,0100
45	0,597	0,0565	0,0070
50	0,5475	0,0495	

Мы видим, что в наиболее важной для нас области температур, вблизи 20°C, вторая разность, $\Delta^2 \eta$ имеет очень неравномерный ход, что свидетельствует о непланном ходе основной кривой $\eta=f(t)$. Поэтому мы считаем более правильным, не пользуясь значением η_{20} по интерполированным данным Торпе и Роджера, вычислить его завоо из их экспериментальных данных.

Выберем, как наиболее близкое к нужной нам температуре, в качестве исходного значение вязкости воды при 22,02°C.

Для этой температуры авторы дают $\eta=0,955$ *сп.* Поправка на кинетическую энергию, вычисленная при $m=1$, равна 0,0037. Для $m=1,12$ поправка будет равна 0,0042 и

$$\eta_{22,02} = 0,9545 \text{ сп.}$$

Пересчет по таблице Бингэма и Джексона дает

$$\eta_{20} = 1,002 \text{ сп.}$$

Точность эксперимента авторами не указана, но по приведен-



ным в статье данным можно оценить ее величиной порядка 0,001—0,002 *сп.*

2. Работа Хоскинга 1900 г. [16]. Хоскинг пользовался вискозиметром типа Торпе и Роджера, длина капилляра была ~53,5 мм, диаметр 0,24 мм.

По приведенным в статье данным, можно вычислить, что $Re=80$, то есть течение ламинарное.

Поправка на кинетическую энергию порядка 3—4%.

Для температуры 20,72°C Хоскинг дает $\eta=0,991$ *сп.* Однако это число нужно исправить, так как Хоскинг производил расчет по формуле (3), полагая $m=1$ и $n=0,8$.

К сожалению, приводимых в статье данных недостаточно для того, чтобы точно произвести этот пересчет. Если принять по аналогии с измерениями Хоскинга при других температурах, где приведены более подробные данные, что поправка на кинетическую энергию составляет 3—4% от η , то пересчет на $m=1,12$ и $n=0$ дает $\eta_{20,72}=0,987$.

Это соответствует

$$\eta_{20}=1,006 \text{ сп}$$

с точностью порядка 0,001—0,002 *сп.*

3. Работа Хоскинга 1909 г. [12]. В этой работе Хоскинг измерял значения m и n для капилляров разной длины и диаметра в вискозиметре типа Торпе и Роджера. По приведенным в статье данным можно вычислить, что Re равняется примерно 200, что еще вполне обеспечивает ламинарность течения.

Поправочный член на кинетическую энергию в опытах Хоскинга был очень велик: 10—15% от первого члена. Как указывалось выше, значения m и n специально определялись в условиях опыта. Опыты производились на нескольких капиллярах, примерно, одного диаметра, в широком интервале скоростей течения.

Для температуры 25°C Хоскинг получил для вязкости воды $\eta=0,893 \pm 0,002$ *сп.* Это соответствует

$$\eta_{20}=1,004 \pm 0,002.$$

4. Работа Бингэма и Уайта [10]. Авторы также работали с вискозиметром типа Торпе и Роджера. Числа Рейнольдса были очень малы ~25. Поправка на кинетическую энергию составляла около 1% от первого члена. Расчет произведен, принимая $m=1,12$ и $n=0$. Авторы получили

$$\eta_{20}=1,006 \text{ сп.}$$

Возможная погрешность результата порядка $\pm 0,001$ *сп.*
Сводя все последние результаты, имеем:

Торпе и Роджер	$1,002 \pm 0,002$ <i>сп.</i>
Хоскинг (1900)	$1,006 \pm 0,002$.
(1909)	$1,004 \pm 0,002$.
Бингэм и Уайт	$1,006 \pm 0,001$.

Мы видим, что значения вязкости, полученные различными авторами, лежат в пределах возможных погрешностей эксперимента. Это дает нам право взять в качестве вероятнейшего значения среднее арифметическое, и мы получаем —

$$\eta_{20} = 1,005 \text{ сП}$$

с возможной погрешностью в 1, максимум 2 единицы третьего десятичного знака¹. Это значение совпадает со значением, принятым Бингэмом и Джексоном в составленной ими сводной таблице.

Для температур вблизи 20°C можно пользоваться также данными этой таблицы (см. выше, раздел II настоящей статьи). Эти данные приведены в табл. 9.

Таблица 9

t° C	η	t° C	η
15	1,140 ₄	21	0,981 ₃
16	1,111 ₁	22	0,957 ₅
17	1,082 ₅	23	0,935 ₂
18	1,055 ₇	24	0,914 ₄
19	1,029 ₉	25	0,893 ₇
20	1,005		

Отметим, кроме того, что значение $\eta_{20} = 1,005 \text{ сП}$ вполне удовлетворительно совпадает со значениями η_{20} , полученными в старых работах.

V. ВЛИЯНИЕ ЧИСТОТЫ ВОДЫ НА ВЯЗКОСТЬ ЕЕ

Непосредственных указаний на возможное влияние растворенных в воде примесей на ее вязкость в литературе почти нет. Авторы обычно указывают просто, что применялась дистиллированная вода и не останавливаются подробнее на способе очистки. В работе Гурнея [19] указано, что удаление воздуха из дистиллированной воды не является необходимым. Однако ввиду того, что точность измерений Гурнея не очень велика, делать вывод о том, что и при наиболее точных измерениях растворенный в воде воздух не будет влиять на результат, было бы преждевременным. Во всяком случае, при работе с водой, содержащей воздух, всегда существует опасность, что случайно выделившийся пузырек газа закупорит капилляр, или, по крайней мере, уменьшит его сечение.

¹ При плотности воды $D_4^{20} = 0,998230$ (ОСТ) найденному значению динамической вязкости воды соответствует кинематическая вязкость $\nu_{20} = 1,005:0,998230 = 1,006$ сантистокса.

Прим. редактора

Что касается влияния на вязкость воды растворенных в ней солей, то оно, по видимому, пренебрежимо мало. В табл. 10 даны относительные вязкости σ для 1%-ных растворов некоторых веществ (вязкость воды = 1).

Таблица 10

Раствор	σ	Раствор	σ
NaCl	1,02	K ₂ SO ₄	1,01
Na ₂ SO ₄	1,03	K ₂ CO ₃	1,02
NaNO ₃	1,01	MgSO ₄	1,05
KCl	0,99	NaOH	1,03

Совершенно очевидно, что при таком небольшом отличии вязкости растворов от вязкости воды, те ничтожные количества солей, которые могут содержаться в дистиллированной воде, никакой роли играть не должны.

Того же порядка влияние растворенных органических веществ: для 1%-го раствора сахара $\sigma = 1,03$, для 1%-го раствора глюкозы 1,03, для 1%-го спирта также 1,03.

Но если незначительные количества растворенных веществ не играют роли при определении вязкости, то все авторы подчеркивают необходимость тщательнейшей механической очистки воды, освобождения ее от всякого рода взвешенных частичек, от пылин, могущих забить капилляр. Очищать от пыли нужно не только изучаемую жидкость, но и жидкости, применяемые для промывки капилляра, и воздух, которым капилляр, если нужно, просушивается.

ЛИТЕРАТУРА

1. König, Ann. d. Phys. 32, 193 (1887).
2. Poiseuille, Mem. divers savants, 9, 433 (1896).
3. Ladenburg, Ann. d. Phys. 27, 156 (1908).
4. Andrade, a. Chiong, Proc. Phys. Soc., 48, 247 (1926).
5. Шведов, Journ. Phys., 9, 34 (1890).
6. Leroux, Ann. d. Phys. 4, 163 (1925).
7. Drew, Phys. Rev. 12, 114 (1901).
8. Mützel, Ann. d. Phys. 43, 15 (1891).
9. Slotte, Ann. d. Phys. 20, 257 (1883).
10. Bingham, u. White, Zeitschr. Phys. Chem. 80, 670 (1912).
11. Stephan, Ann. d. Phys. 17, 673 (1882).
12. Hosking, Phil. Mag., 17, 502 (1909).
13. Bingham, a. Jackson, B. S. Scient. Paper № 298 (1917).
14. Zemplén, u. Pogany, Ann. d. Phys. 49, 39 (1916).
15. Traube, Ber. d. deutsch. Chem. Ges., 19, 871 (1886).
16. Hosking, Phil. Mag., 49, 274 (1900).
17. Thorpe, a. Rodger, Phil. Trans. A., 185, 397 (1894).
18. Bingham, Journ. of Reclogie, 2, 403 (1931); Phys. Ber. 13, 360 (1932).

19. Gurney, Phys. Rep., 26, 98 (1903).
20. Sprung, Ann. d. Phys. 159, 1 (1876).
21. White, a. Twining, Amer. Chem. Journ. 50, 380 (1913).
22. Washburn, a. Williams, Journ. Amer. Chem. Soc. 35, 737 (1913).
23. Applebey, Journ. Chem. Soc. 47, 2000 (1910).
24. Ventakamaran, Indian Journ. Phys. 8, 25 (1933);
25. Bingham, Journ., of Rheologie 1, 433 (1930); Phys. Ber. 1292 (1931).
26. Riemann, Journ. Amer. Chem Soc. 50, 46 (1928).
27. Bingham, a. Thomson, Journ. of Rheol. 418 (1930); Phys. Ber. 1292 (1931).
28. Bingham, a. Geddes, Physica 4, 203 (1933).

СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТЬЮ И ВЯЗКОСТЬЮ ПО ЭНГЛЕРУ

С тех пор, как Энглером был предложен прибор его конструкции для определения удельной вязкости нефтяных продуктов, не прекращались попытки связать определяемые этим прибором величины вязкости, выраженной в градусах Энглера, с величинами кинематической вязкости, выраженными в стоксах. Без сомнения, прибор Энглера из-за своей невысокой точности не заслуживает той научной обработки, которой занимался ряд авторов, но, так как нефтяная промышленность до сих пор удовлетворялась точностью, обеспечиваемой прибором Энглера, и так как многие стандарты предусматривают характеристику вязкости масел, выраженную в градусах Энглера, является необходимым иметь формулу, связывающую вязкость по Энглеру с кинематической вязкостью, или, по крайней мере, таблицы, позволяющие находить соответствующие значения вязкости. Такие формулы предложено несколько — большинство из них выведено на основе обработки экспериментальных данных. Формулы, выведенные на основе законов гидродинамики, гораздо менее точны и не привелись на практике. Режим истечения в приборе Энглера не является постоянным и зависит от ряда причин, из которых главнейшие — само внутреннее трение жидкости и изменение уровня во время истечения жидкости.

Вообще говоря, истечение в приборе Энглера не является ламинарным, оно приобретает этот характер только при довольно высоких величинах условной вязкости порядка $10^{\circ} E$. Для более подвижных масел истечение из прибора Энглера начинается при заведомо вихревом характере истечения, когда напор, определяемый уровнем масла, еще достаточно велик. По мере истечения характер его проходит все промежуточные стадии и заканчивается послойным. Возможно, что истечение из приборов Энглера является послойным, но высокие числа Рейнольдса при этом не позволяют произвести точные наблюдения, которые могли бы дать основания для вывода кинематической вязкости. Ясно, что при таких условиях теоретический расчет затрудняется, и вывод

какой-либо гидродинамической формулы пересчета становится практически невозможным. Остается, следовательно, лишь путь сопоставления экспериментальных данных. Но и здесь встречается одно затруднение, состоящее в следующем. Как видно из приведенных ниже данных, определение вязкости в приборах Энглера с различными водными числами не обеспечивает единообразия полученных результатов. Поэтому при выводе формулы для пересчета вязкости по Энглеру в кинематическую вязкость следовало бы вывести ее применительно к различным водным числам, то есть ввести в формулу для пересчета некоторый переменный коэффициент. Однако, так как, с одной стороны, колебания температуры на $0,1^\circ\text{C}$ уже заметно отражаются на результатах определения вязкости по Энглеру, а с другой стороны, ввиду конструктивных особенностей прибора и неизбежности установления допусков, нет возможности обеспечить необходимую точность соблюдения постоянства размеров всех частей прибора, влияние различных водных чисел приборов оказывается лежащим в пределах практически достижимой точности определения вязкости по Энглеру.

Химическая лаборатория ВНИИМ, располагая первоклассными приборами Энглера и большим опытом по определению вязкости при помощи этих приборов, занялась прежде всего изучением приборов с различными водными числами. Из более чем 250 поверенных приборов было выбрано 6 приборов с водными числами, различающимися на $0,5 \text{ сек}$. В каждом из приборов водное число при $20,0^\circ$ было определено как среднее из 10 определений. На этих приборах была определена вязкость 11 масел, охватывающих интервал вязкостей от $1,59$ до $16,20^\circ$ Энглера. Так как зависимость между кинематической и вязкостью по Энглеру выражается кривой близкой к параболической, кривизна которой велика в области малых вязкостей, масла были подобраны так, чтобы относительное большее число наблюдений приходилось именно на этот участок кривой. Вязкость всех масел определена так же, как среднее из 10 наблюдений при $20,0^\circ$. Полученные данные приведены в табл. 1.

Вязкость масел, определенная на этих приборах, оказалась численно нетождественной. Причины наблюдаемых расхождений остались невыясненными, но анализ полученных результатов показывает, что случайные погрешности имеют подчиненное значение, так как для всех масел, независимо от их вязкости, наблюдается одна и та же закономерность: вязкость достигает наименьшей величины в случае приборов со средним водным числом 51 сек . Вязкость, определенная в приборах с крайними значениями водных чисел 50 и $51,8 \text{ сек}$, имеет почти одинаковую величину и численно выше вязкости для числа $51,0$ на $0-0,22\%$.

Понятно, что непостоянство условной вязкости для одного и того же масла при определении в приборах с разными водными числами при пересчете на кинематическую вязкость приводит

также к различным величинам. Так, например, для трансформаторного масла при 20° получено: $E_{20} = 3,628$ при водном числе 50 и $E_{20} = 3,585$ при водном числе 51. Кинематическая вязкость соответственно получается равной 0,2479 и 0,2444 стокса, расхождение составляет, следовательно, 1,43%. Для других случаев эта разность достигает 0,4—0,8%, то есть она достаточно велика для того, чтобы не пренебрегать ею при выборе формулы пересчета. В дальнейшей работе в качестве величины вязкости по Энглеру принято среднее из значений, полученных при среднем и при крайних водных числах. Так, например, для предыдущего примера это значение составляет:

$$(3,628 + 3,585) : 2 = 3,606$$

и для кинематической вязкости

$$(0,2479 + 0,2444) : 2 = 0,2461.$$

В этом случае отклонения от среднего значения составляют $\pm 0,7\%$, что, вероятно, соответствует достижимой точности пересчета одной вязкости в другую, которая вряд ли может быть повышена какой бы то ни было унитарной формулой пересчета, потому что эта точность лимитируется не степенью математического приближения, а неопределенностью истинного значения вязкости, определяемой по Энглеру. Последняя является следствием неизбежных допусков в размерах частей прибора.

Из вышеизложенного следует, что для того чтобы сравнить различные величины условной вязкости по Энглеру с вязкостью кинематической, необходимо было, прежде всего, остановиться на каком-то определенном водном числе прибора Энглера или исходить из условной вязкости, отвечающей какому-то среднему водному числу прибора. При наших экспериментах мы пользовались средним арифметическим из значений вязкости, определенной в приборах с водными числами 50,5 и 51,5, потому что эти числа равно удалены от водных чисел, при которых получаются крайние значения вязкости. Такой метод равносильен проведению прямой, соединяющей геометрические середины ординат вязкостей при указанных значениях водных чисел. Таким образом, средняя цифра, выведенная по этому методу, может быть названа также средней геометрической. Вычисленные по этому методу средние значения вязкостей приведены в табл. 1 в графе 10. В графе 11 приведена разность в процентах между данными 9 и 10 граф. Средняя арифметическая величина правильна только в объеме нашего исследования, и очевидно, что наиболее близким к действительности может быть только известное среднее, выведенное с учетом распространенности приборов с различными водными числами. По этому вопросу химическая лаборатория ВНИИМ располагает значительным материалом.

По данным поверки, водные числа 641 поверенных приборов Энглера распределяются следующим образом:

Водные числа	%	Водные числа	%
50,0	0,8	51,1	7,2
50,1	0,8	51,2	9,0
50,2	1,9	51,3	6,4
50,3	2,8	51,4	7,3
50,4	3,9	51,5	5,1
50,5	6,2	51,6	5,8
50,6	7,2	51,7	2,5
50,7	6,7	51,8	0,8
50,8	9,4	51,9	1,2
50,9	8,4	52,0	0,5
51,0	6,1		

Из этих данных видно, что более 80% приборов имеют водные числа, лежащие в пределах от 50,5 до 51,5. Это дало нам основание пользоваться в нашей работе средним арифметическим из показаний приборов с указанными водными числами.

Определение кинематической вязкости было произведено в капиллярных вискозиметрах Уббелоды с висязим уровнем. Этот прибор принят нами, так как в нем устранена погрешность на изменение гидростатического давления.

Капилляры имели следующие размеры:

	№ 34	36	35	101	41	43	42
Диаметр капилляра, мм	0,6	1,0	1,7	0,6	1,0	1,5	0,8
Длина капилляра, мм	90	90	90	90	90	90	90
Объем шарового резервуара, см ³	5,5	5,8	5,8	5,5	5,4	5,5	5,8

Константы приборов определены ступенчатыми переходами от воды с электропроводностью $1,1 \cdot 10^{-6}$ к маслам с постепенно возрастающими вязкостями. Все определения велись при $20^{\circ} \pm 0,03^{\circ}$, в термостате емкостью 20 л. В качестве результата принято среднее из 5 наблюдений. Параллельные определения в приборах двух серий для одного и того же масла расходились не более чем на 2%. Поправка на ускорение вытекающей жидкости не вводилась, так как величина ее лежит в пределах погрешности определения.

