

УДК 532.137

© 1997 г. Р.А. АПАКАШЕВ, В.В. ПАВЛОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ И МОДУЛЯ СДВИГА ВОДЫ ПРИ МАЛЫХ СКОРОСТЯХ ТЕЧЕНИЯ

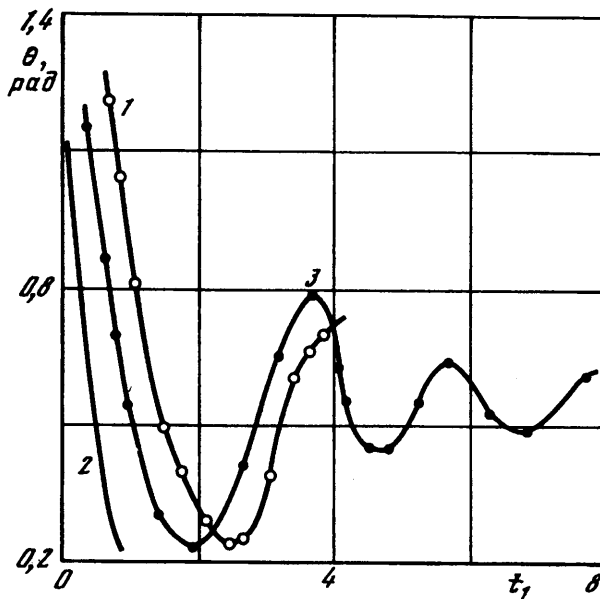
Исследовано затухающее течение воды по инерции в цилиндрическом сосуде. Обнаружен эффект возвратного движения воды – "отдача" при падении скорости деформации сдвига до величины порядка 10^{-3} с^{-1} . В области малых скоростей деформации вода ведет себя как среда с очень небольшим пределом прочности и модулем сдвига порядка 10^{-6} Па.

Часто типичную (ньютоновскую) жидкость определяют как среду, течение которой в отличие от твердого тела возможно при любом сколь угодно малом напряжении сдвига. Считается, что реологическое поведение такой жидкости полностью определяется величиной единственного параметра – вязкости η [1]. С другой стороны, в ряде случаев, например при исследовании тонких пленок жидкости, выявляются тангенциальная упругость и некоторый предел прочности – свойства, присущие твердым телам [2, 3]. Твердоподобные свойства отмечены при исследовании физико-химических параметров свежей поверхности воды [4]. Обсуждается существование предельного напряжения сдвига не только у поверхностных пленок, но и у больших масс воды [5, 6]. Однако подобные результаты и предположения основаны на косвенных данных или связаны с особыми, например высокоскоростными, воздействиями на жидкость.

1. Постановка задачи. Критическим пунктом, подлежащим экспериментальной проверке, является вопрос о том, будет ли поведение жидкости, предсказываемое теорией, иметь место в предельном случае очень малых скоростей деформации? Если жидкость имеет хотя бы небольшой предел прочности σ , то характер ее течения должен измениться, когда скорость сдвига ϵ станет меньше отношения σ/η или напряжение сдвига $\tau = \eta\epsilon$ станет меньше предполагаемой прочности.

В настоящей работе было предпринято исследование реологического поведения воды комнатной температуры в широком интервале малых скоростей деформации сдвига. Для этого изучалось затухающее круговое течение воды по инерции в цилиндрическом сосуде. Данная методика позволяет наблюдать течение жидкости при непрерывном плавном уменьшении скорости деформации в широкой области значений. При этом из аппаратурного оформления эксперимента полностью исключаются традиционные как механические (торсионы определенной жесткости), так и иные, например электромагнитные, чувствительные элементы, что существенно расширяет возможности реометрии жидкости.

Исходное течение воды инициировалось равномерным вращательным движением вмещающего ее сосуда. Использовались сосуды диаметром 40 и 65 см с различным их заполнением водой по высоте от 10 до 25 см. Для фиксирования скорости течения применялась метка в виде стеклянного цилиндрического поплавка с капиллярной верхней частью. Диаметр цилиндрической части поплавка 8 мм, общая его высота 35 мм, из них 15 мм – длина капилляра. Заполняя поплавок балластом, добивались практически полного вертикального погружения, оставляя над водой 2–3 мм капилляра. При этом для исключения влияния боковых стенок поплавков находился от края сосуда на расстоянии не менее 60 мм.



