Ф. М. МАРШАК

ОБ ИЗМЕРЕНИИ ВЯЗКОСТИ МЕТОДОМ ШАРИКА С ПРОТИВОВЕСОМ

(Московский институт цветных металлов и золота им. М. И. Калинина)

Метод шарика с противовесом [1] является менее точным по сравнению с другими методами измерения вязкости, но весьма удобным и простым. В русской литературе этот метод не описан, хотя в некоторых исследованиях он и применялся для измерения вязкости шлаков цветных металлов [2]; эти работы, однако, дают лишь конечные результаты, не уделяя достаточного внимания методике. Краткое упоминание об этом методе имеется также в обзорных статьях М. П. Воларовича [3]. Целью данной работы являлась проверка металла и установление границ его применимости.

Схема устройства прибора дана на рисунке. К одному из плеч коромысла весов A подвешивается на стержне D шарик C. Если на чашку E весов, подвешенную к другому плечу коромысла B, положить груз, шарик будет подниматься со скоростью, которая зависит от вязкости среды, заключающейся в сосуде F, и величины груза. Скорость поднятия шарика измеряется секундомером.

Теория прибора дана Генлейном [4]. Наибольшее применение прибор получил в работах Энделя [1] по измерению вязкости шлаков. Для расчета вязкости η по показаниям прибора Генлейн предложил формулу Стокса-Ладенбурга [5] с поправкой на стержень. Общий вид этой формулы:

$$\eta = \frac{P \cdot 981}{v\left[6\pi r\left(1+2.1\frac{r}{R_2}\right)\left(1+3.1\frac{r}{l}\right)+\frac{2\pi L}{\ln\frac{R_2}{R_1}}\right]}$$

где r — радиус шарика, см;
R_1 — радиус стержня, см;
R_2 — радиус цилиндра, в котором содержится измеряемая жидкость, см;
l — высота жидкости, см;
L — длина погруженного в жидкость стержня, см;
P — нагрузка, г;
v — скорость, см/сек;
981 — ускорение силы тяжести, см/сек².

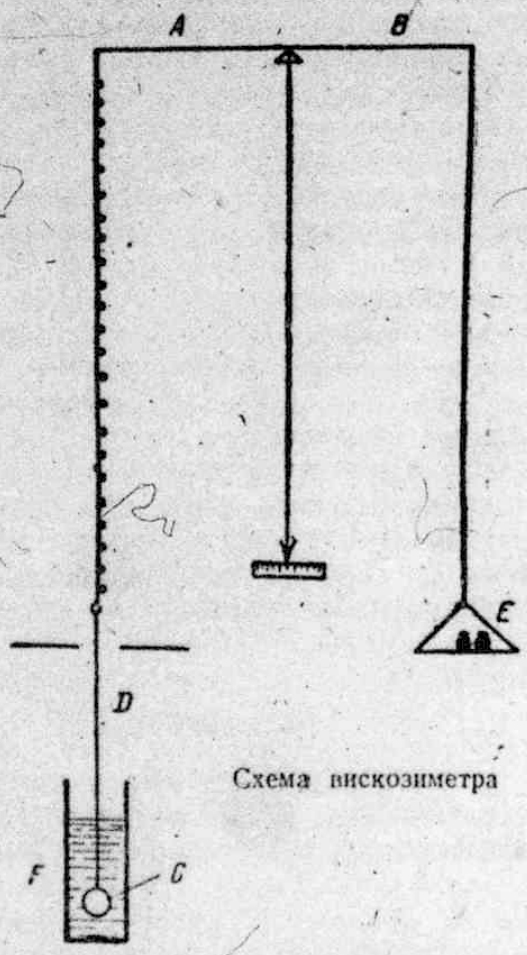


Схема вискозиметра

В литературе имеется ряд указаний на то, что эта формула требует существенных поправок. Такое указание дает М. П. Воларович [6]. Эндель говорит [7], что на практике для описанного выше вискозиметра приходится умножать данные, рассчитанные по формуле Стокса-Ладенбурга, на какой-нибудь фактор, величина которого определяется опытом. Райт [8], ссылаясь на ряд авторов, отмечает, что употребление формулы Стокса-Ладен-

бурга дает повышенные результаты. Некоторые авторы, по его утверждению, вообще выражают сомнения в применимости этой формулы, если радиус шарика больше 0,2 от радиуса цилиндра. Кроме того, получается неустранимая ошибка, вызванная прилипанием различных количеств жидкости к стержню. Простейшим уравнением для данного прибора по Энделю является выражение:

$$\eta = K\frac{P}{v},$$

где: P — нагрузка, г;
v — скорость, см/сек;
K — константа [1].