В табл. 2 приведены результаты определения кинематической вязкости и вязкости по Энглеру для 11 исследованных масел. Кроме того, в таблице указаны расхождения между принятыми средними значениями вязкости по Энглеру и наиболее отклоняющимися от них данными, полученными в приборах с разными водными числами. Для кинематической вязкости приведена также величина отклонения экспериментальных данных в процентах. Наконец, в эту же таблицу включены данные по пересчету из вязкости по Энглеру в кинематическую по формулам Уббелоды [1] и Фогеля [5] (см. далее). Таблица показывает, что значения кинематической вязкости, выведенных по формуле Уббелоды в сред-

Соотношение между кинематической вязкостью и вязкостью по Энглеру

Масла	Наблюдаемая вязкость				Кинематическая вязкость, вычисленная				
	По Энглеру		Кинематическая		По Убелюде		По Фогелю		
	E ₂₀	% отклонения от крайних значений	E ₂₀	% отклонения от крайних значений	%	% отклонения от экспериментальных данных	%	% отклонения от экспериментальных данных	
I	1,59 ₀	+0,7	-0,4	0,0730	0,6	0,0753	+4,8	0,0730	0
II	1,94 ₀	0,2	0,6	0,1080	0,1	0,1098	+1,7	0,1117	+3,4
III	1,86 ₀	0,2	0,2	0,1118	0,6	0,1118	0	0,1150	+2,8
Велосип. Л	2,17 ₁	0,3	0,9	0,1318	0,5	0,1297	-1,6	0,1351	+2,7
Вазелиновое масло	2,44 ₁	0,0	0,6	0,1563	0,1	0,1526	-2,4	0,1611	+3,0
В. лосит Т	3,21 ₁	0,5	0,8	0,2228	0,4	0,2155	-3,3	0,2292	2,8
Трансформаторное масло	3,60 ₁	0,7	0,5	0,2533	0,5	0,2462	-2,9	0,2617	+3,2
Швейное масло	5,14	-	-	0,3721	0	0,3635	-2,1	0,3840	+3,2
IV	7,98	0,2	0,2	0,5878	0,2	0,5755	-2,1	0,6045	+2,8
V	10,17 ₀	-	-	0,7508	-	0,7372	-1,8	0,7714	+2,7
Резиновое масло	16,20 ₀	0,7	0,1	1,1978	0,1	1,1803	-1,4	1,2272	+2,4

нем ниже экспериментальных данных на 2%, а вычисленные по Фогелю -- на 2,5% выше. При этом разность между экспериментальными данными и вычисленными по Уббелоде меняет знак при вязкости по Энглеру 1,96° E. В этой точке обе кривые пересекаются, затем, при уменьшении вязкости расхождение быстро растет, достигает максимума ниже 1,159 градусов Энглера и сводится к нулю при E = 1°. Подобные же отклонения можно отметить и для данных, вычисленных по Фогелю. В табл. 3 приведены результаты вычисления по другим формулам, приведенным ниже.

1. Уббелоде	[1]	кинем. вязкость $\nu = 0,0731 E - \frac{0,0631}{E}$
2. Мизес	[2]	" " " $\nu = 0,0864 E - \frac{0,08}{E}$
3. Кирстен и Шиллер	[3]	" " " $\nu = 0,0828 E - \frac{0,0833}{E}$
4. Гершель	[4]	" " " $\nu = 0,0750 E - \frac{0,0733}{E}$
5. Фогель	[5]	" " " $\nu = 0,0760 \left[1 - \frac{1}{E^2} \right]$

Таблица 3

Данные пересчета вязкости по Энглеру в кинематическую по различным формулам

Формула	E ₂₀ = 1,4		E ₂₀ = 15,0	
	ν_{20}	Отклонение, %	ν_{20}	Отклонение, %
Уббелоде	0,0573	+ 7,5	1,097	- 1,3
Мизес	0,0638	+ 17,0	1,296	+ 16,6
Кирстен	0,0564	+ 6,1	1,242	+ 11,7
Гершель	0,0527	- 0,5	1,125	+ 1,2
Фогель	0,0500	- 6,0	1,140	+ 2,6
Эксперимент.	0,0530	0	1,111	0

При больших значениях вязкости формулы Уббелоде, Гершеля и Фогеля дают сравнительно малые отклонения от экспериментальных данных, но при вязкости ниже нескольких градусов Энглера ошибки настолько велики, что пользование пересчетными формулами становится невозможным.

Обобщение экспериментального материала, накопленного химической лабораторией ВНИИМ, позволило составить таблицы для пересчета вязкости по Энглеру в кинематическую вязкость и обратно. В этих таблицах приведены результаты сравнения значений вязкости, округленные до второго знака после запятой (табл. 5 и 6).

На основании этих данных Л. С. Блох составил интерполя-

ционную формулу, связывающую вязкость по Энглеру и кинематическую вязкость. Эта формула имеет вид:

$$\nu = 0,074 E + \frac{0,03}{\sqrt{E}} - \frac{0,109}{E} + \frac{0,01506}{E^{10}}$$

При $E = 13,1$ два средних члена формулы превращаются в 0. Между 1 и $1,6^\circ E$ формула Блоха дает сильно искаженные результаты, подобно всем другим формулам пересчета, но выше $1,6$ градусов Энглера формула дает полное совпадение с экспериментальными данными, как показывает табл. 4.

Таблица 4

Сравнение пересчета по формулам Уббелюде, Фогеля и Блоха

E	Опытные данные	Уббелюде		Фогель		Блох	
		ν	отклон.	ν	отклон.	ν	отклон.
1,5	0,062	0,068	+7,9	0,063	0	0,063	0
2,0	0,115	0,115	0	0,118	+2,6	0,115	0
3,0	0,204	0,198	-3,0	0,211	+3,4	0,204	-0,5
4,0	0,284	0,277	-2,5	0,293	+3,2	0,284	0
5,0	0,361	0,353	-2,3	0,371	+2,7	0,361	0
6,0	0,438	0,438	-2,3	0,451	+2,7	0,438	0
8,0	0,590	0,577	-2,3	0,606	+2,7	0,589	-0,2
10,0	0,738	0,725	-1,7	0,757	+2,5	0,738	0
12,0	0,887	0,872	-1,7	0,910	+2,5	0,887	0
14,0	1,035	1,019	-1,6	1,061	+2,5	1,036	+0,1
16,0	1,182	1,117	-1,6	1,212	+2,5	1,184	+0,2

Таблица 5

Перевод вязкости по Энглеру ($\nu^\circ E$) в кинематическую вязкость (в сантистоксах)

E	ν	E	ν	E	ν	E	ν	E	ν
1,00*	1,007	1,45	5,67	2,50	16,1	4,75	34,3	7,00	51,5
1,01	1,110	1,46	5,78	2,55	16,7	4,80	34,6	7,05	51,8
1,02	1,215	1,47	5,89	2,60	17,0	4,85	35,0	7,10	52,2
1,03	1,32	1,48	5,99	2,65	17,4	4,90	35,4	7,15	52,6
1,04	1,42	1,49	6,10	2,70	17,8	4,95	35,8	7,20	53,0
1,05	1,52	1,50	6,20	2,75	18,3	5,00	36,2	7,25	53,4
1,06	1,62	1,51	6,31	2,80	18,7	5,05	36,6	7,30	53,7
1,07	1,72	1,52	6,42	2,85	19,1	5,10	36,9	7,35	54,1
1,08	1,82	1,53	6,53	2,90	19,6	5,15	37,3	7,40	54,5
1,09	1,92	1,54	6,64	2,95	20,0	5,20	37,7	7,45	54,9
1,10	2,02	1,55	6,75	3,00	20,4	5,25	38,1	7,50	55,3
1,11	2,12	1,56	6,86	3,05	20,8	5,30	38,5	7,55	55,6

* Кинематическая вязкость воды при $20^\circ C$ принята равной 1,0063 сантистокса на основании исследований Э. П. Халфина как наиболее вероятное значение; отсюда один градус Энглера равен $\sim 1,007$ сантистокса.

Е	v	Е	v	Е	v	Е	v	Е	v
1,12	2,23	1,57	6,97	3,10	21,3	5,35	28,9	7,60	56,0
1,13	2,33	1,58	7,08	3,15	21,7	5,40	29,3	7,65	56,4
1,14	2,43	1,59	7,18	3,20	22,1	5,45	29,6	7,70	56,8
1,15	2,53	1,60	7,28	3,25	22,5	5,50	30,0	7,75	57,2
1,16	2,64	1,62	7,49	3,30	22,9	5,55	30,4	7,80	57,5
1,17	2,74	1,64	7,70	3,35	23,3	5,60	30,8	7,85	57,9
1,18	2,84	1,66	7,91	3,40	23,7	5,65	31,2	7,90	58,3
1,19	2,94	1,68	8,12	3,45	24,1	5,70	31,6	7,95	58,6
1,20	3,05	1,70	8,33	3,50	24,5	5,75	32,0	8,00	59,0
1,21	3,15	1,72	8,54	3,55	24,9	5,80	32,4	8,05	59,4
1,22	3,25	1,74	8,76	3,60	25,3	5,85	32,8	8,10	59,8
1,23	3,35	1,76	8,97	3,65	25,7	5,90	33,2	8,15	60,2
1,24	3,46	1,78	9,18	3,70	26,1	5,95	33,6	8,20	60,6
1,25	3,57	1,80	9,39	3,75	26,5	6,00	34,0	8,25	60,9
1,26	3,67	1,82	9,59	3,80	26,9	6,05	34,4	8,30	61,3
1,27	3,78	1,84	9,80	3,85	27,3	6,10	34,8	8,35	61,7
1,28	3,89	1,86	10,01	3,90	27,7	6,15	35,2	8,40	62,1
1,29	3,99	1,88	10,22	3,95	28,1	6,20	35,6	8,45	62,4
1,30	4,09	1,90	10,43	4,00	28,4	6,25	36,0	8,50	62,7
1,31	4,20	1,92	10,64	4,05	28,8	6,30	36,4	8,55	63,1
1,32	4,30	1,94	10,84	4,10	29,2	6,35	36,8	8,60	63,5
1,33	4,41	1,96	11,04	4,15	29,6	6,40	37,2	8,65	63,9
1,34	4,51	1,98	11,24	4,20	30,0	6,45	37,6	8,70	64,2
1,35	4,62	2,00	11,45	4,25	30,4	6,50	38,0	8,75	64,6
1,36	4,72	2,05	11,96	4,30	30,8	6,55	38,4	8,80	65,0
1,37	4,83	2,10	12,47	4,35	31,2	6,60	38,8	8,85	65,4
1,38	4,93	2,15	12,97	4,40	31,6	6,65	39,2	8,90	65,7
1,39	5,04	2,20	13,44	4,45	31,9	6,70	39,6	8,95	66,1
1,40	5,14	2,25	13,89	4,50	32,3	6,75	40,0	9,00	66,5
1,41	5,25	2,30	14,34	4,55	32,7	6,80	40,4	9,05	66,9
1,42	5,35	2,35	14,80	4,60	33,1	6,85	40,8	9,10	67,2
1,43	5,46	2,40	15,24	4,65	33,5	6,90	41,2	9,15	67,6
1,44	5,57	2,45	15,69	4,70	33,9	6,95	41,6	9,20	68,0
9,25	68,3	10,1	74,7	11,6	85,8	13,1	96,9	14,6	108,0
9,30	68,7	10,2	75,4	11,7	86,6	13,2	97,7	14,7	108,7
9,35	69,1	10,3	76,1	11,8	87,3	13,3	98,4	14,8	109,4
9,40	69,5	10,4	76,9	11,9	88,1	13,4	99,1	14,9	110,2
9,45	69,9	10,5	77,6	12,0	88,8	13,5	99,9	15,0	110,9
9,50	70,2	10,6	78,4	12,1	89,5	13,6	100,6	15,1	111,6
9,55	70,6	10,7	79,2	12,2	90,3	13,7	101,4	15,2	112,4
9,60	70,9	10,8	79,9	12,3	91,0	13,8	102,1	15,3	113,1
9,65	71,3	10,9	80,6	12,4	91,8	13,9	102,9	15,4	113,8
9,70	71,7	11,0	81,3	12,5	92,5	14,0	103,6	15,5	114,6
9,75	72,1	11,1	82,1	12,6	93,2	14,1	104,3	15,6	115,3
9,80	72,4	11,2	82,9	12,7	94,0	14,2	105,0	15,7	116,1
9,85	72,8	11,3	83,6	12,8	94,7	14,3	105,8	15,8	116,8
9,90	73,2	11,4	84,3	12,9	95,5	14,4	106,5	15,9	117,5
9,95	73,6	11,5	85,0	13,0	96,1	14,5	107,2	16,0	118,3
10,0	73,9								

Выше 13° E кинематическая вязкость

$$v = 0,0395 E$$

$$\text{или } v = E: 13,52$$

Таблица 6

Перевод кинематической вязкости (в сантистоксах) в вязкость по Энглеру (в °Е)

ν	Е	ν	Е	ν	Е	ν	Е	ν	Е
1,1	1,010	5,6	1,443	10,2	1,88	19,2	2,86	40,5	5,56
1,2	1,020	5,7	1,453	10,4	1,90	19,4	2,88	41,0	5,63
1,3	1,030	5,8	1,462	10,6	1,92	19,6	2,90	41,5	5,69
1,4	1,039	5,9	1,472	10,8	1,94	19,8	2,92	42,0	5,76
1,5	1,049	6,0	1,481	11,0	1,96	20,0	2,95	42,5	5,82
1,6	1,058	6,1	1,491	11,2	1,98	20,5	3,01	43,0	5,89
1,7	1,068	6,2	1,500	11,4	2,00	21,0	3,07	43,5	5,96
1,8	1,078	6,3	1,510	11,6	2,01	21,5	3,13	44,0	6,02
1,9	1,088	6,4	1,519	11,8	2,03	22,0	3,19	44,5	6,09
2,0	1,098	6,5	1,528	12,0	2,05	22,5	3,24	45,0	6,16
2,1	1,108	6,6	1,536	12,2	2,07	23,0	3,31	45,5	6,22
2,2	1,118	6,7	1,546	12,4	2,09	23,5	3,37	46,0	6,28
2,3	1,128	6,8	1,555	12,6	2,11	24,0	3,43	46,5	6,35
2,4	1,138	6,9	1,564	12,8	2,13	24,5	3,50	47,0	6,42
2,5	1,148	7,0	1,573	13,0	2,15	25,0	3,56	47,5	6,48
2,6	1,158	7,1	1,583	13,2	2,17	25,5	3,62	48,0	6,55
2,7	1,167	7,2	1,592	13,4	2,19	26,0	3,68	48,5	6,61
2,8	1,176	7,3	1,60	13,6	2,21	26,5	3,75	49,0	6,68
2,9	1,186	7,4	1,61	13,8	2,24	27,0	3,81	49,5	6,75
3,0	1,195	7,5	1,62	14,0	2,26	27,5	3,88	50,0	6,81
3,1	1,205	7,6	1,63	14,2	2,28	28,0	3,95	51,0	6,94
3,2	1,214	7,7	1,64	14,4	2,30	28,5	4,01	52,0	7,07
3,3	1,224	7,8	1,65	14,6	2,33	29,0	4,07	53,0	7,20
3,4	1,234	7,9	1,66	14,8	2,35	29,5	4,14	54,0	7,33
3,5	1,243	8,0	1,67	15,0	2,37	30,0	4,20	55,0	7,47
3,6	1,253	8,1	1,68	15,2	2,39	30,5	4,27	56,0	7,60
3,7	1,262	8,2	1,69	15,4	2,42	31,0	4,33	57,0	7,73
3,8	1,272	8,3	1,70	15,6	2,44	31,5	4,39	58,0	7,86
3,9	1,282	8,4	1,71	15,8	2,46	32,0	4,46	59,0	8,00
4,0	1,291	8,5	1,72	16,0	2,48	32,5	4,52	60,0	8,13
4,1	1,301	8,6	1,725	16,2	2,51	33,0	4,59	61,0	8,26
4,2	1,310	8,7	1,73	16,4	2,53	33,5	4,65	62,0	8,40
4,3	1,320	8,8	1,74	16,6	2,55	34,0	4,72	63,0	8,53
4,4	1,330	8,9	1,75	16,8	2,58	34,5	4,78	64,0	8,66
4,5	1,339	9,0	1,76	17,0	2,60	35,0	4,85	65,0	8,80
4,6	1,349	9,1	1,77	17,2	2,62	35,5	4,91	66,0	8,94
4,7	1,359	9,2	1,78	17,4	2,65	36,0	4,98	67,0	9,06
4,8	1,368	9,3	1,79	17,6	2,67	36,5	5,04	68,0	9,20
4,9	1,378	9,4	1,80	17,8	2,69	37,0	5,11	69,0	9,34
5,0	1,387	9,5	1,81	18,0	2,72	37,5	5,17	70,0	9,48
5,1	1,397	9,6	1,82	18,2	2,74	38,0	5,24	71,0	9,61
5,2	1,406	9,7	1,83	18,4	2,76	38,5	5,30	72,0	9,75
5,3	1,415	9,8	1,84	18,6	2,79	39,0	5,37	73,0	9,88
5,4	1,424	9,9	1,85	18,8	2,81	39,5	5,43	74,0	10,01
5,5	1,434	10,0	1,86	19,0	2,83	40,0	5,50	75,0	10,15

Примечание. На основании статьи Халфина динамическая вязкость воды при 20° С была принята равной 1,005 сантипуаз, что при плотности воды 0,998230 соответствует кинематической вязкости 1,0068 или приблизительно 1,007 сантистокса.