Фиг. 1. Затухание процесса течения воды по инерции (диаметр сосуда 40 см, высота уровня воды 10 см): 1 – эксперимент (без поплавка-шпинделя); 2 – теоретическая кривая для ньютоновской жидкости; 3 – эксперимент с поплавком-шпинделем

Для защиты поверхности воды от конвективных воздушных потоков сосуд закрывался стеклом. Траектория и скорость движения поплавка фиксировались по координатной сетке, нанесенной на стекло и дно сосуда. Максимальная расчетная погрешность определения скорости не превышала 2,2% даже при очень малых значениях самой скорости. Если в силу каких-либо причин поплавок сбивался с начальной круговой траектории, эксперимент прекращался.

Основной результат, полученный в работе, состоит в том, что характер движения действительно изменяется после того, как угловая скорость затухающего течения воды достигнет определенной достаточно малой величины (порядка 10^{-3} рад/с). После такого замедления течения наступает возвратное движение – четко наблюдается эффект "отдачи". Общий сдвиг в обратном направлении достигает 0,43–0,87 рад (смещение метки на 5–10 см) примерно за 20 мин. Характерная экспериментальная кривая изображена на графике в виде зависимости углового смещения метки (θ) от приведенного времени $t_1 = \tau\eta/(\rho h^2)$ (фиг. 1, кривая 1). В этом случае $t_1 = 1$ соответствует 15 мин.

Поскольку обнаруженное явление представляет достаточно тонкие свойства жидкости, в методике измерений большое внимание уделялось специальным исследованиям. Так, отмечено влияние на воспроизводимость результатов поверхностной адсорбционной пленки. Эта пленка образовывалась и начинала искажать результаты измерений через 15–20 ч. после заполнения сосуда. Поэтому в каждом эксперименте использовалась свежеприготовленная дистиллированная вода, охлажденная до комнатной температуры. Результаты качественно не изменяются, если фиксировать круговое течение воды по вращению алюминиевого диска толщиной 1,5 мм и диаметром 20 см, погруженного в воду на 5 см. Диск контактировал с поверхностью лишь небольшим поплавком диаметром 15 мм.

Серия исследований была направлена на изучение зависимости эффекта "отдачи" от высоты уровня жидкости в сосуде и от его размеров. Проведенные эксперименты с использованием цилиндрических сосудов диаметром 40 и 65 см при их заполнении водой по высоте уровня на 10, 15 и 25 см отчетливо показали полную воспроиз-

водимость эффекта в области малых скоростей сдвига. Замена стеклянного сосуда на изготовленный из другого материала, например нержавеющей стали, не меняет картины.

Эффект возвратного движения воды наблюдался и в измененном варианте методики измерений, когда на поверхности воды в центре сосуда помещали цилиндрический пенопластовый поплавок (или "шпиндель") диаметром 20 см. Сверху к нему крепился металлический маховик, имеющий момент инерции $I = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Под действием нагрузки поплавок притапливался на 2 см. Исходное движение маховика создавалось за несколько секунд двумя направленными струями воздуха, которые действовали как пара сил, дающая "чистое" вращение. Через несколько минут начинали запись результатов, так как устанавливалось медленное экспоненциально затухающее вращение, которое сохранялось десятки минут. В этом варианте легче достигается переход затухающего вращения маховика во вращательные колебания, близкие к гармоническим. Поплавок способствует сохранению кругового течения в сосуде. При этом, например, за 30 мин маховик совершал два-три полных колебания (кривая 3, фиг. 1). Опыт оказывался успешным, если изучаемая система надежно изолировалась от внешних возмущений: вибрации, толчков, конвективных воздушных потоков и т.п. В неблагоприятном случае выявлялась только одна полуволна колебания или смена направления вращения, как и в описанных выше экспериментах без поплавка-шпинделя; после отдачи обычно движение терялось на фоне случайных воздействий.