Воспроизводимость измерений по методу шарика с противовесом, по Энделю, следующая:

При вязкости	от	100 000	до	200	пуазов	± 7%
»	»	200	»	50	»	± 10%
»	»	50	»	1	»	± 15—25%

В одной из более поздних работ Эндель отмечает, что этим методом можно мерить вязкость лишь выше 5 пуазов. Для измерения меньшей вязкости следует пользоваться иными методами. Райт подтверждает, что нижний предел величины вязкости, которую можно измерять на данном приборе, слишком велик для шлака. Таковы основные данные, имеющиеся об этом методе в литературе.

Наш вискозиметр представляет собою обыкновенные лабораторные весы, чувствительностью 0,01—0,02 г. Для увеличения точности отсчета мы удлинили стрелку в 2,5 раза, спустив одновременно шкалу. По чувствительности и точности этот прибор уступает приборам, описанным в литературе, вследствие большой инерции, обусловленной тяжестью латунного коромысла, а также вследствие малой его длины — 26 см, в то время как в некоторых приборах, описанных в литературе, длина коромысла достигает 90 см.

Стальной шарик, к которому на резьбе привинчен стальной стержень, подвешивают к коромыслу на цепочке, обеспечивающей вертикальность подвеса. Диаметр цилиндра с исследуемой жидкостью — 38 мм, диаметр шарика — 15,97 мм. Такой большой диаметр несколько увеличивает неточность измерения, но, с другой стороны, позволяет измерять более низкие вязкости.

При калибровке этого вискозиметра была поставлена цель — проверить формулу Стокса-Ладенбурга-Генлейна и определить применимость упрощенной формулы к нашему прибору. Попутно выяснялись роль нагрузки, высоты подъема шарика, диаметра цилиндра и т. п.

В качестве исследуемой среды служило очищенное, осветленное касторовое масло с плотностью 0,962 при 21,5° и растворы сахара в глицерине различных концентраций, поскольку для касторового масла известен слишком малый диапазон вязкости.

В табл. 1 приводим один из калибровочных опытов по касторовому маслу.

Приведенные данные показывают, что значения вязкости, получаемые измерением, не зависят от нагрузки и от высоты поднятия, если скорость не превышает предельных значений, допускаемых данным прибором. Формула Стокса-Ладенбурга-Генлейна применима лишь с большим поправочным коэфициентом, равным для нашего прибора 4,75. Точность определения константы удовлетворительна.

Эти выводы подтверждаются во всех наших опытах, причем отклонения в получаемых результатах (см. табл. 2) не выходят из тех пределов, которые указаны для этого метода Энделем.

В опытах, приведенных в табл. 2, менялась высота жидкости. Расхождения, которые указаны в этой

[1] В случае, если плотность испытуемых жидкостей отличается значительно, необходимо учитывать влияние плотности. Ред.

Таблица 1

Калибровка вискозиметра по касторовому маслу

Высота жидкости 7,5 см; температура 22,3°, η — из таблицы — 8,6 пуазов.

Нагрузка P г	Средняя: высота подъема шарика мм	Средняя: продолжительность подъема сек.	Скорость v, см/сек.	$\frac{P}{v}$	K	Вязкость по формуле Стокса-Ладенбурга-Генлейна, пуазы	Поправочный коэфициент к формуле Стокса-Ладенбурга-Генлейна	
0,05	1,5	2,5	0,0234	2,13	3,75	43,02	5	
0,1	3,0	2,6	0,0471	2,12	3,75	42,9	5	Среднее
0,2	6,1	2,7	0,0930	2,15	3,72	43,5	5,05	4,95
0,4	12,4	2,8	0,1845	2,12	3,75	41,0	4,75	

таблице, были значительно уменьшены, когда мы установили оптимальную высоту жидкости, равную 70 мм.