ν	E	ν	E	ν	E	ν	E	ν	E
76,0	10,27	85,0	11,49	94,0	12,70	103,0	13,92	112,0	15,15
77,0	10,40	86,0	11,62	95,0	12,83	104,0	14,06	113,0	15,29
78,0	10,54	87,0	11,76	96,0	12,98	105,0	14,19	114,0	15,42
79,0	10,68	88,0	11,89	97,0	13,11	106,0	14,33	115,0	15,56
80,0	10,81	89,0	12,02	98,0	13,24	107,0	14,47	116,0	15,69
81,0	10,95	90,0	12,16	99,0	13,38	108,0	14,61	117,0	15,83
82,0	11,08	91,0	12,23	100,0	13,52	109,0	14,74	118,0	15,97
83,0	11,22	92,0	12,43	101,0	13,65	110,0	14,88	119,0	16,10
84,0	11,36	93,0	12,57	102,0	13,79	111,0	15,02	120,0	16,24

При ν выше 1 стокса

$$E = \nu : 0,07395$$

или $E = 13,52 \nu$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ubbelohde, Tabellen zum Englerschen Viskosimeter, Leipzig (1907).
2. Mises, Elemente der technischen Hydrodynamik, Leipzig (1914).
3. Kirsten u Schiller, Zeitschr angew. Mat. u. Mechanik, 5, 111 (1925).
4. Herschel, B. S. Techn. Papers, № 112 (1919).
5. Vogel, Zeitschr. angew. Chem. 35, 561 (1922).

АНАЛИЗ ФОРМУЛ ДЛЯ ПЕРЕСЧЕТА ВЯЗКОСТИ ПО ЭНГЛЕРУ В КИНЕМАТИЧЕСКУЮ ВЯЗКОСТЬ

(по материалам химической лаборатории)

Несмотря на свои недостатки, к числу которых следует отнести низкую точность и условность единицы измерения, вискозиметр Энглера имеет очень широкое распространение как в СССР, так и за границей, ввиду некоторых его эксплуатационных преимуществ в отношении простоты его устройства и обслуживания. Поэтому есть основание предполагать, что этот прибор будет еще долго сохранять свое значение при измерении вязкости нефтяных продуктов. Это обстоятельство заставляет искать путь к устранению недостатков, имеющихся у вискозиметра Энглера. Первый основной недостаток вискозиметра Энглера — низкая точность измерений — выдвигает следующие вопросы, подлежащие разрешению:

- 1) какая точность измерений требуется при различных технических испытаниях материалов;
- 2) какую точность измерений вязкости обеспечивает вискозиметр Энглера;
- 3) можно ли повысить точность измерений при работе с вискозиметром Энглера.

Ответ на первый вопрос дают технические условия, приведенные в общесоюзных стандартах на нефтепродукты. Для примера в табл. 1 приведены требования, предъявляемые к некоторым сортам масел, соответствующих стандартам.

Таблица 1

№ ОСТ	Наименование масел	Темпера- тура испы- тания °С	Вязкость по Энглеру °Е	Допустимое отклонение	
				абсолютн. °Е	%
194	Веретенное „2“ . .	50	2—2,2	0,2	10
194	Веретенное „3“ . .	50	2,8—3,2	0,4	14
274	Машинное „Л“ . .	50	4,0—4,5	0,5	12
274	Машинное „Т“ . .	50	7,0—8,2	1,2	17

Как видно из таблицы, при маркировке различных смазочных масел допускаются отклонения от 0,2 до 1,2°E, что составит для различных масел от 10 до 17%. Эти данные приводят к выводу, что при технических испытаниях масел точность измерения в 5% является достаточной. Что же касается точности измерений на вискозиметре Энглера, то этот вопрос до сих пор остается спорным. По Гарнеру и Брунсу [1], расхождения между показаниями различных приборов могут достигнуть 10% при работе с маслами, имеющими вязкость выше 10°E. Однако авторы статьи не указывают, насколько подвергнутые испытанию вискозиметры удовлетворяли требованиям стандарта. Учитывая это обстоятельство, следует признать приводимую точность результатов измерений недостаточно убедительной. Имеются основания считать, что однотипные вискозиметры, удовлетворяющие требованиям определенного стандарта, дадут значительно меньшие расхождения. В этом убеждает многолетний опыт работы химической лаборатории Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии им. Д. И. Менделеева по испытанию вискозиметров Энглера. Некоторое суждение о порядке точности измерений на вискозиметре Энглера дают данные об испытании партии вискозиметров Энглера, изготовленных заводом „Эталон“.

Эта работа была проведена химической лабораторией в 1944 г. Были испытаны 14 приборов на трех маслах: на трансформаторном, имеющем вязкость в 1,77°E, на машинном масле с вязкостью в 6,79°E и на морском с вязкостью в 9,75°E. Эти значения вязкости были получены как среднееарифметические из показаний 14 вискозиметров. На каждом вискозиметре было проведено 12 определений вязкости, при этом вероятная погрешность результата испытаний составляла от 0,05 до 0,2%. Испытание показало, что 9 приборов дали отклонения от среднего значения, не превышающие $\pm 0,8\%$ для трансформаторного масла и $0,7\%$ для машинного. Остальные 5 приборов дали отклонения, не превышающие в первом случае $\pm 1,46\%$, и втором случае $\pm 2,1\%$.

При испытании на морском масле наибольшее отклонение в показаниях приборов от средней величины составляло $\pm 2,5\%$. Упомянутые приборы имели водную константу, заключающуюся в пределах от 51,0 до 51,9 сек. Расхождение между показаниями различных вискозиметров Энглера можно объяснить слишком большим допуском на водную константу и значительным допуском на внутренний диаметр сточной трубки. В последнее время заводом „Эталон“ стали выпускаться вискозиметры, водная константа которых весьма близка к 51,0 сек. Эти приборы дают значительно более близкие результаты измерения. Таким образом, точность измерения на вискозиметре Энглера значительно выше, чем указывают Гарнер и Брунс, и может быть еще повышена за счет уменьшения допуска на размеры прибора, что обеспечило бы точность, вполне достаточную для технических целей.

Существенным недочетом вискозиметра Энглера является условность единиц измерения — градусов Энглера. Этот недочет особенно ощутим в связи с тем, что в настоящее время довольно широкое распространение, наряду с вискозиметром Энглера, получили вискозиметры других систем, определяющие вязкость в абсолютных единицах. В связи с этим, рядом авторов были составлены специальные таблицы для перевода вязкости по Энглеру в кинематическую вязкость или заменяющие их расчетные формулы. Из этих таблиц наибольшим распространением пользуется таблица, составленная Гарнером и Келли [2]. Однако большие расхождения, которые наблюдаются между данными таблицы Гарнера и Келли и результатами, получающимися на практике, вызвали необходимость ее проверки.

Первая формула для пересчета условной вязкости по Энглеру в кинематическую была предложена Уббелоде [3]:

$$\nu = 0,0731 E - \frac{0,0631}{E}, \quad (1)$$

где

ν — кинематическая вязкость в стоксах;

E — вязкость в градусах Энглера.

Подобного рода формулы были выведены рядом авторов; так Мизес [4] предложил формулу

$$\nu = 0,0864 E - \frac{0,08}{E}, \quad (2)$$

Кирстен и Шиллер [5] формулу

$$\nu = 0,0828 E - \frac{0,0833}{E}. \quad (3)$$

Гершель [6] для прибора Энглера со средним водным числом в 51,0 сек дает следующую формулу:

$$\nu = 0,0750 E - \frac{0,0733}{E}. \quad (4)$$

Совершенно в другом виде дает формулу Фогель [7]:

$$\nu = 0,0760 \left[1 - \frac{1}{E^2} \right]. \quad (5)$$

Ввиду того, что эти формулы дают значительное расхождение как между собой так и с экспериментальными данными, химической лабораторией Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии была проделана большая работа по сравнению вискозиметров Энглера с капиллярными вискозиметрами типа Уббелоде с висязчим уровнем [8]. В результате проделанной работы были составлены таблицы для пересчета условной вязкости по Энглеру в кинематическую вязкость. На основе полученных экспериментальных данных была выведена следующая формула:

$$\nu = 0,074 E + \frac{0,03}{\sqrt{E}} - \frac{0,109}{E} + \frac{0,01509}{E^{2,0}}. \quad (6)$$

Эта формула дает хорошее совпадение с экспериментальными данными.

Такое обилие формул для пересчета вязкости по Энглеру в кинематическую вязкость побудило автора заняться сравнительным анализом точности вышеперечисленных формул. В качестве критерия точности переводных формул автор принял степень приближения их к экспериментальным данным, полученным в химической лаборатории ВНИИМ.

В табл. 2 приведены значения кинематической вязкости, вычисленные с помощью разных таблиц или формул, для различных значений вязкости по Энглеру (E). В первой графе таблицы приведена вязкость в градусах Энглера ($^{\circ}E$), во второй графе, соответственные значения кинематической вязкости, полученные на основе экспериментальных данных ВНИИМ. В третьей графе таблицы приведены соответствующие значения кинематической вязкости по таблицам Гарнера и Келли. Рядом справа помещена графа, в которой даны отклонения их от экспериментальных данных ВНИИМ. В остальных графах таблицы приведены значения кинематической вязкости (ν), вычисленные по различным формулам, и отклонения этих значений в процентах от экспериментальных данных ВНИИМ. Формулой ВНИИМ называется формула (6), которая была выведена Добрянским, Блохом и Блесточкиной на основе экспериментальных данных ВНИИМ. Под номерами (9), (17) и (24) идут формулы, о которых будет сказано ниже. Отклонения значений кинематической вязкости,

вычисленных по различным формулам, от экспериментальных данных показаны на рис. 1, 2 и 3. На этих диаграммах по оси абсцисс отложены значения вязкости в градусах Энглера, а по оси ординат отклонения в процентах от экспериментальных данных ВНИИМ. На рис. 1 приведен график отклонений формул а) ВНИИМ, б) Уббелоде, а также таблицы Гарнера и Келли от экспериментальных данных ВНИИМ. Как показывает этот рисунок, таблица Гарнера и Келли обнаруживает значительные расхождения с экспериментальными данными ВНИИМ. Так, при вязкостях, больших $2^{\circ}E$, данные Гарнера и Келли на 3% превышают экспериментальные данные. При малых значениях вязкости эта разница меняет свой знак и достигает -11% при $1,1^{\circ}E$. Такое же большое расхождение обнаруживает формула Уббелоде. При значениях вязкости, больших $2^{\circ}E$ отклонения перечисленных значений от экспериментальных данных колеблются в пределах от -2% до -3% . При значениях, меньших $2^{\circ}E$, разность меняет свой знак и достигает 15% при $1,2^{\circ}E$. Наоборот, формула ВНИИМ обнаруживает хорошее совпадение с экспериментальными данными на всем интервале вязкости от $1,5^{\circ}E$ до $10^{\circ}E$, не превышая $0,5\%$. Только при вязкости меньше $1,5^{\circ}E$ формула ВНИИМ показывает значительные отклонения от экспериментальных данных. Так как измерение вязкости меньше $1,5^{\circ}E$ производится крайне редко, а в остальных случаях формула ВНИИМ дает совпадение с экспериментом, то следует признать, что формула ВНИИМ дает наилучшие по точности результаты.

Таблица 2

Кинематическая вязкость

$^{\circ}E$	Экспериментальные данные ВНИИМ	Таблица Гарнер-Келли		Формула Уббелоде		Формула Гершеля		Формула Минзеса	
		ν	$\delta, \%$	ν	$\delta, \%$	ν	$\delta, \%$	ν	$\delta, \%$
1,1	2,02	1,80	-11	2,30	+14	1,62	-20	2,28	+13
1,2	3,05	2,80	-8	3,51	+15	2,95	-3	3,67	+20
1,4	5,14	5,00	-3	5,72	+11	5,30	+3	6,38	+24
1,6	7,35	7,50	+2	7,75	+5	7,40	+0,5	8,82	+20
1,8	9,39	9,60	+2	9,66	+3	9,40	+0,1	11,22	+19
2,0	11,45	11,80	+3	11,46	0	11,34	-1	13,32	+17
2,5	16,10	16,60	+3	15,71	-2	15,85	-1,5	18,38	+14
3,0	20,40	21,10	+3,2	19,82	-2,8	19,99	-2	23,25	+13,5
3,5	24,50	25,30	+3,2	23,77	-3,4	24,20	-1,2	27,90	+10
4,0	28,40	29,30	+3,1	27,66	-2,7	28,20	-0,7	32,60	+11
5,0	36,10	37,30	+3,2	35,29	-2,2	36,10	0	41,63	+15
6,0	43,80	45,10	+3	42,81	-2,1	43,80	+0	50,50	+15
7,0	51,40	52,90	+2,9	50,27	-2,1	51,50	+0,2	59,38	+15,5
8,0	59,0	60,50	+2,5	57,69	-2,0	59,10	+0,2	68,20	+15
9,0	66,40	68,10	+2,5	65,09	-2,0	66,70	+0,3	76,75	+15
10,0	73,80	75,70	+2,5	72,57	-1,8	74,30	+0,6	85,56	+15

в сантистоксах

Формула Шиллера		Формула ВНИИМ		Формула (17)		Формула (24)		Формула (9)	
ν	$\delta, \%$	ν	$\delta, \%$	ν	$\delta, \%$	ν	$\delta, \%$	ν	$\delta, \%$
1,58	-22	1,68	-17	3,01	+49	1,98	-2	1,51	-25,5
2,99	-2	2,78	-9	4,27	+41	3,00	-1,7	2,72	-11
5,63	+9,5	5,15	+0,2	6,45	+25	5,10	-0,9	5,12	-0,5
8,06	+9,5	7,42	+0,8	8,43	+14	7,42	+0,8	7,40	+0,5
10,28	+9,5	9,43	+0,5	10,34	+10	9,46	+0,8	9,45	+0,7
12,54	+8,4	11,47	+0,5	12,15	+5	11,50	+0,5	11,32	-1,2
17,39	+8	16,05	-0,3	16,52	+2,5	16,18	+0,5	15,85	-1,6
22,04	+7,5	20,35	-0,4	20,59	+1	20,52	+0,5	20,50	+0,5
26,42	+7,5	24,39	-0,1	24,67	+0,7	24,58	+0,3	24,62	+0,5
31,02	+9,5	28,37	+0,2	28,65	+0,7	28,50	+0,5	28,30	-0,5
39,74	+9,5	36,16	+0,05	36,40	+0,7	36,30	+0,5	36,20	0
48,21	+10,5	43,81	+0,07	44,05	+0,6	44,05	+0,6	43,90	+0,2
56,71	+10,5	51,47	-0,2	51,75	+0,5	51,75	+0,5	51,80	+0,6
65,16	+10,5	58,89	+0,2	59,29	+0,5	59,29	+0,5	59,60	+1
73,69	+11,0	66,48	+0,1	66,87	+0,4	66,87	+0,4	67,20	+1
82,02	+11	73,86	+0,08	74,43	+0,6	74,43	+0,6	74,60	+1

На рис. 2 приведены значения отклонений от экспериментальных данных для ряда однотипных формул вида:

$$\nu = AE - \frac{B}{E} \quad (7)$$

а именно: а) формулы Уббелоде, б) формулы Гершеля, в) формулы Мизеса, г) формулы Шиллера.

Этот рисунок наглядно показывает, как с изменением численных коэффициентов меняется точность результатов, получаемых

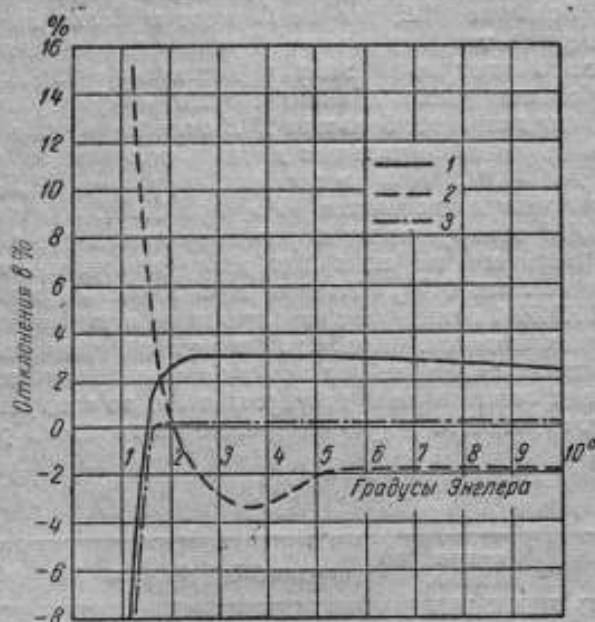


Рис. 1. Отклонение от экспериментальных данных, выраженное в процентах.

1 — Гершер и Келан (таблица); 2 — формула Уббелоде; 3 — формула ВНИИМ.