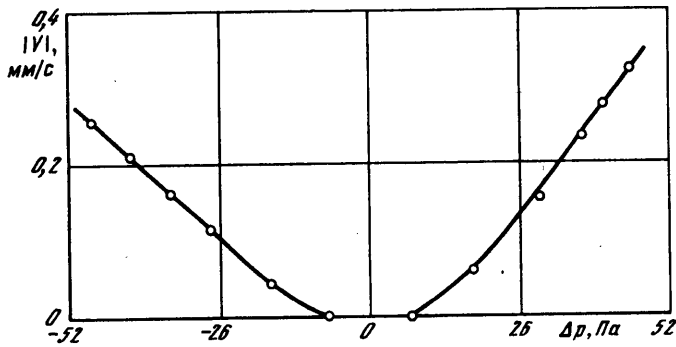
Данный прибор отличается от обычного ротационного вискозиметра тем, что вращение поддерживается не внешними силами, не двигателем, а идет лишь по инерции с убывающей скоростью. Это устройство можно назвать инерционным вискозиметром. Основная методическая особенность выполненных измерений состоит в том, что удалось продвинуться в область малых скоростей течения, например на 3-5 порядков величины меньше, чем при обычной вискозиметрии.

По методике инерционного вискозиметра провели также измерения с более вязким расплавом оксида бора при 950 К ($\eta \approx 100 \text{ Па} \cdot \text{с}$). Выяснилось, что при такой повышенной вязкости легко наблюдается исследуемый переход затухающего вращения во вращательные колебания и измерение предела прочности жидкости и ее модуля сдвига не труднее, чем обычное определение вязкости. Достаточные для измерения усилия возникали в тигле на 100 г расплава при шпинделе диаметром 8 и высотой 43 мм; при том же маховике период вращательных колебаний составил 35 с вместо 10 мин у воды. Основная методическая трудность состояла в том, чтобы подобрать достаточно хороший подшипник, обеспечивающий свободное вращение подвешенного маховика со шпинделем [7]. Аналогичные измерения выполнены и для глицерина.

2. Обсуждение результатов. Известны строгие решения для установившегося ламинарного движения жидкости между коаксиальными цилиндрами, для плоскопараллельного течения между неподвижной и подвижной плоскостью, неподвижным и медленно вращающимся диском [8]. Первое решение применимо к пространству между боковыми стенками цилиндрического поплавка и сосуда, второе – к пространству между нижней поверхностью поплавка и дном сосуда. Скорость течения в этих случаях изменяется по координате (по радиусу или по высоте) линейно, ее градиент постояен. Для ньютоновской жидкости с постоянным коэффициентом вязкости скорость V затухающего течения по инерции экспоненциально убывает со временем t . Действительно, для слоя жидкости высотой h со свободной верхней поверхностью при линейном распределении скоростей ($dV/dh = \text{const}$) импульс $p = \rho hV/2$ (ρ – плотность жидкости), а сила f вязкого сопротивления на единицу площади поверхности составляет величину $\eta V/h$. Из равенства $dp/dt = -f$ получается

$$V = V_0 \exp(-2\eta t / (\rho h^2)) \quad (2.1)$$

Близкая к расчетной линейная зависимость $\ln V$ от t свидетельствует об установлении ламинарного режима течения ньютоновской жидкости. Неламинарные



Фиг. 2. Зависимость скорости течения V 10%-ного раствора глицерина в трубке от движущего перепада давления Δp

течения имеют повышенные значения углового коэффициента и соответственно повышенные значения кажущейся вязкости. Общий вид теоретической кривой экспоненциального затухания скорости ньютоновского течения воды по уравнению (2.1) изображен на графике фиг. 1 (кривая 2) совместно с экспериментальными зависимостями (кривые 1 и 3). Здесь кривая 2 смещена на 0,7, а кривая 3 – на 0,4 единицы влево по оси абсцисс.

Эффект возвратного движения в определенной области малых скоростей деформации сдвига свидетельствует о существовании предела прочности воды. Вращательные колебания на второй стадии эксперимента подтверждают наличие упругой возвращающей силы и соответственно упругости сдвига самой жидкости. Вода ведет себя как среда с очень малыми величинами предела прочности и модуля сдвига. Порядок величины предела прочности воды можно определить по значению напряжения сдвига τ , при достижении которого наблюдается возвратное движение. Если слой жидкости имеет высоту h и верхняя поверхность его движения со скоростью V , то скорость сдвига составит V/h . На окружности поплавка-шпинделя радиусом R : $\epsilon = R/h \, d\theta/dt$.