Наконец, для более полной проверки наших данных были проведены на этом приборе измерения вязкости растворов сахара в глицерине (табл. 3).

Данные, рассчитанные по упрощенной формуле, дают в среднем меньшие отклонения по сравнению с теми, которые получаются по формуле Стокса-Ладенбурга-Генлейна после введения соответствующей поправки. Таким образом вискозиметр, работающий по методу шарика с противовесом, дает удовлетворительные результаты с отклонениями порядка ± 5—7% при

Таблица 2

Калибровка вискозиметра по касторовому маслу

Нагрузка для каждого опыта 0,05, 0,1, 0,2, 0,4, 0,5 г.

Высота жидкости, мм	Температура, °С	Вязкость, пуазы: из таблиц	Вязкость, пуазы: из формулы Стокса-Ладенбурга-Генлейна	Поправочный коэфициент к формуле Стокса-Ладенбурга-Генлейна		K	
60	20,7	9,6	43,1	4,54		4,4	
60	22,3	8,6	44,5	4,76	Среднее	3,7	Среднее
75	22,3	8,6	42,6	5,0	4,76	4,0	3,95
90	22,1	8,34	—	—		3,71	

Таблица 3

Определение вязкости растворов сахара в глицерине (различных концентраций)

Высота жидкости 70 мм. Нагрузки для каждого опыта: 0,1, 0,2, 0,4 и 0,5 г

Температура, °С	Вязкость, пуазы: по методу свободного падения шарика	Вязкость, пуазы: по формуле Стокса Ладенбурга-Генлейна с поправочным коэфициентом 4,75	Вязкость, пуазы: по упрощенной формуле $\eta = K\frac{P}{v}$	Отклонение от вязкости, измеренной методом свободного падения шарика, %: для формулы Стокса-Ладенбурга-Генлейна	Отклонение от вязкости, измеренной методом свободного падения шарика, %: для формулы $\eta = K\frac{P}{v}$
20,8	28	32	30	+ 18	+ 5
	42,8	—	45	—	+ 7
19,0	87,6	84	85,6	— 2	— 6,5
19,0	85,6	97	85,6	+ 13	— 6,5

пользовании упрощенной формулой даже в том случае, если прибор не обладает высокой чувствительностью. Воспроизводимые данные можно получить, если вязкость не ниже 6—7 пуазов. Формула Стокса-Ладенбурга-Генлейна в обычном виде не применима и дает повышенные результаты; для нашего прибора поправочный множитель оказался равным 4,75.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. Arndt. Z. f. Elektroch. **13**, 578 (1907).
   C. Doelter u. H. Sirk. Sitz. Ber. d. Wien. Akad. **20**, 659 (1911).
   K. Endel. Met. u. Erz., **29**, 17 (1932).
   W. Hänlein. Stahl u. Eisen, 54; 663 (1934).
   W. Endel. Ber. d. Deutsch. Chem. Ges, **15**, 551 (1934).
   K. Endel u. Kley. Stahl u. Eisen, **59**, 677 (1939).
2. Ф. М. Лоскутов. Пути снижения содержания меди в отвальных шлаках (1935).
3. М. П. Воларович. Дополнение к книге Э. Гатчек «Вязкость жидкостей», 2-е изд. (1935).
   М. П. Воларович. Труды совещ. по вязк. жидк. и колл. **1**, 241, (1941).
4. W. Hänlein. Glastechn. Ber. **11**, 41 (1933).
5. R. Ladenburg. Ann. d. Phys. **22**, 288 (1907).
6. М. П. Воларович. Труды совещ. по вязк. жидк. и колл. **2**, 192 (1944).
7. K. Endel, A. Tielsch u. C. Wens. Met. u. Erz., **31**, 353 (1934).
8. E. Rait. Trans. Brit. Ceram. Soc., 40, 157 (1941).