по этим формулам. Из рис. 2 видно, что наиболее неудовлетворительные результаты дают формулы Мизеса (2) и Кирстен и Шиллера (3). Для формулы Мизеса расхождение с экспериментальными данными колеблется в пределах от +10% до +20%, а для формулы Шиллера эти расхождения составляют 8—12%. Таким образом, формулы Мизеса и Шиллера дают преувеличенные значения кинематической вязкости. Наоборот, формула Уббелоде (1) при вязкостях, больших 2,5° E, дает значения вязкости, которые меньше экспериментальных данных на 2—3% и только при значениях вязкости, меньших 2° E, формула Уббе-

лоде дает значения кинематической вязкости выше экспериментальных данных ВНИИМ. Из всех формул указанного вида, приведенных на рис. 2, самые хорошие результаты дает формула Гершеля (4). Из сопоставления кривых рис. 2 с формулами (1), (2), (3) и (4) можно проследить, как на выражение (7) влияет величина коэффициентов A и B . Увеличение коэффициента A ведет

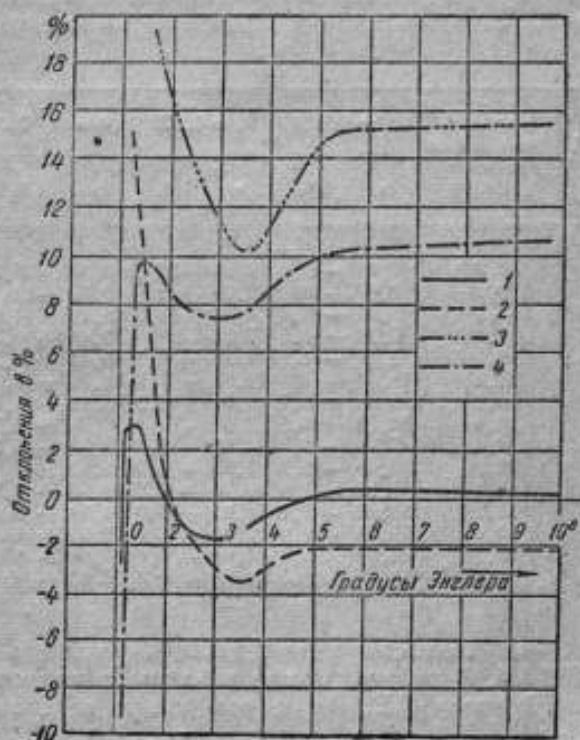


Рис. 2. Отклонение от экспериментальных данных, выраженное в процентах.

1 — формула Гершеля; 2 — формула Уббелюде; 3 — формула Мизеса; 4 — формула Шайдера.

к тому, что при больших значениях вязкости, величина кинематической вязкости получается преувеличенной. Наоборот, увеличение коэффициента B приводит к тому, что при малых значениях вязкости формула (7) дает заниженные значения кинематической вязкости. Из всех рассмотренных комбинаций численных значений коэффициентов A и B наиболее удачную комбинацию представляет формула Гершеля.

Близость значений коэффициентов A и B в формуле Гершеля

привела автора к мысли упростить выражение (7), приведя его к виду

$$\nu = A \left(E - \frac{1}{E} \right) \quad (8)$$

и определить путем подбора величину коэффициента A . В табл. 3 приведены значения кинематической вязкости ν , вычисленные по формуле (8) при различных значениях коэффициента A . В этой же таблице приведены также отклонения вычисленных значений

Таблица 3

°E	$E - \frac{1}{E}$	Экспериментальные данные ВНИИМ	A = 0,074		A = 0,075		A = 0,0755		A = 0,076	
			ν	$\delta, \%$	ν	$\delta, \%$	ν	$\delta, \%$	ν	$\delta, \%$
1,1	0,2	2,02	1,48	-27	1,50	-26	1,51	-25,5	1,52	-25
1,2	0,36	3,05	2,67	-13	2,70	-12	2,72	-11	2,74	-10
1,4	0,68	5,14	5,02	-2,4	5,08	-1,2	5,12	-0,5	5,16	+0,5
1,6	0,98	7,36	7,24	-1,7	7,36	0	7,40	+0,5	7,45	+1,3
1,8	1,25	9,39	9,25	-1,5	9,38	-0,1	9,45	+0,7	9,50	+1,3
2,0	1,50	11,45	11,10	-3	11,28	-1,5	11,32	+1,2	11,40	-0,5
2,5	2,10	16,10	15,55	-3,7	15,75	-2,3	15,85	-1,6	15,95	-0,8
3,0	2,67	20,40	19,70	-3,5	20,0	-2	20,50	+0,5	20,70	+1,5
4,0	3,75	28,40	27,75	-2,3	28,10	-1,1	28,30	-0,5	28,50	+0,3
5,0	4,80	36,20	35,40	-2,3	35,95	-0,7	36,20	0	36,40	+0,5
6,0	5,83	43,80	43,10	-1,6	43,70	-0,2	43,90	+0,2	44,30	+1,1
7,0	6,85	51,50	50,60	-1,6	51,10	-0,7	51,80	+0,6	52,10	+1,1
8,0	7,88	59,0	58,50	-0,9	59,20	+0,4	59,60	+1	60,0	+1,7
9,0	8,89	66,50	65,80	-0,9	66,60	+0,4	67,20	+1	67,60	+1,8
10,0	9,99	73,90	73,30	-0,8	74,20	+0,4	74,60	+1	75,20	+1,8

кинематической вязкости в процентах от экспериментальных данных ВНИИМ. В первой графе таблицы приведены значения вязкости по Энглеру ($^{\circ}E$). Во второй графе таблицы для удобства вычислены значения выражения $E - \frac{1}{E}$. В последующих графах даны значения кинематической вязкости, полученные на основании экспериментальных данных и в результате вычисления по формуле (8) при различных значениях коэффициента A .

Из рассмотрения табл. 3 видно, что при коэффициенте $A = 0,074$ получаются сильно преуменьшенные значения кинематической вязкости. Наоборот, при значении коэффициента $A = 0,076$ кинематическая вязкость получается преувеличенной. Наименьшие отклонения от экспериментальных данных дает коэффициент $A = 0,0755$. Этот коэффициент мы выбрали для упрощенной формулы, которая примет следующий вид

$$\nu = 0,0755 \left(E - \frac{1}{E} \right). \quad (9)$$

Эта формула для значений вязкости от $1,4^{\circ} E$ до $2,0^{\circ} E$ и от $3^{\circ} E$ до $10^{\circ} E$, то есть в довольно широком интервале вязкостей дает погрешность, не превышающую 1% ; при вязкостях от $2^{\circ} E$ до $3^{\circ} E$ погрешность возрастает до $1,6\%$ и только при значениях вязкости меньших $1,4^{\circ} E$ погрешность достигает больших величин. Так как в последнем интервале вязкость почти никогда не измеряется, то можно считать, что формула (9) дает вполне удовлетворительные для технических целей результаты, в смысле же простоты она имеет известные преимущества перед формулой Гершеля (4).

При рассмотрении табл. 3 бросается в глаза неравномерность изменения погрешностей для формулы (9). Это обстоятельство указывает, с одной стороны, на то, что выбор коэффициентов формул (7) и (8) является теоретически необоснованным, а с другой стороны, на то, что связь между условной и кинематической вязкостью может быть выражена двучленным уравнением лишь приближенно. Это обстоятельство заставляет искать теоретическое обоснование формул пересчета вязкости по Энглеру в кинематическую вязкость.

Ламинарное течение жидкости при низких скоростях подчиняется, как известно, закону Пуазейля [9]

$$v = \frac{\pi r^4 gh}{8 \pi l \tau}, \quad (10)$$

где:

- v — кинематическая вязкость,
- r — радиус трубки,
- l — ее длина,
- v — объем вытекшей жидкости,
- τ — время, в течение которого данный объем жидкости вытек из трубки,
- h — высота столба жидкости, под влиянием которого жидкость вытекает из трубки,
- g — ускорение силы тяжести.

При больших скоростях движения жидкости формула Пуазейля нуждается в поправке Гагенбаха [10] на кинетическую энергию, которая в вискозиметре Энглера имеет довольно существенное значение. С учетом этой поправки формула Пуазейля примет вид:

$$v = \frac{\pi r^4 gh}{8 \pi l \tau} - \frac{mv}{8 \pi l \tau}, \quad (11)$$

где m — некоторый численный коэффициент, который различными авторами оценивается по-разному, но в большинстве случаев принимается равным единице.

Кроме того, в формулу Пуазейля также вводят поправку на разбрызгивание жидкости по выходе из капилляра — поправку

Куэтта [11]. С учетом этой поправки формула (11) примет следующий вид:

$$v = \frac{\pi r^4 g h \tau}{8 \nu (l + nr)} - \frac{m \nu}{8 \pi (l + nr) \tau} \quad (12)$$

В вискозиметре Энглера сточная трубка имеет некоторую конусность, суживаясь к выходному отверстию. Эта конусность сточной трубки несколько увеличивает сопротивление при истечении жидкости из сточной трубки, что можно рассматривать как некоторое увеличение длины трубки.

Это кажущееся увеличение длины сточной трубки может быть учтено [10], если внести в формулу Пуазейля некоторый коэффициент K , тогда эта формула примет вид:

$$v = \frac{\pi r^4 h g \tau}{8 \nu k (l + nr)} - \frac{m \nu}{8 \pi k (l + nr) \tau} \quad (13)$$

Для вискозиметра Энглера имеем:

средний радиус трубки $r = 0,145$ см,

длина сточной трубки $l = 2$ см,

количество вытекшей жидкости $v = 200$ см³,

среднее эффективное значение столба жидкости $h = 4,0$ см,

n — положим равным единице,

m — также равным единице,

$k = 1,1$ — на основании данных Померанцева [12].

Подставляя эти данные в формулу (3), получим:

$$v = 0,00143 \tau - \frac{3,37}{\tau} \quad (14)$$

С другой стороны, вязкость по Энглеру определяется на основании соотношения:

$$E = \frac{\tau}{\tau_0} \quad (15)$$

где:

τ — время истечения данного продукта из вискозиметра Энглера,

τ_0 — водная константа прибора, равная 51,0 сек.

Сопоставляя выражения (14) и (15), получим

$$v = 0,073 E - \frac{0,066}{E} \quad (16)$$

Таким образом, на основании теоретических подсчетов получилось выражение, близкое к формуле Уббелоде. Однако при выводе выражения (16) выбор коэффициентов m и n является произвольным. Поэтому было бы правильным определять величину коэффициентов m и n на основании экспериментальных данных. Согласно данным Гершеля [13], для вискозиметра Энглера $n = 1,4$ и $m = 1,03$.

Кроме того, как указывалось выше, формула Уббелоде довольно

значительно расходится с экспериментальными данными. Это обстоятельство побуждает к пересмотру формулы, данной Уббеллоде. Прежде всего следует указать на неоднозначность расхождений между формулой Уббеллоде и экспериментальными данными, а это показывает, что формула Уббеллоде даже приближенно не выражает зависимости между условной вязкостью по Энглеру и кинематической вязкостью.

Путем подбора удалось установить, что при значениях вязкости больших $3^{\circ}E$ довольно хорошие результаты дает формула:

$$\nu = 0,075 E - \frac{0,057}{E}. \quad (17)$$

Из табл. 3 видно, что в этом случае расхождение с экспериментальными данными невелико, меньше 1%, и примерно одного и того же порядка. Однако при значениях вязкости меньших $3^{\circ}E$ расхождение с экспериментальными данными начинает резко возрастать. При этом формула дает преувеличенные значения кинематической вязкости. Это обстоятельство говорит за то, что формулой (17) не учитываются дополнительные сопротивления, которые возникают при движении жидкости с малой вязкостью, вследствие перехода ламинарного потока в турбулентный. Граница перехода жидкости от ламинарного течения к турбулентному может быть определена на основании критерия Рейнольдса:

$$R = \frac{V_k d}{\nu}, \quad (18)$$

где:

d — диаметр трубки истечения,

ν — вязкость жидкости,

V_k — критическая скорость, при которой образуется турбулентное течение,

R — число Рейнольдса, обычно принимаемое $R = 2000$.

Количество жидкости v , вытекшей через трубку за время τ , будет равно

$$v = \pi r^2 V \tau. \quad (19)$$

Подставляя выражение (19) в формулу (10), получим

$$\nu = \frac{r^2 h g}{8 v l}. \quad (20)$$

Далее, подставляя это выражение в формулу (18), получим

$$R = \frac{r^2 h g}{4 \nu l}. \quad (21)$$

После подстановки в формулу (21) численных значений параметров r , h и l вискозиметра Энглера получим

$$R = \frac{1,52}{\nu^2}.$$

При $R=2000$, $\nu=0,028$ стокса, что соответствует $1,2^\circ E$.

Таким образом, течение воды в вискозиметре Энглера является безусловно турбулентным, однако возникновение турбулентности в вискозиметре Энглера возможно также и при более высоких вязкостях. Вблизи перехода резервуара в сточную трубку создаются условия, благоприятные для создания местных турбу-

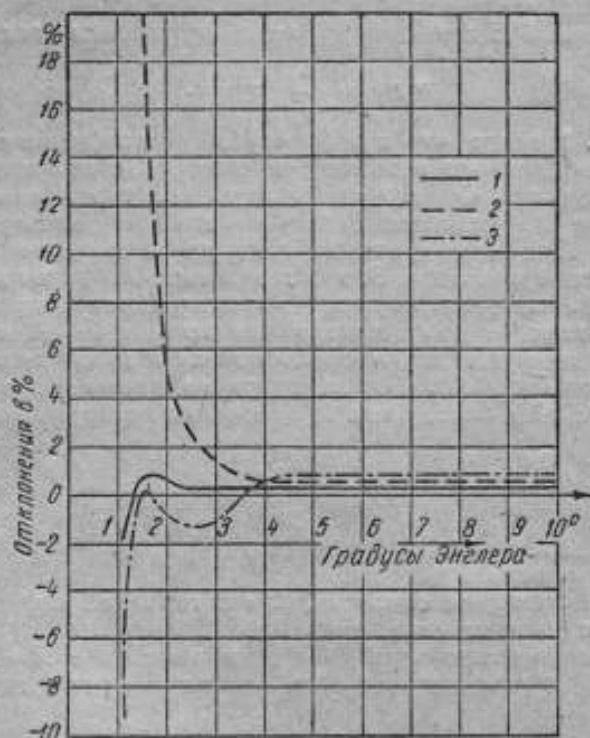


Рис. 3. Отклонение от экспериментальных данных в процентах.

1 — формула $\nu = 0,075 E - \frac{0,067}{E} - 0,085 e^{-1,3 E} + 2,8 e^{-5,2 E}$;

2 — формула $\nu = 0,075 E - \frac{0,067}{E}$; 3 — формула $\nu = 0,0755 \left(E - \frac{1}{E} \right)$.

лентных движений, благодаря тому, что даже при тщательном выполнении вискозиметра сточная трубка в месте сочленения с резервуаром образует уступ и острый угол. Наличие турбулентности при истечении жидкости с вязкостью, превышающей $1,2^\circ E$, подтверждается наличием расхождений между экспериментальными данными и формулой (17), которая является, безусловно, справедливой для ламинарного потока жидкости. Для учета

дополнительного сопротивления, возникающего при турбулентном течении, автор ввел поправку к формуле (17) в следующем виде:

$$\Delta = A_1 e^{-p_1 E} + A_2 e^{-p_2 E} + \dots + A_n e^{-p_n E}. \quad (22)$$

При этом оказалось, что при ограничении ряда (22) двумя первыми членами получается вполне удовлетворительный для практических целей результат, при котором максимальное расхождение с экспериментальными данными не превышает 2%. Эта поправка равна

$$\Delta = -0,085 e^{-1,3 E} + 2,8 e^{-5,3 E}. \quad (23)$$

С учетом этой поправки формула (17) примет следующий вид:

$$v = 0,075 E - \frac{0,037}{E} - 0,035 e^{-1,3 E} + 2,8 e^{-5,3 E}. \quad (24)$$

Данные табл. 2 показывают, что эта формула дает хорошие совпадения с экспериментальными данными. На рис. 3 графически представлены отклонения от экспериментальных данных значений кинематической вязкости, вычисленных по формулам (9), (17) и (24). Поскольку формулы (17) и (24) отличаются одна от другой только на величину поправки на турбулентность движения, то рис. 3 дает представление о влиянии этой поправки на результаты вычисления. Из рассмотрения табл. 2 и сопоставления рисунков 1, 2 и 3 видно, что наилучшие результаты дают формулы ВНИИМ (6) и формула (24), которые можно считать равноценными в отношении точности. Однако вследствие некоторой сложности вычислений по формуле (24), формуле ВНИИМ следует отдать предпочтение.

Для технических расчетов, не требующих большой точности, рекомендуется пользоваться приближенной формулой (9)

$$v = 0,0755 \left(E - \frac{1}{E} \right),$$

предложенной автором и обеспечивающей точность пересчета в 1—2%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Harner a. Bruns, J. Inst. Petr. Techn. Jan. (1936).
2. Harner a. Kelly, Petr. Zis. 29, 1 (1933).
3. Ubbelohde, Tabellen zum Englerschen Viskosimeter, Leipzig (1907).
4. Mises, Elemente der techn. Hydromechanik, Leipzig (1914).
5. Kirsten u. Schiller, Zis. ang. Math. u. Mech., 5, III (1925).
6. Herschell, Bur. Stand. Techn. Paper № 112, (1919).
7. Vogel, Zis. ang. Chem. 35, 561 (1922).
8. Ubbelohde, Petr. Zis., 29, 28 (1933).
9. Poissenille, C. R. 11, 961 (1840).
10. Hagenbach, Pogg. Ann. 99, 221 (1856).
11. Couette, Ann. Chim. Phys. 21, 433 (1890).
12. Померанцев, Нефр. Хоз. 11, 719 (1929).
13. Herschell, Bur. Stand. Techn. Paper № 100 (1917).