Вязкость воды при 295 К составляет 10^{-3} Па · с [9]. Проявление эффекта отдачи начинается при скорости сдвига порядка 10^{-3} с $^{-1}$. Это же значение скорости сдвига характеризует возвратное движение. Следовательно, предел прочности воды имеет величину порядка 10^{-6} Па. Отметим, что в пленках наблюдали гораздо больший предел прочности воды – величины порядка 10^{-3} Па, что объясняется структурирующим действием твердой подложки [2, 3].

Предел прочности σ и модуль сдвига G связаны уравнением $\sigma = G\theta_{\max}$. Максимальная наблюдаемая упругая деформация θ_{\max} составляла около 1 рад., поэтому $\sigma \approx G$. Определение σ , G дало следующие результаты:

Вещество	Оксид бора, 950 К	Глицерин, 285 К	Вода, 295 К
$\sigma = G$, Па	33	1	10^{-6}
η , Па · с	100	2,7	10^{-3}

Предел прочности воды и ее растворов с глицерином наблюдался нами также в следующих экспериментах: в стеклянной трубке диаметром 0,62 и длиной 83 мм медленно текла вода или раствор; скорость течения фиксировали по перемещению взвешенных коллоидных частиц, наблюдаемых в микроскоп. Течение вызывалось давлением газа, содержащегося в большом сосуде; объем сосуда медленно и непрерывно уменьшался в результате закапывания в него жидкости так, что скорость изучаемого течения в трубке проходила через нуль и меняла направление на обратное. Около нулевых значений скорости каждый раз наблюдалась остановка течения на

значительное время – как бы образовывалась квазитвердая пробка, которая разрушалась лишь тогда, когда накапливалось определенное разрушающее давление. В качестве примера на фиг. 2 приведена характерная кривая $V = f(\Delta p)$, полученная для 10%-ного раствора глицерина при комнатной температуре.

Модуль сдвига и предел прочности в ряду трех исследованных жидкостей возрастают с увеличением их вязкости.

Данные по воде являются, следовательно, не единичным результатом, а частью комплекса единообразных результатов, связанных определенными закономерностями; подобные свойства, видимо, являются достаточно общими.

Заключение. Изучено затухающее круговое течение воды по инерции в цилиндрическом сосуде. Показано, что после достаточного замедления круговое течение в таком инерционном вискозиметре переходит во вращательные колебания; жидкость проявляет небольшой предел прочности и модуль сдвига. Отработана методика измерений σ и G жидкости по частоте и амплитуде таких вращательных колебаний. Определены значения σ и G воды, глицерина и расплава V_2O_3 . Небольшой предел прочности жидкости определяется также по остановке ее течения в трубке, когда давление, вызывающее течение, медленно убывает, проходит через нуль и изменяется на обратное; около нулевых значений давления каждый раз наблюдается остановка течения на значительное время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бирик Е.Е. Реология дисперсных систем. Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. 171 с.
2. Дерягин Б.В., Чураев Н.В. Смачивающие пленки. М.: Наука, 1984. 159 с.
3. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. М.: Наука, 1985. 399 с.
4. Кочурова М.Н., Русанов А.И. Особые свойства свежей поверхности воды и водных растворов // Коллоид. журн. 1995. Т. 57. № 4. С. 605–607.
5. Бондаренко Н.Ф. Физика движения подземных вод. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 215 с.
6. Чураев Н.В. Физикохимия процессов массопереноса в пористых телах. М.: Химия, 1990. 271 с.
7. Апакашев Р.А., Павлов В.В. Ротационный прибор для определения реологических параметров жидкости при малых скоростях деформации // Приборы и техника эксперимента. 1995. № 2. С. 212–213.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
9. Справочник химика / Под ред. Б.П. Никольского. Т. 1. М.; Л.: Химия, 1962. 1071 с.

Екатеринбург

Поступила в редакцию
29.XI.1995