

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

А. А. КОНСТАНТИНОВ и Г. В. ВИНОГРАДОВ

**ДВУХМЕРНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ВЯЗКОСТНЫХ
СВОЙСТВ ПЛАСТИЧНЫХ ТЕЛ**

(Представлено академиком А. В. Топчиевым 10 VII 1952)

Большой интерес должны представлять такие методы вискозиметрических испытаний аномально-вязких веществ, которые допускают получение кривой течения при однократном продавливании через капилляр небольших порций испытуемого материала, т. е. отыскание зависимости скорости деформации D от напряжений сдвига τ или эффективной вязкости η от скорости деформации в ходе одного непрерывного опыта (замера). В связи с указанной постановкой задачи большое значение имеют работы М. М. Кусакова с сотр. (1-3), в которых была впервые показана возможность отыскания зависимостей $\eta(t)$ и $\eta(D)$ для различных жидкостей в результате одного опыта (замера). Методы, которые дают возможность не только измерить отдельные конкретные значения искомых величин, но и позволяют в результате одного замера (опыта) найти зависимость, связывающую две переменные величины, например вязкость и температуру или вязкость и градиент скорости, М. М. Кусаков удачно предложил именовать двухмерными. Для пластичных дисперсных систем, насколько нам известно, до сих пор не было предложено двухмерных методов изучения их реологических свойств.

Разработанный нами двухмерный метод вискозиметрического исследования сильно структурированных дисперсных систем основан на том, что образец вытекает через капилляр при непрерывно изменяющемся режиме течения. Регистрация параметров, связанных с этими режимами и однозначно определяющих величины D , τ и η , позволяет в ходе одного опыта (замера) определить вязкостные свойства испытуемого образца при заданной температуре. Проведение вискозиметрических опытов при непрерывном изменении режимов течения допустимо для веществ, обнаруживающих малые тиксотропные изменения во время их однократного продавливания через капилляры (смазки и тому подобные материалы (4)). Важное значение имеет и то, что для такого рода систем, согласно поляризационно-оптическим исследованиям Г. В. Виноградова (5), переход от одного режима течения к другому сопровождается практически мгновенным изменением картины течения. Существенно и то, что у высоковязких систем, для которых в первую очередь предназначается предлагаемый метод, образование потока с окончательным распределением скоростей происходит на начальном участке капилляра, составляющем всего несколько его диаметров.

Предлагаемый метод основывается на использовании капиллярного прибора, в основу которого положено применение калиброванных пружин, с помощью которых испытуемый образец выталкивается через капилляр. Испытуемый материал загружается в цилиндрическую камеру, из которой он вытесняется через капилляр входящим в камеру калибро-

ванным штоком. Шток вдвигается в камеру под действием сжатой пружины. В начале опыта, когда пружина сильно сжата, истечение образца через капилляр происходит при больших градиентах скорости и напряжения сдвига. Постепенно, по мере распускания пружины, градиенты скорости и напряжения сдвига уменьшаются.

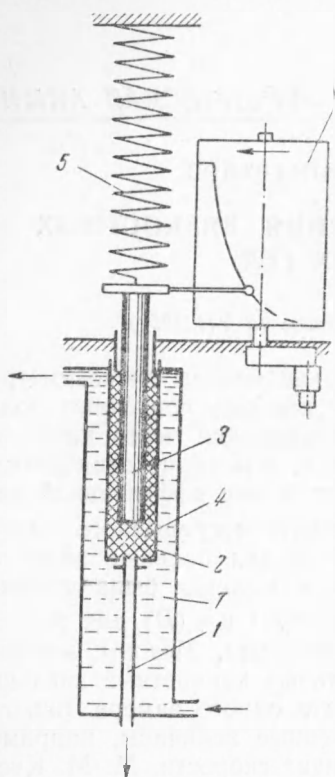


Рис. 1. Схема вискозиметра. 1 — капилляр, 2 — камера, 3 — шток, 4 — испытуемое вещество, 5 — пружина, 6 — самописец с редуктором и асинхронным электромотором, 7 — термостат

При этом имеют место соответствия, во-первых, величин деформации пружины перепадам давления в капилляре, во-вторых, скоростей деформаций пружин скоростям истечения испытуемого образца. Таким образом, калиброванная пружина не только выполняет функции нагрузочного приспособления, но и может использоваться для замера давлений и скоростей истечения. При помощи одной пружины не всегда возможно обеспечить удобную для регистрации (и последующей обработки опытных данных) и притом достаточно равномерную скорость ее распускания в ходе всего опыта. Поэтому приходится пользоваться комбинированными пружинами, составленными из двух или более пружин с соответствующим образом подобранными характеристиками. В дальнейшем, ради краткости, составные пружины также будут именоваться просто пружинами. Для автоматического фиксирования соответствующих друг другу давлений и скоростей истечения наиболее удобно использовать самописец, регистрирующий деформации пружины.

На рис. 1 схематически показано устройство предлагаемого прибора. Вискозиметры этого типа пригодны для измерения вязкостей в пределах от 1 до 10^5 пуаз; градиенты скорости могут изменяться от 10^{-1} до 10^4 сек. $^{-1}$, перепады давлений в капилляре от 1 до 100 кГ/см 2 .