А. Ф. ДОБРЯНСКИЙ И В. Н. КУЧИНСКИЙ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ СМЕСЕЙ МАСЕЛ

Задача определения вязкости смесей масел часто возникает в предприятиях, изготавливающих требуемые рынком марки масел путем смешивания двух или большего числа масел с определенной вязкостью. Большое число формул, предложенных для такого рода расчетов, отличается значительной неточностью как только вопрос касается масел со значительно различающейся вязкостью. Вязкость смесей масел очень далека от аддитивных свойств, и простые формулы, предложенные Бингэмом [1], Пьяла [2], Шведгелмом [3], Ольшлагером [4], Шульцем [5], Эспи [6], Леу [7] и другими не отвечают своему назначению, так как приводят к очень большим ошибкам.

Операция смешивания двух масел для получения смеси масел с заданной вязкостью относится к числу весьма обычных на масловарках и решается большей частью подбором нужных количеств исходных масел. При этом приходится лишь приблизительно определять необходимые количества компонентов и окончательно доводить вязкость приготавливаемой смеси до заданной величины последующим экспериментальным исправлением, то есть добавкой того или иного масла, большей частью более вязкого, потому что вязкость смесей всегда ближе к менее вязкому маслу, чем должно было бы получиться по правилу смешения.

Существенное улучшение в определении вязкости смеси масел внесли Молин и Гурвич [8]. Они предположили, что всякое масло можно рассматривать как смесь из менее и более вязкого масла. Затем была построена эмпирическая кривая смесей масел, охватывающих интервал вязкости от 2,50 до 67,4 градусов Энглера (Молин). Гурвич проверил данные Молина и дал свою таблицу, охватывающую вязкость от 1,5 до 60°E. Таблица Гурвича общеизвестна, и способ пользования ею ясен из дальнейшего изложения, где приведен пример пользования предлагаемой нами новой таблицей. Таблица Гурвича лишена физических обоснований; так же, как и наша таблица, она построена на эмпирических данных и потому отвечает поставленным задачам гораздо лучше всех

предложенных формул. Недостатком ее является ряд моментов, которые сводятся к нижеследующим: 1. Вязкость вычисляется только в градусах Энглера, пересчет на другие единицы неточен или даже невозможен. 2. Таблица Гурвича не предусматривает возможности вычисления вязкости смесей с компонентом, вязкость которого ниже $1,5^{\circ}E$. 3. Из практических данных известно, что результаты вычисления получаются неточными, когда смешиваются минеральные масла с растительными и животными маслами, или даже с маслами типа брайт-стоков.

Предпринятая химической лабораторией ВНИИМ работа имела целью составление новой таблицы, пересчет по которой был бы свободен от указанных недостатков. Для этой цели были выбраны

два нефтяных масла с крайними значениями вязкости и из этих масел приготовлены смеси, для которых была точно определена кинематическая вязкость. Смеси составлялись с таким расчетом, чтобы на всем исследуемом интервале промежуточные значения вязкости смесей были распределены равномерно. Затем была построена кривая путем нанесения по ординате значений вязкости, а по абсциссе процентного содержания более вязкого компонента B смеси масел. Кривая была построена в большом масштабе для удобства интерполяции (рис. 1). В прилагаемой таблице приведены расчетные данные, выведенные из диаграммы, составленные таким образом, чтобы по возможности сократить нахождение нужных значений вязкости. Таблица составлена на основе предположения, что вязкость каждого из смешиваемых компонентов может быть представлена как вязкость смеси из более вязкого и из менее вязкого масла.

В первом столбце указана наблюдаемая кинематическая вязкость смесей, состоящих из двух масел с вязкостью при 20° в 0,10 и 20,72 стокса, взятых в различных соотношениях от 1 до 100%, показанных в столбце 2. Всякое масло, кинематическая вязкость которого укладывается в указанные пределы, можно рассматривать как смесь этих двух масел, и вязкость его можно определить, пользуясь таблицей. Так, например, масло с кинематической вязкостью 7,10 стокса можно рассматривать как смесь из более вязкого масла B , взятого в количестве 86%, и менее вязкого — в количестве 14%.

Допустим, что требуется определить вязкость смеси, составленной из 20% масла с вязкостью 3,17 стокса и 80% масла

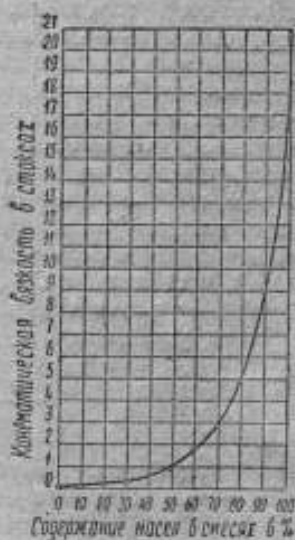


Рис. 1. Кривая вязкости смесей смазочных масел.

с вязкостью 11,41 стокса. В столбце 1 таблицы находим вязкость 3,17 и соответствующее ей содержание более вязкого компонента 72,1 (интерполяцией). Подобным же образом находим, что для масла с вязкостью 11,41 содержание более вязкого компонента составляет 93,4. По правилу смешения, смесь из этих масел в отношении 20:80 содержит вязкого компонента

$$\frac{72,1 \cdot 20 + 93,4 \cdot 80}{100} = 89,14\%$$

В графе 2 находим ближайшие значения 89,1 и 89,2 и соответствующие им величины кинематической вязкости 8,55 и 8,60 стокса, откуда получаем интерполированием искомую вязкость смеси 8,57 стокса.

Подобным же образом можно решить и обратную задачу определения количеств масел с известными вязкостями, при смешении которых должна получиться смесь заданной вязкости. Допустим, что имеется два масла с вязкостями 4 и 6,4 стокса и требуется изготовить смесь этих масел с вязкостью 5,1 стокса. По тем же таблицам находим прежде всего, какие содержания более вязкого компонента отвечают вязкости исходных масел: для масла с вязкостью 4 стокса это будет 76,5 и для масла с вязкостью 6,4 стокса 84,3%. Приготавливаемому маслу с вязкостью 5,1 стокса соответствует величина 80,7. Ответ находится путем решения уравнения:

$$\frac{76,5x + 84,3(100 - x)}{100} = 80,7,$$

откуда требуемые количества компонентов будут: для масла с вязкостью 4 стокса 46,2% и для масла с вязкостью 6,4 стокса 53,8%.

Для того, чтобы сравнить расчетные данные с экспериментальными, из 11 различных масел с кинематической вязкостью от 0,1067 до 20,7259 стокса были приготовлены смеси, по объему через интервал в 10%. Всего было получено 108 смесей, причем смешивались как смежные по вязкости масла, так и сильно различающиеся между собой по вязкости. Кинематическую вязкость этих смесей определяли при 20,6° в капиллярных вискозиметрах Уббелоде с висющим уровнем. Для большинства смесей были подсчитаны вязкости по указанной таблице, и во всех случаях получено очень хорошее совпадение.

Приводим несколько примеров, показывающих, что вычисленная по таблице вязкость смеси масел почти не отличается от экспериментально найденной. Погрешности не превосходят двух единиц во втором знаке после запятой, что практически не имеет значения, в особенности в случае последующего пересчета кинематической вязкости смеси в вязкость по Энглеру.

Таблица
для определения кинематической вязкости смесей масел

Кинематическая вязкость в стоксах	% В	Кинематическая вязкость в стоксах	% В	Кинематическая вязкость в стоксах	% В	Кинематическая вязкость в стоксах	% В
0,10	0,00	0,58	41,2	1,71	60,0	4,20	77,4
0,11	2,0	0,59	41,7	1,75	60,4	4,30	77,8
0,12	4,0	0,60	41,9	1,80	60,9	4,40	78,2
0,13	6,0	0,61	42,3	1,85	61,4	4,50	78,6
0,14	8,4	0,62	42,6	1,90	61,9	4,60	79,0
0,15	9,8	0,63	42,9	1,95	62,4	4,70	79,3
0,16	11,0	0,64	43,3	2,00	62,8	4,80	79,6
0,17	12,5	0,65	43,6	2,05	63,3	4,90	80,0
0,18	13,9	0,66	43,9	2,10	63,8	5,00	80,4
0,19	15,1	0,67	44,2	2,15	64,2	5,10	80,7
0,20	16,3	0,68	44,5	2,20	64,7	5,20	81,0
0,21	17,6	0,69	44,7	2,25	65,1	5,30	81,3
0,22	18,7	0,70	45,0	2,30	65,5	5,40	81,6
0,23	19,8	0,71	45,3	2,35	66,0	5,50	81,9
0,24	20,7	0,72	45,5	2,40	66,4	5,60	82,2
0,25	21,5	0,73	45,8	2,45	66,9	5,70	82,4
0,26	22,5	0,74	46,1	2,50	67,2	5,80	82,7
0,27	23,5	0,75	46,3	2,55	67,7	5,90	83,0
0,28	24,0	0,76	46,6	2,60	68,1	6,00	83,2
0,29	25,0	0,77	46,8	2,65	68,4	6,10	83,5
0,30	25,7	0,78	47,1	2,70	68,9	6,20	83,8
0,31	26,4	0,79	47,4	2,75	69,3	6,30	84,0
0,32	27,0	0,80	47,6	2,80	69,6	6,40	84,3
0,33	27,9	0,82	48,1	2,85	70,0	6,50	84,5
0,34	28,4	0,85	48,7	2,90	70,4	6,60	84,8
0,35	29,3	0,87	49,1	2,96	70,7	6,70	85,0
0,36	30,0	0,90	49,7	3,00	71,1	6,80	85,3
0,37	30,7	0,92	50,0	3,05	71,4	6,90	85,6
0,38	31,2	0,95	50,5	3,10	71,7	7,00	85,8
0,39	31,9	0,98	51,0	3,15	72,0	7,10	86,0
0,40	32,4	1,00	51,3	3,20	72,3	7,20	86,2
0,41	33,0	1,02	51,5	3,25	72,6	7,30	86,5
0,42	33,7	1,05	52,0	3,30	72,9	7,40	86,7
0,43	34,2	1,08	52,4	3,35	73,2	7,50	86,9
0,44	34,8	1,10	52,7	3,40	73,5	7,60	87,2
0,45	35,3	1,15	53,5	3,45	73,8	7,70	87,4
0,46	35,8	1,19	54,0	3,50	74,1	7,80	87,6
0,47	36,4	1,24	54,4	3,55	74,4	7,90	87,8
0,48	36,9	1,27	55,0	3,60	74,6	8,00	88,0
0,49	37,3	1,30	55,4	3,65	74,9	8,10	88,2
0,50	37,6	1,35	56,0	3,70	75,1	8,20	88,4
0,51	38,3	1,40	56,6	3,75	75,4	8,30	88,6
0,52	38,8	1,45	57,2	3,80	75,6	8,40	88,8
0,53	39,3	1,50	57,7	3,85	75,8	8,50	89,0
0,54	39,9	1,52	58,0	3,90	76,0	8,60	89,2
0,55	40,1	1,56	58,4	3,95	76,3	8,70	89,4
0,56	40,4	1,60	58,9	4,00	76,5	8,80	89,6
0,57	40,8	1,65	59,5	4,10	77,0	8,90	89,8

Кинематическая вязкость в стоксах	% В	Кинематическая вязкость в стоксах	% В	Кинематическая вязкость в стоксах	% В	Кинематическая вязкость в стоксах	% В
9,00	90,0	11,10	93,1	13,80	95,1	17,30	97,8
9,10	90,2	11,20	93,2	14,00	95,2	17,40	97,9
9,20	90,4	11,30	93,3	14,20	95,4	17,50	98,0
9,30	90,6	11,40	93,4	14,30	95,5	17,80	98,9
9,40	90,7	11,50	93,5	14,40	95,6	17,90	98,3
9,50	90,9	11,60	93,6	14,50	95,7	18,00	98,4
9,60	91,0	11,70	93,7	14,70	95,8	18,30	98,6
9,70	91,2	11,80	93,8	14,90	96,0	18,50	98,8
9,80	91,4	11,90	93,9	15,00	96,1	18,60	98,9
9,90	91,5	12,00	94,0	15,20	96,2	18,70	99,0
10,00	91,7	12,10	94,0	15,50	96,4	19,00	99,1
10,10	91,8	12,20	94,1	15,60	96,5	19,30	99,2
10,20	92,0	12,30	94,1	15,70	96,6	19,50	99,3
10,30	92,1	12,40	94,2	16,00	96,8	19,70	99,4
10,40	92,2	12,50	94,3	16,10	96,9	20,00	99,5
10,50	92,3	12,70	94,4	16,20	97,0	20,15	99,6
10,60	92,4	12,90	94,5	16,45	97,2	20,30	99,7
10,70	92,6	13,00	94,6	16,70	97,4	20,50	99,8
10,80	92,7	13,20	94,7	16,80	97,5	20,65	99,9
10,90	92,9	13,40	94,8	17,00	97,6	20,72	100,0
11,00	93,0	13,50	95,0	17,10	97,7		

А. 1. Машинное масло: кинем. вязкость 3,1678 стокса
2. Автол 18: " " " " 11,4111 "

Смесь из: Вычисл. Эксперим.

1—20%, 2—80% 4,00 стокса 4,0043 стокса
60 " 40 " 6,62 " 6,6098 "
80 " 20 " 8,57 " 8,5340 "

Б. 1. Вазелиновое масло: кинем. вязкость 0,2515 стокса
2. Брайт-сток: " " " " 20,7259 "

Смесь из: Вычисл. Эксперим.

1—40%, 2—60% 1,11 стокса 1,1047 стокса
60 " 40 " 2,67 " 2,6427 "
80 " 20 " 6,40 " 6,3685 "

1. Веретенное масло: кинем. вязкость 1,0401 стокса
2. Машинное масло: " " " " 3,1678 "

Смесь из: Вычисл. Эксперим.

1—10%, 2—90% 1,19 стокса 1,1865 стокса
30 " 70 " 1,52 " 1,5197 "
50 " 50 " 1,90 " 1,8936 "
70 " 30 " 2,35 " 2,3459 "
90 " 10 " 2,88 " 2,8770 "

Предлагаемая таблица для пересчета вязкости смесей масел в единицах кинематической вязкости по точности значительно выше известной таблицы Молин-Гурвича и, во-первых, покрывает гораздо более широкий диапазон вязкости минеральных масел и, во-вторых, пригодна, как показала экспериментальная проверка, для расчета вязкости смесей минеральных масел с растительными или животными маслами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bingham a. Harrison, J. phys. Chem. 66, 1.
2. Puhila, Pat. Zts. 7; 267; Труды Бак. отд. Русск. Техн. Общ. 1, 116 (1916).
3. Schwedhelm, Chem. Ztg. 44, 638 (1920).
4. Oelschlager, Zts. Ver. deutsch. Ing. 62, 422 (1920).
5. Schulz, Chem. Rev. 297 (1909).
6. Esру, Petroleum, 8, 27 (1916).
7. Leu, Chem. Cbl. II, 570 (1924).
8. Молин, Труды Бак. отд. Русск. Техн. Общ., № 5 (1915); Гурвич. Научные основы переработки нефти (1925).

М. Д. ИППИЦ

АРЕОМЕТР ПОЛНОГО ПОГРУЖЕНИЯ

При измерении плотности жидкостей обыкновенным ареометром большое затруднение для достижения точности измерения создают явления капиллярности. В особенности это сказывается при определении плотности морской воды вследствие особенностей капиллярных свойств ее, а также вследствие требования большой точности, предъявляемого в этом случае. Влияние поверхностного слоя жидкости исключается при измерении ее плотности ареометром полного погружения, то есть таким ареометром, который во время измерения остается в равновесии внутри жидкости. При измерении плотности морской воды находит себе применение ареометр полного погружения типа Нансена. Этот ареометр представляет собою стеклянный поплавок цилиндрической формы, с балластом в нижней его части. Поплавок оканчивается сверху небольшим оттянутым стерженьком для насаживания на него кольцеобразных гирек. В жидкостях различной плотности для его полного погружения требуется различная добавочная нагрузка. Для этого и служат платиновые кольцеобразные гирьки того же веса, как и гири обыкновенного аналитического разновеса. Эти гири позволяют составить любую нагрузку для того, чтобы погрузить ареометр в жидкость любой плотности. Плотность жидкости определится в зависимости от нагрузки.

Настоящая работа имела целью всесторонне исследовать этот прибор, дать ему необходимые теоретические обоснования, изготовить пробный ареометр, испытать его и наконец дать методу пользования им, составив необходимую для этого таблицу.

Пусть G истинный вес поплавка, G_1 — вес дополнительной нагрузки, требуемой для того, чтобы ареометр находился в состоянии равновесия внутри жидкости, температура которой t , а плотность D_t (г/мл). Обозначим далее через V_t объем поплавка и через v_t — объем дополнительной нагрузки из платиновых гирь. Тогда уравнение равновесия ареометра, плавающего внутри жидкости при температуре t , будет следующее:

$$G + G_1 = (V_t + v_t) D_t \quad (1)$$

Так как $v_t = \frac{G_t}{\delta_t}$, где δ_t — плотность платины, то, подставляя вместо v_t его выражение и решая уравнение относительно D_t , получим формулу для определения плотности в зависимости от нагрузки G_t :

$$D_t = \frac{G + G_t}{V_t + \frac{G_t}{\delta_t}}$$

Для определения V_t можно поставить следующее условие. Пусть при температуре t_0 в дистиллированной воде $G_t = 0$, то есть ареометр в дистиллированной воде при температуре t_0 находится в равновесии внутри жидкости, тогда уравнение равновесия примет вид:

$$G = V_{t_0} \cdot E_{t_0} = V_t (1 + \alpha \delta t_0) E_{t_0},$$

где E_{t_0} — плотность дистиллированной воды при температуре t_0 , α — коэффициент объемного расширения стекла и $\delta t_0 = t_0 - t$.

Тогда

$$V_t = \frac{G}{(1 + \alpha \delta t_0) E_{t_0}}. \quad (2)$$

Подставив выражение для V_t в формулу для определения плотности жидкости в зависимости от нагрузки имеем

$$D_t = \frac{G + G_t}{G \cdot \frac{\delta_t}{(1 + \alpha \delta t_0) E_{t_0}} + G_t}. \quad (3)$$

При этом нужно точно знать ту температуру дистиллированной воды, при которой поплавок без гирь находится в равновесии. Истинный вес поплавка определяется по формуле

$$G = P + V_t (1 + \alpha \delta t_1) e_{t_1},$$

где P — вес гирь, уравновешивающих поплавок, приведенный к пустоте, t_1 — температура взвешивания:

$$\delta t_1 = t_1 - t,$$

e_{t_1} — плотность воздуха при температуре взвешивания.

V_t можно заменить его выражением (2), тогда

$$G = P + \frac{G}{(1 + \alpha \delta t_0) E_{t_0}} \cdot (1 + \alpha \delta t_1) e_{t_1}.$$

Решая уравнение относительно G и пренебрегая членом $\alpha \delta t_1 e_{t_1}$ вследствие его малости, получаем формулу, служащую для определения истинного веса поплавка:

$$G = \frac{P(1 + \alpha \delta t_0) E_{t_0}}{(1 + \alpha \delta t_0) E_{t_0} - e_{t_1}}. \quad (4)$$

Обыкновенный ареометр для морской воды дает значение плотности ее при температуре 17,5°C, рассчитанной по отношению к воде при 17,5°C. Приспосабливая формулу (3) к такому условию, находим:

$$D_{17,5/17,5} = \frac{G + G_1}{G \cdot \frac{\delta_{17,5}}{(1 + \alpha \delta t_0) E_{16}} + G_1} \cdot \frac{\delta_{17,5}}{E_{17,5}}, \quad (5)$$

где $\delta t_0 = t_0 - 17,5$.

Для этой температуры и был изготовлен пробный ареометр полного погружения. Его объем определялся при температуре 17,5°C. Выбор этой температуры обусловлен следующими соображениями.

1. Результаты определения плотности ареометром полного погружения надо было сравнить с показаниями обыкновенного ареометра. Самым точным ареометром является ареометр для морской воды, показания которого отнесены к температуре 17,5°C.

2. Формула (5) упрощается если для определения объема поплавок поставить условие, чтобы он находился в равновесии в дистиллированной воде без дополнительной нагрузки при температуре 17,5°C, то есть, чтобы $G_1 = 0$ когда $t_0 = 17,5^\circ\text{C}$. Формулы (5) и (4) примут тогда соответственно следующий вид:

$$D_{17,5/17,5} = \frac{G + G_1}{G \cdot \frac{\delta_{17,5}}{E_{17,5}} + G_1} \cdot \frac{\delta_{17,5}}{E_{17,5}} \quad (6)$$

$$G = \frac{P \cdot E_{17,5}}{E_{17,5} - \epsilon t_1} \quad (7)$$

Главная задача состояла в том, чтобы практически осуществить определение объема поплавок. Это было выполнено путем подгонки веса поплавок таким образом, чтобы он находился в равновесии в дистиллированной воде при температуре 17,5°C.

Для этого был взят поплавок с оттянутой незаплавленной тонкой шейкой, загруженный дробью настолько, чтобы он мог плавать в дистиллированной воде не погружаясь в нее целиком. Затем произведена догрузка дробью в дистиллированной воде при температуре 17,5°C так, чтобы верхний край мениска воды был возможно ближе к концу стержня поплавок. Затем стержень был заплавлен. Оставалось для полного погружения ареометра в воду так подобрать дополнительную нагрузку в виде колечка из тонкой платиновой проволоки, чтобы ареометр в дистиллированной воде при температуре 17,5°C находился бы в равновесии. Выполнялось это путем осторожного подтачивания платиновой проволоки, в результате чего удалось достичь полного погружения поплавок и нахождения его в безразличном состоянии в дистиллированной воде в течение продолжительного

времени. Температура воды в цилиндре, куда был погружен поплавков, точно поддерживалась равной $17,5^{\circ}\text{C}$ с помощью водяной ванны. Затем поплавков вместе с платиновым кольцом был взвешен. Вес его в воздухе, с учетом потери веса гирь, оказался равным $77,6279$ г, при этом средняя плотность воздуха была принята равной:

$$\epsilon_i = 0,0012048 \text{ г/мл.}$$

Постоянный довесок в виде платинового кольца был включен в истинный вес поплавка и, таким образом, по формуле (7)

$$G = \frac{77,6279 - 0,998712}{0,998712 - 0,0012048} = 77,7217 \text{ г.}$$

Проверка показаний ареометра полного погружения была проведена сравнением его показаний с эталонным ареометром № 10 фирмы Боден для морской воды с наименьшими делениями шкалы в $0,0002$ ед. плотности.

Испытание произведено в серно-винном растворе, так как ареометр для морской воды эталонирован в серно-винных растворах. Эти растворы наиболее подходят для этой цели вследствие хорошей смачиваемости стержня обыкновенного ареометра и устранения, таким образом, возможных погрешностей, происходящих в силу явлений капиллярности.

Для пробного испытания вместо того, чтобы подгонять для данной жидкости вес платинового довеска, был избран другой путь: подгонялась плотность раствора для избранного нами довеска, сохраняя при этом температуру $17,5^{\circ}\text{C}$. Этот довесок в виде спирали был сделан из толстой платиновой проволоки. Вес G_1 этой спирали оказался равным $2,5079$ г. Плотность раствора при температуре $17,5^{\circ}\text{C}$ была установлена так, чтобы ареометр полного погружения с добавочной нагрузкой G_1 находился бы внутри жидкости в равновесии. Плотность раствора для нагрузки $2,5079$ г была вычислена по формуле (6):

$$D_{17,5/17,5} = 1,03072.$$

Ареометр для морской воды, погруженный в этот же раствор одновременно с ареометром полного погружения, дал следующие показания плотности раствора:

- 1) 1,03070
- 2) 1,03072
- 3) 1,03070

при температуре раствора $17,5^{\circ}\text{C}$. Таким образом, расхождение в показаниях между двумя ареометрами не превышало $0,00002$ единиц плотности, то есть $0,1$ наименьшего деления шкалы по ареометру № 10, что полностью обеспечивает правильность работы ареометра полного погружения.

Однако таким ареометром можно определить плотность жидкостей при температуре $17,5^{\circ}\text{C}$ и ниже. При температурах выше $17,5^{\circ}\text{C}$ он может опускаться без всякой нагрузки. Чтобы сделать возможным измерение плотности для жидкостей при температурах выше и ниже $17,5^{\circ}\text{C}$, нужно поставить условие, чтобы он плавал в самой легкой жидкости при самой высокой из всех могущих иметь место температур. Так как ареометр полного погружения был предназначен для морской воды, а плотность морской воды всегда больше плотности дистиллированной воды и температура может быть выше и ниже $17,5^{\circ}\text{C}$, то можно поставить условие, чтобы ареометр находился во взвешенном состоянии в дистиллированной воде без нагрузки, например, при температуре $+30^{\circ}\text{C}$. Тогда $t_0 = 30^{\circ}\text{C}$ и формула (5) для определения плотности примет вид

$$D_{17,5/17,5} = \frac{G + G_1}{G \frac{v_{17,5}}{(1 + 12,5\alpha) E_m} + G_1 \frac{v_{17,5}}{E_{17,5}}}, \quad (8)$$

а формула (4) для определения истинного веса поплавка — вид

$$G = \frac{P(1 + 12,5\alpha) E_m}{(1 + 12,5\alpha) E_{sp} - e_t}, \quad (9)$$

где e_t — плотность воздуха при температуре взвешивания t_1 .

По формуле (8) можно определять плотность жидкостей только при температуре $17,5^{\circ}\text{C}$. При всякой другой температуре объемы ареометра и добавочной платиновой гирьки изменятся, поэтому необходимо вводить соответствующую поправку на расширение. Ее определим следующим образом:

Из уравнения равновесия (1) плотность при любой температуре t выражается следующим образом:

$$D_{t/17,5} = \frac{G + G_1}{V_t + v_t} \cdot \frac{1}{E_{17,5}}.$$

Но $V_t = V_{17,5} (1 + \alpha \delta t)$ и $v_t = v_{17,5} (1 + \beta \delta t)$, где $\delta t = t - 17,5$. Коэффициенты объемного расширения стекла α и платины β очень близки, поэтому, принимая их равными, можно написать, что

$$V_t + v_t = (V_{17,5} + v_{17,5}) (1 + \alpha \delta t)$$

тогда

$$D_{t/17,5} = \frac{G + G_1}{V_{17,5} + v_{17,5}} \cdot \frac{1}{E_{17,5}} \cdot \frac{1}{1 + \alpha(t - 17,5)} = \frac{D_{17,5/17,5}}{1 + (t - 17,5)\alpha}$$

или приближенно

$$D_{t/17,5} = D_{17,5/17,5} - (t - 17,5)\alpha \cdot D_{17,5/17,5} \quad (10)$$

то есть плотность для любой температуры можно выразить через плотность при температуре $17,5^{\circ}\text{C}$, что очень важно, так

как расчет плотности при данной нагрузке можно вести по формуле (8) для температуры 17,5°C. Для этой температуры составлена табл. 1. Плотность при другой температуре определяется путем введения поправки по формуле (10) или пользуясь табл. 2.

Для удобства пользования ареометром полного погружения необходимо иметь таблицу, дающую возможность определять плотность в зависимости от дополнительной нагрузки, сверх постоянного довеса, включенного в величину G . Расчет такой таблицы был произведен для случая, когда вес поплавка равен 100 г при условии, что ареометр плавает в дистиллированной воде при +30°C без нагрузки или с нагрузкой, вес которой включен в вес равный 100 г.

Таблица, вычисленная для одного определенного ареометра, то есть весом, например, в 100 г, может служить при определении плотности и другим подобным ареометром, если его объем определен при тех же условиях, как объем первого ареометра. Если вес второго ареометра $G^1 = kG$, где G — вес первого ареометра, для которого составлена таблица, то из уравнения равновесия (3) для второго ареометра будем иметь:

$$G^1 + G^1_1 = \left[\frac{G^1}{(1 + \alpha \Delta t_0) E t_0} + \frac{G^1_1}{\delta_t} \right] D_t,$$

откуда следует что,

$$G^1_1 = \frac{\frac{D_t}{(1 + \alpha \Delta t_0) E t_0} - 1}{1 - \frac{D_t}{\delta_t}} G^1 = A G^1 = A k G.$$

Но из того же уравнения (3) для первого ареометра следует:

$$G_1 = \frac{\frac{D_t}{(1 + \alpha \Delta t_0) E t_0} - 1}{1 - \frac{D_t}{\delta_t}} G = A G.$$

Таким образом

$$G^1_1 = k G_1, \quad (11)$$

потому что коэффициент A один и тот же для двух ареометров при поставленном выше условии. Следовательно, при пользовании этой таблицей для всякого другого ареометра нагрузки нужно соответственно делить на коэффициент k .

Ниже приведена таблица плотностей к ареометру полного погружения для морской воды для различных нагрузок через каждые 100 мг (табл. 1). При изменении плотности в среднем на 0,00095 г/мл нагрузка меняется на 100 мг, таким образом, интерполированием можно легко определять плотность для любой промежуточной нагрузки, и ошибка при этом не превысит 0,00001 ед. плотности. В табл. 2 приведены поправки на температуру для трех различных нагрузок.

Таблица плотностей при различных нагрузках

Нагрузка G_1	Плотность $D_{17,5/17,5}$	Нагрузка G_1	Плотность $D_{17,5/17,5}$	Нагрузка G_1	Плотность $D_{17,5/17,5}$
0 кг	0,99727	2,100 г	1,01722	4,100 г	1,03618
100 "	822	2,200 "	817	4,200 "	713
200 "	917	2,300 "	912	4,300 "	808
300 "	1,00012	2,400 "	1,02006	4,400 "	902
400 "	107	2,500 "	101	4,500 "	997
500 "	202	2,600 "	196	4,600 "	1,04092
600 "	297	2,700 "	291	4,700 "	186
700 "	392	2,800 "	386	4,800 "	281
800 "	487	2,900 "	481	4,900 "	376
900 "	582	3,000 "	576	5,000 "	470
1,000 г	677	3,100 "	670	5,100 "	565
1,100 "	772	3,200 "	765	5,200 "	660
1,200 "	867	3,300 "	860	5,300 "	754
1,300 "	962	3,400 "	955	5,400 "	849
1,400 "	1,01057	3,500 "	1,03050	5,500 "	944
1,500 "	152	3,600 "	144	5,600 "	1,05038
1,600 "	247	3,700 "	239	5,700 "	133
1,700 "	342	3,800 "	334	5,800 "	227
1,800 "	437	3,900 "	429	5,900 "	322
1,900 "	532	4,000 "	523	6,000 "	417
2,000 "	627				

Таблица 2

Таблица поправок на температуру, рассчитанная для трех нагрузок

t	Нагрузка в г		
	0	3	6
Поправки, выраженные в единицах 5-го десятичного знака плотности			
- 5	+56	+58	+59
0	44	45	46
+ 5	31	32	33
10	19	19	20
15	6	6	7
20	- 6	- 6	- 7
25	19	19	20
30	31	32	33

Применение этих таблиц покажем на следующем примере.

Найдем плотность жидкости, в которой ареометр находится в равновесии с дополнительной нагрузкой $G^1=1$ г. При этом все ареометры $G^1=80$ г, а температура испытуемой жидкости равна 20°C . Так как табл. 1 рассчитана для $G=100$ г, то $G^1=80=100k$ и коэффициент $k=0,8$. Для того, чтобы воспользоваться табл. 1, нужно найти соответствующее G_1 , определяемое равенством (11), откуда следует, что $G_1 = \frac{1}{0,8} = 1,25$ г. Плотность жидкости, соответствующая нагрузке 1,25 г равна 1,00914. Так как табл. 1 дает плотность жидкости при температуре $17,5^\circ\text{C}$, то при погружении ареометра в жидкость иной температуры нужно вводить поправку по формуле (10) или по табл. 2. В данном случае эта поправка равна $-0,00006$ и, следовательно, плотность жидкости при температуре 20°C оказывается равной 1,00908.

ТАБЛИЦА ПЕРВАЯ

Таблица первая

Плотности жидкости при температуре $17,5^\circ\text{C}$ для ареометров с грузом $G=100$ г и с дополнительной нагрузкой G^1 г. Коэффициент $k = \frac{G^1}{G}$.

G^1 (г)	k	Плотность жидкости при $17,5^\circ\text{C}$
100	1,00	1,00000
90	0,90	1,00000
80	0,80	1,00000
70	0,70	1,00000
60	0,60	1,00000
50	0,50	1,00000
40	0,40	1,00000
30	0,30	1,00000
20	0,20	1,00000
10	0,10	1,00000

Поправка к плотности жидкости при температуре $17,5^\circ\text{C}$ для ареометров с грузом $G=100$ г и с дополнительной нагрузкой G^1 г. Коэффициент $k = \frac{G^1}{G}$.

Температура t ($^\circ\text{C}$)	Поправка
15	0,00000
16	0,00000
17	0,00000
18	0,00000
19	0,00000
20	-0,00006
21	-0,00012
22	-0,00018
23	-0,00024
24	-0,00030
25	-0,00036
26	-0,00042
27	-0,00048
28	-0,00054
29	-0,00060
30	-0,00066

М. А. АЙЗИКОВИЧ

ПРИБОР ДЛЯ СУБЛИМАЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ (БЕНЗОЙНОЙ КИСЛОТЫ, НАФТАЛИНА И ДР.) В ЗНАЧИТЕЛЬ- НЫХ КОЛИЧЕСТВАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛЮМИНИЕВОГО СУБЛИМАТОРА

В предыдущей статье (1) нами был предложен лабораторный прибор для сублимации органических веществ в значительных количествах; (в среднем около 400 г в течение рабочего дня — 8—9 час.), не требующий специального оборудования. Прибор этот может быть собран из доступного любой лаборатории оборудования. Процесс сублимации в нем протекает гладко и бесперебойно; бензойная кислота, нафталин и другие органические вещества сублимируются в виде белоснежных хорошо выраженных кристаллов с выходом 90—95%.

Однако процесс сублимации в этом приборе требует более или менее регулярного наблюдения в связи с необходимостью периодического охлаждения сублиматора и выгребания из него кристаллов бензойной кислоты, что без специального оборудования устранить невозможно.

Необходимость систематической очистки значительных количеств бензойной кислоты, предназначенной для изготовления стандартного препарата с определенной теплотой горения, побудила нас разработать конструкцию прибора, устраняющую эти обстоятельства.

Для этой цели, на основе опыта работы с вышеуказанным прибором, нами предложена конструкция сублиматора (рис. 1) из листового алюминия с охлаждением стенок проточной водой и непрерывным удалением кристаллов по мере их образования. Водяное охлаждение дает возможность поддерживать температуру 50—70° благоприятную для роста кристаллов бензойной кислоты, которые, постепенно накапливаясь на стенках сублиматора, падают в приемник под влиянием своей тяжести.

Прибор для сублимации органических веществ с применением алюминиевого сублиматора не требует непрерывного наблюдения за ходом процесса.