Записанная с помощью самописца кривая истечения образца изображает непрерывное изменение во времени объема испытуемого вещества в камере и синхронное ему изменение перепадов давления в капилляре. В результате получается диаграмма, по оси абсцисс которой отсчитывается время, по оси ординат — сжатие пружины и соответствующие им перепады давления в капилляре (находят согласно специальным тарировочным опытам, в которых к капилляру подсоединяется манометр). Величина скорости истечения материала в каждый данный момент пропорциональна скорости разжатия пружины. Скорость разжатия пружины определяется на диаграмме сжатие пружины — время величиной тангенса угла наклона α , который касательная к полученной кривой образует с осью времени. Сжатие пружины убывает со временем; снижение темпа этого убывания соответствует уменьшению скорости истечения. Следовательно, скорость истечения пропорциональна взятому с обратным знаком тангенсу угла α или тангенсу угла $180 - \alpha = \alpha'$. Поскольку построение касательной при углах α' , близких к 0 и 90°, дает очень малую точность, следует стремиться к тому, чтобы кривая не шла слишком круто или очень полого. Положение существенно облегчается применением составных пружин, а также изменением скорости вращения барабана самописца при помощи редуктора. Сказанное иллюстрируется рис. 2, на котором показана диаграмма

истечения, снятая с использованием трехскоростного редуктора при испытании жирового солидола — высоковязкой сильно структурированной дисперсной системы.

Введем следующие обозначения: R — радиус штока; r — радиус капилляра; L — длина капилляра; h — сжатие пружины в сантиметрах, в момент времени t ; P — соответствующее этому же моменту t давление в камере (в кг/см^2), при котором происходит истечение; ω — окружная скорость барабана самописца в см/сек ; α — угол наклона касательной к кривой $h(t)$ в точке, соответствующей моменту времени t (см. рис. 2).

В момент времени t скорость деформации пружины, соответствующая скорости продвижения штока,

$$\frac{dh}{dt} = \omega \operatorname{tg} \alpha' \text{ см/сек.}$$

Секундный расход испытуемого вещества, отнесенный к этому же времени, $Q = \pi R^2 \omega \operatorname{tg} \alpha' \text{ см}^3/\text{сек}$. Тогда средний градиент скорости $D = \pi^{-1} Q r^{-3} = R^2 r^{-3} \omega \operatorname{tg} \alpha' \text{ сек.}^{-1}$ и эффективная вязкость $\eta = 9,81 \cdot 10^5 \tau D^{-1}$ пуаз, где $\tau = \frac{1}{2} P R L^{-1}$. С помощью указанных выше формул легко подсчитать значение вязкостей и градиентов скорости для всех экспериментально находимых точек диаграмм истечения материалов.

В качестве примера использования рассматриваемого метода на рис. 3 приводятся результаты, полученные для жирового солидола (ср. диаграмму на рис. 2).

Следует отметить, что эти результаты получены на одном капилляре ($r = 0,623$, $L = 123,0$ мм) с порцией смазки 6 г; время истечения составило 7,5 мин.

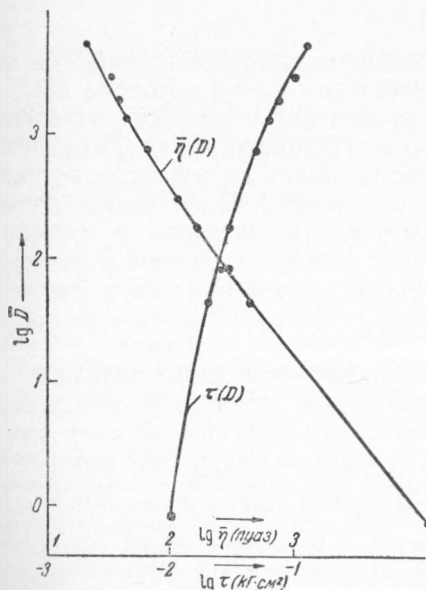


Рис. 3. Кривая течения солидола

углом к осям координат, так как известно, что эта операция совершается проще и точнее, чем построение касательной в данной точке кривой.

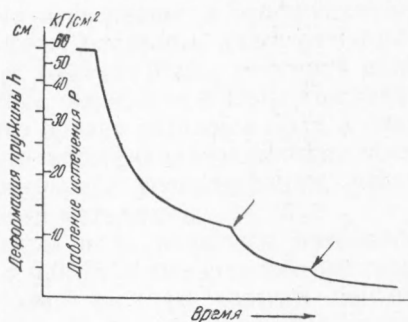


Рис. 2. Диаграмма истечения жирового солидола. Стрелкой отмечено переключение скорости редуктора

При очень малых давлениях истечения приходится считаться с трением штока во втулке и с другими потерями. Поэтому с целью получения истинных значений перепадов давления на единицу длины капилляра можно воспользоваться методом двух капилляров (6), производя замеры последовательно на длинном и более коротком капиллярах. Получив таким образом две кривые истечения, легко найти интересующие нас значения $\Delta P/\Delta L$, соответствующие определенным значениям D (или dh/dt). Для этого проводим под заданным углом касательные к обеим кривым и, отметив их точки пересечения с кривыми и с осью давлений, сразу находим величину ΔP . Вообще следует рекомендовать задаваясь определенными значениями D и dh/dt находить касательные, проходящие под заданным

Авторы выражают глубокую благодарность М. М. Кусакову за содействие в постановке настоящей работы, а также ему, В. В. Сеницину и В. П. Павлову за ее обсуждение.

Поступило
9 VII 1952

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ М. М. Кусаков, ДАН, 54, 145 (1946). ² М. М. Кусаков, Э. А. Разумовская, Тр. 2-й Всес. конфер. по трению и износу в машинах, 1, 111, 1947. ³ М. М. Кусаков, А. Н. Кислинский, там же, 3, 276, 1949. ⁴ Г. В. Виноградов, В. В. Сеницын, ДАН, 86, № 3 (1952). ⁵ Г. В. Виноградов, ДАН, 71, 505 (1950); Тр. Всес. конф. по колл. химии, АН УССР, Киев, 1952, стр. 350. ⁶ Г. В. Виноградов, В. П. Павлов, Сборн. Низкотемпературные свойства нефтепродуктов, 1949, стр. 61.