Предлагаемый алюминиевый сублиматор (рис. 1 и 2) представляет собою в верхней своей части коробку из листового алюминия без дна с двумя горловинами в передней и задней стенках. Корпус коробки снаружи снабжен съемной оболочкой из латуни, состоящей из двух одинаковых частей с соответствующими

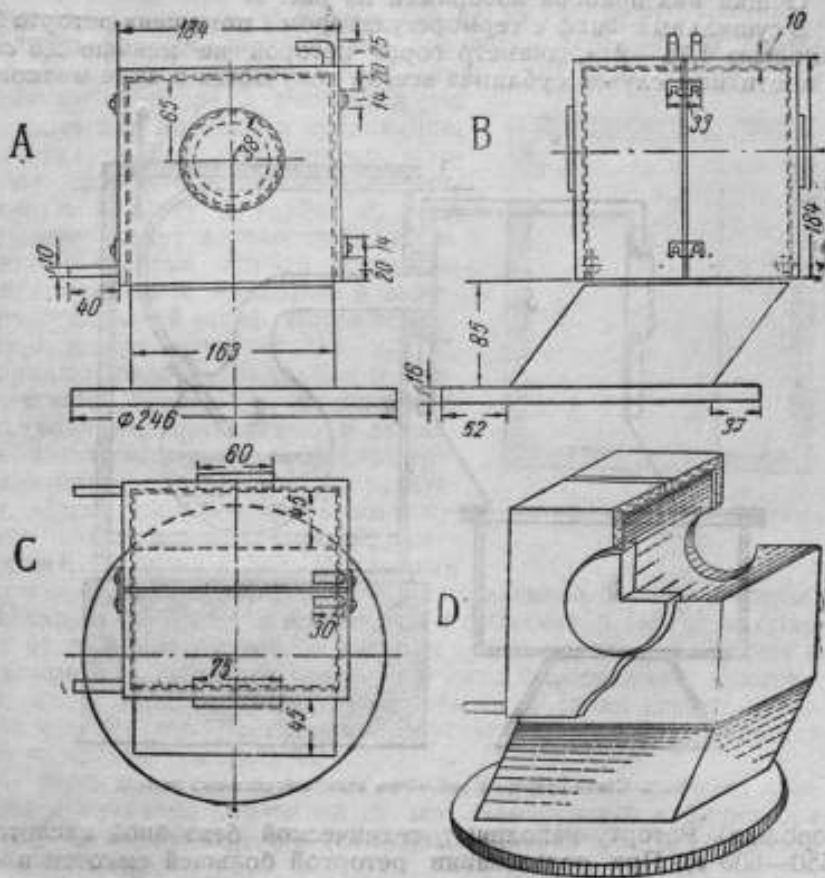


Рис. 1. А — вид спереди
 В — вид сбоку
 С — вид сверху
 D — общий вид сублиматора.

щими отверстиями для горловин коробки. В собранном виде оболочка придерживается алюминиевыми застёжками. Нижняя часть сублиматора скошена под углом 50° для отдаления эксикатора, служащего в качестве приемника, от сушильного шкафа (рис. 2). Края диска сублиматора загнуты вниз по раз-

меру борта эксикатора, на который сублиматор ставится во время работы.

Размеры корпуса сублиматора и горловин—их диаметр и длина, указанные на рис. 1, установлены опытным путем при работе с предложенным ранее прибором и должны быть соблюдены.

Общий вид прибора изображен на рис. 2.

В сушильный шкаф с терморегулятором 1 помещена реторта 2, емкостью 1,75—2 л, диаметр горла которой не меньше 2,6 см (в противном случае сублимат всегда получается в виде мелкого

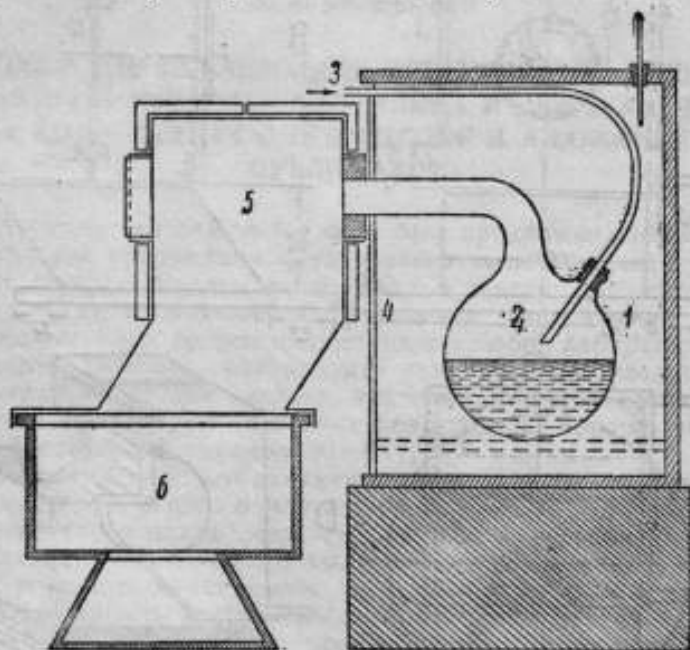


Рис. 2. Схема прибора в собранном виде (вертикальный разрез).

порошка). Реторту наполняют технической бензойной кислотой (550—600 г). При пользовании ретортой большей емкости процесс сублимации значительно замедляется. В тубус реторты вставляют изогнутую под углом стеклянную трубку 3, служащую для введения струи воздуха над возгоняемым веществом. Дверца сушильного шкафа открыта, и в просвет вставляют плотно пригнанный лист асбестового картона 4, состоящий из двух частей (рис. 3).

В более широкой полосе асбеста сделано два отверстия—для горла реторты и для стеклянной трубки, вставленной в тубус реторты. Узкая полоса асбеста, легко вынимающаяся, служит

для наблюдения за убыванием вещества в реторте (см. примечание 3). На выступающий конец горла реторты одевают еще широкую полосу асбеста, которая служит для предохранения передней части алюминиевого сублиматора от чрезмерного нагревания. Алюминиевый сублиматор ставят на эксикатор *б*, служащий приемником, и горловину сублиматора присоединяют к реторте с помощью корковой пробки так, чтобы конец горла реторты был вровень с внутренней стороной пробки и стенкой сублиматора. Противоположная горловина сублиматора, закрытая алюминиевой пробкой, служит для удобства присоединения сублиматора к реторте и для контроля над процессом сублимации.

Когда прибор подготовлен, вставляют свободно вдвигающуюся стеклянную палочку в трубку *3*, подводящую воздух в реторту (во избежание закупорки трубки возгоняющейся бензойной кислотой) и включают сушильный шкаф. Когда температура шкафа достигнет $215-220^{\circ}\text{C}$, вынимают палочку из трубки и присоединяют трубку к маломощной воздушной помпе, приводимой в движение электромотором, скорость вращения которого регулируется реостатом. Перед поступлением в воздушную помпу воздух промывается 50% раствором КОН и конц. H_2SO_4 . Медленным

током воздуха, проходящего над расплавленной бензойной кислотой, пары ее выводятся из реторты в сублиматор. При этом большая часть паров бензойной кислоты сублимируется на верхней и на боковых стенках сублиматора в виде белоснежных кристаллов, которые, постепенно увеличиваясь в своих размерах, падают в эксикатор. Часть паров, опускаясь вниз, конденсируется в виде мелких кристаллов.

В течение всего процесса сублимации благоприятная для роста кристаллов бензойной кислоты температура сублиматора $50-70^{\circ}$ легко поддерживается охлаждением стенок сублиматора проточной водой.

Максимальная производительность прибора 450—500 г в течение рабочего дня (8—9 час).

Примечания

При сублимации бензойной кислоты следует соблюдать ниже следующие условия, установленные на основании опыта:

1. Температура сушильного шкафа в течение всего процесса сублимации бензойной кислоты должна быть $215-220^{\circ}\text{C}$; при

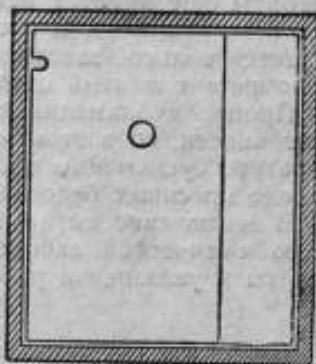


Рис. 3. Вид сушильного шкафа сверху.

более низкой температуре 200—210° скорость процесса сублимации замедляется, и бензойная кислота сублимируется не в виде кристаллов, а в виде мелкого легкого порошка.

2. Необходимо поддерживать непрерывную струю воздуха (2—3 пузырька в *сек*) над поверхностью возгоняемого вещества. При пропускании более быстрой струи воздуха скорость процесса увеличивается, но сублимат получается в виде мелкого порошка.

3. Чрезвычайно важно во-время проследить конец процесса сублимации и прекратить пропускание воздуха, когда на дне реторты еще имеется некоторое количество (2—3 *мл*) расплавленного вещества. В противном случае, когда на дне реторты остается только засохшая смола, весь сублимат в эксикаторе приобретает желтый оттенок.

Процесс сублимации нафталина проводят в такой же последовательности, но в этом случае сублимация протекает при температуре сушильного шкафа 160—170° С. Сублимат получается в виде красивых белоснежных чешуек.

В заключение выражаю глубокую благодарность руководителю химической лаборатории проф. С. В. Липину за ценные советы и указания в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Айзикович, Ж. Пр. Х. 5,460 (1947).

РОЛЬ И ЗАДАЧИ ХИМИИ В ОБЛАСТИ МЕТРОЛОГИИ*

Когда в 1774 году Лавуазье опубликовал под названием „*Opuscules physiques et chimiques*“ ряд своих исследований, являющихся звеньями той цепи, которая привела его к созданию кислородной теории горения, Парижская Академия наук дала следующую оценку этого труда:

„Лавуазье применил в области химии не только приборы и методы экспериментальной физики, но и точность и расчеты, характеризующие эту науку. Связь, которая намечается между этими двумя отраслями знаний, ознаменует блестящую эпоху развития той и другой, и Лавуазье является одним из тех, кто до настоящего времени сделал больше всего для установления этой связи“.

Прошло столетие и трудами Рауля и Вант-Гоффа между физикой и химией был перекинут широкий мост, возникла пограничная область — физическая химия, задача которой — изучение зависимости физических свойств от состава вещества.

История науки отмечает три момента, когда физика оказала особенно большое влияние на развитие химии. Эти три момента — открытие закона Авогадро-Ампера, введение в химию принципов термодинамики и создание квантовой механики.

Несомненно однако, что влияние было обоюдным. Открытие Фарадеем законов электролиза привело Стоней и Гельмгольца к мысли о прерывном строении электричества. Открытие Менделеевым периодического закона создало прочную основу для развития учения о строении атома.

Это обоюдное влияние и взаимное проникновение физики и химии явилось следствием исторической необходимости в процессе развития этих двух дисциплин. В своем развитии физика значительно раньше вступила в период точных количественных исследований. Для химии этот период начался лишь в конце XVIII столетия. Изучая в основном свойства общие для всех форм материи, физика во многих случаях не могла оставить без

* Доклад на юбилейной сессии Ученого Совета, посвященной 100-летию государственной службы мер и весов 5 июня 1945 г.

внимания химическую природу вещества. С другой стороны, по мере развития химии в сложном комплексе сопутствующих друг другу химических и физических явлений химик не мог обойтись без физики. Поэтому не удивительно, что многие великие создатели современной науки сочетали работу в этих двух дисциплинах, диалектически сходных и вместе с тем различных. Так, Бойлю, кроме закона, носящего его имя, мы обязаны новым представлением о химическом элементе, более близким к нашему современному понятию, чем к унаследованному им представлению алхимиков; Фарадею принадлежит честь открытия бензола, положившего начало новой эпохе в органической химии — изучения обширного класса ароматических соединений; основоположник спектрального анализа Бунзен обогатил науку открытием двух химических элементов — рубидия и цезия.

Период количественных исследований в химии выражался не только в установлении в начале этого периода количественных соотношений при образовании химических соединений, в установлении понятия об атомном весе элементов и понятия об эквиваленте, но и в том, что впоследствии химики стали применять численные величины, полученные в результате тех или иных измерений для характеристики химических свойств. Так, для сравнения силы различных кислот и щелочей служит степень электролитической диссоциации в растворах этих веществ, определяемая путем измерения электропроводности растворов или путем измерения коллигативных свойств. Для характеристики кислотности или щелочности среды служит концентрация водородных ионов, определяемая путем измерения электродвижущей силы водородной концентрационной цепи. Но еще чаще химик пользуется измерением физических свойств для характеристики полученных им простых тел или химических соединений. Вновь выделенное им вещество химик характеризует теми или иными физическими константами: плотностью, температурами плавления и кипения, электропроводностью, температурным коэффициентом сопротивления, данными гониометрических измерений кристаллов или численными значениями других свойств. Так проникли измерения в область химии, так завоевали они еще одну обширную область своего применения.

Огромное значение, которое получили измерения в области химии, привело к тому, что среди корифеев химической науки мы видим выдающихся метрологов и что многие выдающиеся химики внесли свой вклад в область измерительного дела. В числе создателей метрической системы мы видим Лавуазье. Совместно с Борда, Лавуазье определил температурный коэффициент расширения стержней, служивших при измерении дуги меридиана. Совместно со знаменитым кристаллографом Аюи он определил вес одного кубического фута воды, положенный в основу при установлении единицы массы — килограмма. Менделееву мы обязаны основанием Главной Палаты мер и весов, преемником кото-

рой является наш Институт, носящий имя Менделеева. Ему же мы обязаны принятием в России в 1899 году метрической системы в качестве факультативной системы мер. Лешателье и академику Курнакову принадлежит честь создания регистрирующего пирометра. В течение первого десятилетия Советской власти, в бытность президентом Главной палаты мер и весов академика Коновалова, прославившего себя открытием законов, носящих его имя, метрология и поверочное дело получили особое развитие.

Измерение физических свойств чистого вещества дает в руки химика средство, помогающее ему индивидуализировать полученное им вещество. Определив то или иное измеряемое свойство полученного вещества и сравнивая найденное численное значение с соответствующей константой, установленной для чистого вещества с достаточной достоверностью и точностью, химик получает возможность судить о степени чистоты полученного препарата.

Физические константы выражают собой связь, существующую между физическими свойствами и природой вещества. Но если численная величина того или иного свойства характеризует вещество, то, наоборот, это вещество может служить для воспроизведения численной величины свойства.

Многие чистые вещества, для которых та или иная физическая константа установлена с достаточной точностью и служит для воспроизведения основных точек шкалы, применяемой при измерении соответствующего свойства. Так, температура таяния льда, температура кипения воды при нормальном атмосферном давлении и температура кипения серы при тех же условиях являются основными точками при воспроизведении международной стоградусной температурной шкалы в интервале от 0° до 660°; температура кипения кислорода является одной из основных точек при воспроизведении той же шкалы в области температур ниже 0°; температуры затвердевания золота, серебра, меди и некоторых других металлов являются также реперными точками при осуществлении стоградусной температурной шкалы и интервала от 660 до 1063°. В области фотометрии температура затвердевания чистой платины является той постоянной температурой, при которой абсолютно черное тело является основным световым эталоном. Вязкость воды при нормальной температуре положена в основу при определении кинематической вязкости жидкостей.

Во всех этих случаях надежность воспроизведения той или иной единицы измерений или установления шкалы зависит не только от точности произведенных измерений, но, в равной степени, от чистоты применяемого вещества, то есть от совершенства методов, применяемых химиком, и от его опытности и искусства. Таким образом, химия, применявшая раньше измерения физических свойств для характеристики вещества, призвана теперь сама служить во многих областях измерений. Химия отдает свой долг физике, она вносит свой вклад в метрологию.

По этому пути и идет химическая лаборатория нашего института. С 1924 года она производит бензойную кислоту с установленной теплотой горения, применяемую в качестве термодимического эталона и служащую для воспроизведения единицы количества теплоты. В 1941 году при установлении нового светового эталона химическая лаборатория изготовила платину, которая, как показали результаты спектрального анализа и результаты измерения термоэлектродвижущей силы и температурного коэффициента сопротивления, превосходит по своей чистоте знаменитую германскую платину Гереуса.

Сейчас перед лабораторией стоит задача изготовления спектрально чистой платины, не уступающей платине, полученной Бюро стандартов США. Второй задачей лаборатории является получение спектрально чистого серебра для воспроизведения международной стоградусной температурной шкалы.

В этих работах химикам приходится пользоваться методами и приемами аналитической химии. Достигая в процессе очистки предельной точности, характеризующей эти методы, химики не могут уже пользоваться методами химического анализа для оценки полученного продукта и здесь в качестве его верного спутника и вместе с тем строгого и придирчивого ментора выступает спектральный анализ в сочетании с другими физическими методами исследования.

Однако, получение чистых металлов, служащих для воспроизведения нужной температуры является лишь частичным случаем более широкой задачи, связывающей химию и метрологию. Эта задача состоит в установлении так называемых физико-химических эталонов.

Воспроизведение единиц и шкал, применяемых при различных измерениях, представляет во многих случаях значительные трудности и может быть связано с большими погрешностями. Особенно резко выступают эти трудности при современной тенденции к введению во многих областях абсолютных измерений и к введению абсолютных единиц. Эти измерения требуют специального оборудования, больших материальных затрат, высокой квалификации сотрудников и других условий не всегда осуществимых в многочисленных лабораториях и научных учреждениях. Для облегчения этой задачи и одновременно для обеспечения единообразия этих измерений и служат физико-химические эталоны или, как их иногда называют, нормальные или стандартные образцы. Эти эталоны представляют собой вещества определенного состава, для которых величина того или иного свойства определена с достаточной достоверностью и точностью в абсолютных или в других единицах. Производя градуировку измерительного прибора по этим эталонам или измеряя параллельно свойство эталона и свойство исследуемого материала, получают результат измерения в тех единицах, в которых выражено свойство эталона, достигая при этом единообразия измерений.

Подобным физико-химическим эталоном является международный термохимический эталон — бензойная кислота при калориметрических определениях. Такими эталонами являются и вещества, применяемые в качестве температурных репер.

Для более широкого внедрения физико-химических эталонов в различных областях измерений в двадцатых годах текущего столетия в Брюсселе было организовано международное бюро физико-химических эталонов, которое является постоянным органом международной химической ассоциации.

Применение физико-химических эталонов является одним из способов передачи правильных значений единиц и установление этих эталонов является несомненно одной из задач метрологических учреждений. В США эта работа проводится частично в Бюро Стандартов. Отсутствие в СССР подобного учреждения возлагает эту задачу на метрологические институты, в частности на Всесоюзный Институт метрологии, расширяя круг его деятельности. Изготовление физико-химических эталонов — задача химиков, установление их — задача соответствующих лабораторий.

Таково в общих чертах значение химии в метрологии, таковы ее задачи.

Великий ученый Д. И. Менделеев сочетал в своем лице гениального химика и выдающегося метролога — основоположника русской научной метрологии. Русская школа химиков-метрологов, возникшая в нашем Институте, призвана сочетать в своей работе заветы Менделеева и как химика и как метролога, направляя их к единой цели — обеспечением единства мер и правильности измерений способствовать культурному и экономическому процветанию нашего великого отечества и росту его военного могущества.

С. В. ЛИПИН

О ПЕРИОДИЧЕСКОМ ЗАКОНЕ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА*

Незадолго до войны в одном из крупнейших химических высших учебных заведений США была начата постройка нового здания Химической лаборатории. Это здание решено было украсить барельефами наиболее выдающихся химиков, обогативших своими работами мировую науку. Комиссия, состоящая из крупнейших американских ученых, наметила 13 человек, изображения которых должны были украсить здание одного из центров современной химии, подобно тому, как имена этих 13 корифеев украсили историю этой науки. Но лишь на долю двух стран — Советского Союза и Франции — выпала честь увидеть среди них по два своих представителя. Из наших великих соотечественников это были Михайло Васильевич Ломоносов, открывший на 30 лет раньше Лавуазье закон сохранения материи и на 80 лет раньше Юлиуса Роберта Мейера — закон сохранения энергии, и Дмитрий Иванович Менделеев, создавший современную классификацию химических элементов — основу современных знаний о строении вещества.

Это лишь один из мелких эпизодов почти 40-летнего триумфа создателя периодического закона и 40-летнего неугасающего посмертного преклонения человеческой мысли перед его гением.

Ученый Совет Всесоюзного научно-исследовательского Института Метрологии имени Д. И. Менделеева удостоил меня высокой чести, поручив мне сделать доклад о периодическом законе на сегодняшнем собрании, посвященном 40-летней годовщине со дня смерти великого основателя нашего института.

За истекшие 40 лет был сделан ряд докладов и опубликовано много работ, посвященных периодическому закону и неразрывно связанным с ним „Основам химии“. Среди них мы должны отметить блестящие по форме и содержанию доклады и статьи

* Доклад, читанный на открытом заседании ученого Совета Всесоюзного Научно-исследовательского института Метрологии имени Д. И. Менделеева, посвященном 40-летней годовщине смерти Д. И. Менделеева — 3 февраля 1947 года.

академика А. А. Байкова, академика С. И. Вавилова и академика А. Е. Ферсмана и замечательные по своей глубине работы профессоров А. И. Горбова, В. Я. Курбатова, Б. Н. Меншуткина, Э. Х. Фрицмана и С. А. Шукарева. Это обстоятельство делает еще более трудной поставленную передо мной задачу.

Поэтому в своем докладе я ограничусь лишь несколькими вопросами, естественно возникающими при рассмотрении периодического закона в историческом аспекте развития науки и при рассмотрении его с высот наших современных знаний.

В период подъема советского патриотизма и гордости за нашу великую отчизну, возникшего как проявление революционной сознательности всех трудящихся в результате Великой Отечественной войны, возникает с новой остротой старый вопрос о предшественниках Менделеева на пути к открытию периодического закона.

В качестве предшественников Менделеева обычно указывают Ньюлэндса, Шанкуртуа и Лотара Мейера.

Если не считать триад Доберейнера, то в действительности первая попытка классификации химических элементов принадлежит, несомненно, Вильяму Одлингу. В 1857 году он опубликовал систему элементов, руководствуясь их химической аналогией. Однако эта аналогия недостаточно глубокая, ограничивающаяся во многих случаях лишь внешним сходством элементов в состоянии простых тел, наряду с применением неправильных атомных весов не позволили ему найти ту связь между химическими свойствами элементов и их атомными весами, которая выражается периодическим законом Менделеева.

Но уже через несколько лет в своей книге „Практическая Химия“, русский перевод которой появился в 1867 году, Одлинг поместил таблицу, в которой элементы расположены в порядке возрастающих атомных весов. В этой таблице химическая аналогия элементов, за исключением некоторых случаев, проведена настолько глубоко, что уже с полной ясностью выступают многие из современных подгрупп.

Как известно, в 1863 году Ньюлэндс и, независимо от него, Шанкуртуа предложили каждый свою классификацию элементов, причем в основу их было положено расположение элементов в порядке возрастающих атомных весов. Ньюлэндс заметил при этом повторяемость свойств через каждые 8 элементов, но так как многие элементы были еще неизвестны, а для ряда других отсутствовали правильные значения атомных весов, то эта закономерность нарушалась уже в третьей октаве.

Шанкуртуа сделал уже значительный шаг вперед, фиксировав в своей системе за элементами определенные места. Однако он полагал при этом, что каждому целому значению атомного веса соответствует определенный химический элемент и что свойства повторяются через каждые 16 элементов. Эти предположения привели к тому, что в его системе закономерность расположения

элементов, соответствующая группам современной периодической системы, нарушается как и у Ньюлэндса в четвертом ряду современной системы.

В 1864 году Лотар Мейер опубликовал свою классификацию элементов. Он расположил элементы одинаковой валентности в вертикальные столбцы по возрастающему атомному весу и установил, что в каждом из полученных горизонтальных рядов разность атомных весов двух соседних элементов представляет собой постоянную величину. Эта классификация Лотара Мейера не имеет преимуществ перед системами Ньюлэндса, Шанкуртуа и Одлинга, так как включает в себя не все известные в то время элементы.

В 1868 году Лотар Мейер развил свою таблицу, включив в нее остальные элементы, за исключением пяти. Эта таблица была опубликована в следующем году, после появления в печати первого сообщения Менделеева. В ней расположение элементов сильно приближается к первой таблице Менделеева, однако, значительное число элементов занимают в ней неправильное положение.

Не умаляя заслуг Ньюлэндса, Шанкуртуа, Одлинга и Лотара Мейера и отдавая им должную дань, необходимо все же констатировать, что периодичность свойств химических элементов оставалась все же скрытой от глаз человеческих, пока Менделеев не поднял завесу, скрывавшую ее.

Чем же объясняется блестящий успех, достигнутый Менделеевым в открытии закона природы столь важного для последующего развития науки?

В своем докладе на юбилейном менделеевском съезде в 1934 году Лиза Мейтнер сказала:

„Если атомный вес, не определяя однозначно природу химических элементов, не может быть принят в качестве характерной постоянной для них, то для атомного ядра он представляет собой одну из важных характеристических констант. Тот факт, что несмотря на это, на основе атомного веса Менделееву удалось получить безошибочное распределение известных тогда элементов и даже правильно предсказать еще неизвестные элементы, можно приписать его гениальной интуиции, а также тому удачному обстоятельству, что атомный вес в первом приближении пропорционален положительному заряду ядра, а следовательно, и номеру места элемента в периодической системе“.

Не отрицая гениальной интуиции Менделеева в современном материалистическом смысле этого понятия, мы полагаем, однако, что успех, достигнутый Менделеевым, имеет более глубокие корни, связанные с его мировоззрением. Мы считаем, что верный ответ на поставленный вопрос мы находим у Менделеева уже в самом заглавии его первого сообщения „Опыт системы элементов, основанной на их атомном весе и химическом сходстве“. Атомный вес элементов являлся для Менделеева лишь первич-

ным критерием при расположении элементов, решавшим вопрос лишь в первом приближении. Окончательным критерием служили свойства элементов, в частности сходство химических свойств различных элементов.

В пользу этой точки зрения говорят те факты, которые привели к торжеству периодического закона и к его всеобщему признанию. Мы имеем в виду предсказание новых элементов и исправление существовавших атомных весов. В пользу этой точки зрения говорят и так называемые аномалии периодической системы, то есть те случаи, когда Менделеев располагал элементы, нарушая последовательность изменения атомных весов, отдавая предпочтение химическим свойствам элементов.

Это решающее значение химических свойств элементов, в частности установление общности формул типичных соединений и допущение вышеупомянутых аномалий, имело еще одно важное следствие — неизбежность периодической системы и после того как Мозлеем была установлена связь между положением элементов в системе Менделеева и длиной волны реентгеновских спектров.

Говоря об атомном весе, как о первичном признаке расположения элементов, мы остановимся на вопросе о причинах выбора Менделеевым этого критерия.

В своем сообщении 1869 года Д. И. пишет, что, приступая к классификации химических элементов, он считал, что „всякая система, основанная на точно наблюдаемых числах, конечно будет уже в том отношении заслуживать предпочтения перед другими системами, не имеющими численных опор, что в ней останется мало места произволу“. Перечисляя различные свойства простых тел, которые могли бы быть положены в основу классификации, как-то электрохимические, оптические, электрические и магнитные свойства их, и подвергая их глубокому анализу, Менделеев считает их шаткими и дающими место произволу „потому что одно и то же тело может представлять в этом отношении различия громадные, смотря по тому состоянию, в котором оно находится“. Точно так же он отвергает валентность элементов, как основу классификации, ввиду ее переменной величины.

„Поныне“ — пишет далее Менделеев — „известно только одно численное данное, это именно атомный вес, свойственный элементу. Величина атомного веса по самому существу предмета есть данное, относящееся не к самому состоянию отдельного простого тела, а к той материальной части, которая обща и свободному простому телу и всем его соединениям“.

Переходя к рассмотрению открытия Менделеева с точки зрения наших современных знаний, необходимо еще раз отметить, что периодическая система, как классификация элементов и как основа наших представлений о свойствах элементов, не претерпела изменений и после того, как, благодаря совершенству

современных методов исследования, физикам удалось проникнуть в недра материи и вскрыть тайну ее строения.

Нарушение самим Менделеевым принципа расположения элементов по возрастающим атомным весам, выразившееся в упомянутых вами аномалиях периодической системы, нашло себе по утверждению в атомных порядковых числах элементов. Таким образом эти аномалии, называемые некоторыми учеными дефектами периодической системы и относимые к ее несовершенству, на самом деле явились величайшим торжеством химии.

Закон Мозлея и определение положительного заряда атомных ядер внесли, однако, изменение в периодический закон Менделеева. С точки зрения современной науки свойства элементов являются периодической функцией уже не атомного веса элементов, а их атомного порядкового числа. Атомный вес, единственная известная в то время численная характеристика элементов, оказался свойством, характеризующим их лишь в первом приближении и лишь атомное порядковое число однозначно определяет элементы и их положение в периодической системе Менделеева. Однако это уточнение не уменьшает значения Менделеевского закона, подобно тому, как отклонение реальных газов от законов газового состояния не уменьшает значения этих законов.

Периодический закон, открытый Менделеевым, и его система элементов послужили тем прочным фундаментом, на котором было построено все величественное здание современного учения о строении атома.

В докладе на сессии Ученого Совета, посвященной 100-летию государственной службы мер и весов, нами были отмечены те исторические моменты, когда физика оказала неоценимые услуги химии в ее развитии. Сегодня мы можем добавить к этому, что открытием периодического закона химия, щедрой рукой Менделеева, уплатила свой долг физике, обеспечив возникновение и развитие учения о строении вещества.

Причина незыблемости периодического закона состоит в том, что он является следствием более общего закона природы — закона перехода количества в качество. Заслуга Менделеева в этом отношении получила высокую оценку со стороны основоположника современной философии естествознания Энгельса и отмечена нашим вождем и учителем И. В. Сталиным.

„Менделеевская периодическая система элементов“ ясно показывает, какое большое значение в истории природы имеет возникновение качественных изменений из изменений количественных“ (Сталин, том I, стр. 301).

Нам остается только преклониться перед гением Менделеева и с чувством гордости за наш народ быть благодарным нашей родине за то, что она дает сынов, подобных Менделееву, ведущих науку к ее высотам и прославляющих нашу отчизну.

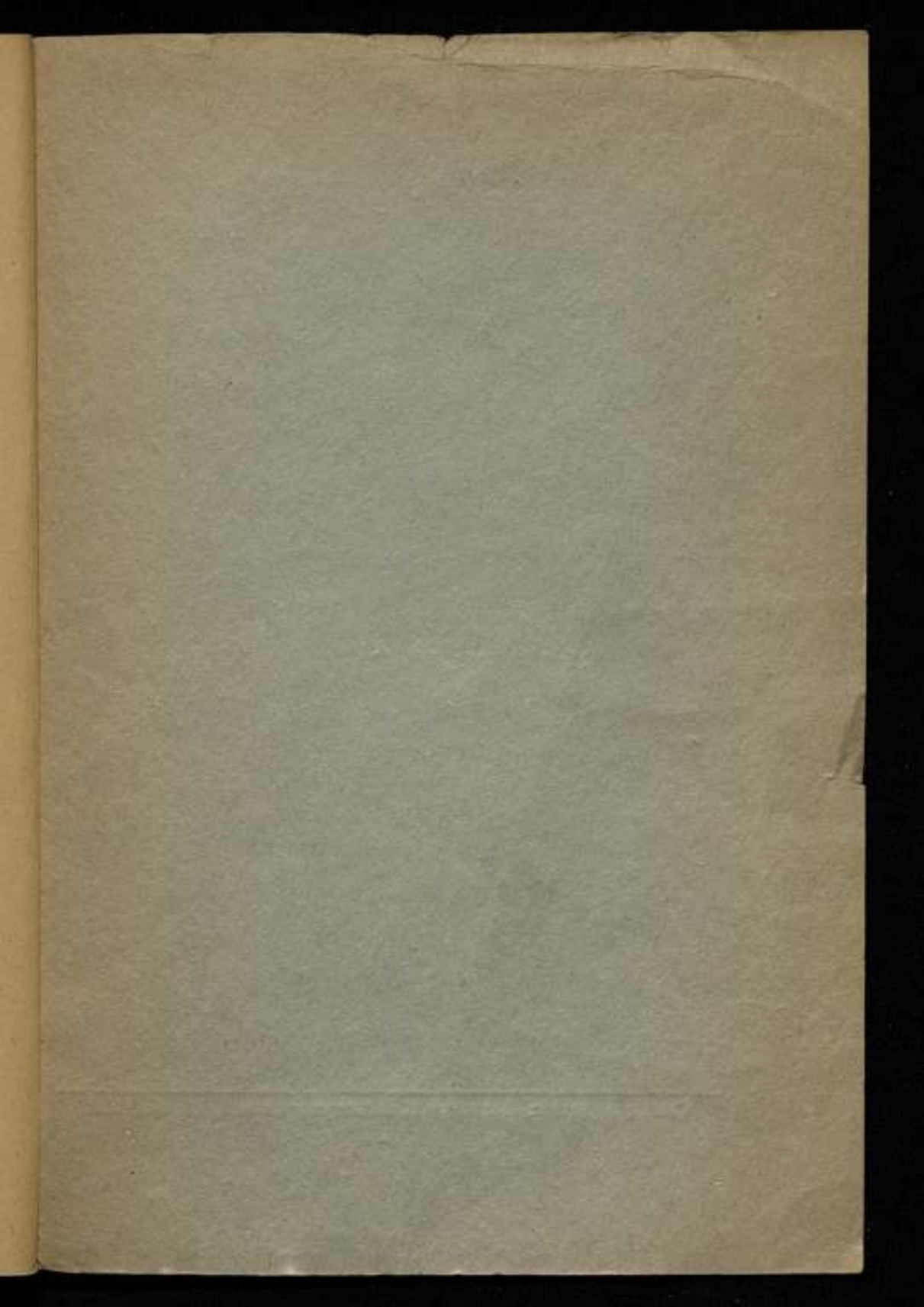
СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
От редактора	3
Э. П. Хаафин, О вероятнейшем значении вязкости воды вблизи температуры 20°C	4
А. Ф. Добрянский, Л. С. Бархи <u>Е. П. Бласточкина</u>	
Соотношение между кинематической вязкостью и вязкостью по Энглеру	22
Анализ формул для пересчета вязкости по Энглеру в кинематическую вязкость (по материалам химической лаборатории)	33
А. Ф. Добрянский и В. Н. Кучинский, Определение кинематической вязкости смесей масел	46
М. Д. Иппид, Ареометр полного погружения	52
М. А. Айзикович, Прибор для сублимации органических веществ в значительных количествах с применением алюминиевого сублиматора	60
С. В. Липин, Роль и задачи химии в области метрологии	65
С. В. Липин, О периодическом законе Д. И. Менделеева	70

Ответственный редактор проф. *Б. М. Яновский*
Технич. редактор *С. Д. Водолагина*
Корректор *Е. К. Балковская*

М 08607 Сдано в набор 28/II 1947 г. Подписано в печать 5/XI 1947 г.
Формат бумаги 60 × 92¹/₁₆. Печ. лист 4²/₃. Тираж 1200. Заказ № 1109.

Типография № 3 Управления издательства и полиграфии Исполкома Ленгорсовета



Цена 5 руб.

Склад издания: Ленинград, Международный, 19. ВНИИМ