

PACS: 62.10.+s

В.В. Косинский

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЬЕЗОКОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ И ИХ СМЕСЕЙ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Запорожская государственная инженерная академия

Статья поступила в редакцию 2 ноября 2007 года

*Проведен анализ поведения вязких сжимаемых жидкостей под высоким давлением. Выявлены недостатки в определении основных физических характеристик вязких жидкостей и их смесей. Предложена методика определения пьезокоэффициента вязкости для различных жидкостей, а также их смесей под высоким давлением.*

### Введение

С развитием различных областей техники все большее распространение получают технологии, связанные с изостатикой. Характерными примерами являются процессы экструзии различных профилей из тугоплавких металлов и сплавов, изостатического формования изделий из карбидных, нитридных, оксидных и других соединений, а также композиционных материалов, изготовление изделий с особыми свойствами методом пропитки под давлением пористых матриц вязкими инфильтратами и т.д. [1].

Во всех подобных технологических процессах используются давления «рабочих» жидкостей от нескольких десятков до нескольких тысяч мегапаскалей. Все без исключения жидкие среды с повышением давления сжимаются, т.е. уменьшаются в объеме, увеличивая свою вязкость и плотность. Рост вязкости у подавляющего большинства жидкостей происходит по закону [2]:

$$\mu = \mu_0 e^{CP}, \quad (1)$$

где  $\mu_0$  – динамическая вязкость жидкости при атмосферном давлении и температуре  $T = 20^\circ\text{C}$ ;  $P$  – давление, Па;  $C$  – пьезокоэффициент вязкости жидкости,  $\text{Pa}^{-1}$ .

Изменение плотности жидкости  $\rho$  с увеличением давления  $P$  описывается зависимостью [3]:

$$\rho = \rho_0 \left( 1 + a \ln \frac{b+P}{b} \right), \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты уравнения сжимаемости Тэйта.

Физические параметры жидкостей

Параметры	Глицерин	Касторовое масло
Пьезокоэффициент вязкости $C$ , Па <sup>-1</sup>	$0.58 \cdot 10^{-8}$	$0.13 \cdot 10^{-7}$
Коэффициенты уравнения Тэйга, Па		
$a$	0.117	0.104
$b$	$425 \cdot 10^6$	$266 \cdot 10^6$

С изменением плотности сжимаемой жидкости изменяется и ее вязкость. Как правило, при давлениях несколько сотен мегапаскалей вязкость масел возрастает на один, а то и на два порядка, в то время как изменение плотности исчисляется несколькими процентами. Рассмотрим эти изменения на примере двух жидкостей – глицерина и касторового масла (табл. 1).

Подставляя данные табл. 1 в уравнения (1) и (2), определяем, что под давлением 500 МПа вязкость  $\mu$  глицерина увеличится в 18.2 раза, а касторового масла – в 665 раз. Изменение плотности  $\rho$  составит соответственно 9.1 и 11%. Анализируя эти изменения физических свойств масел, необходимо отметить, что при давлениях 500 МПа и более их уже с большей уверенностью можно относить к «твердым» телам.

Значительное загустение жидкостей с увеличением давления ведет к нежелательным последствиям: эти жидкости теряют текучесть в аппаратах и установках высокого давления, создаются опасные перепады давлений на переходных участках, так как нарушается закон Паскаля. Во избежание этого используются снижающие вязкость «рабочих» жидкостей добавки: спирты, керосин, вода, фторорганические и другие соединения [4].

Из всего вышесказанного и проведенных автором исследований [3] можно заключить, что в процессах, связанных с пропиткой пористых тел под давлением, увеличение плотности жидкости особого значения не имеет, а вот повышение ее вязкости с ростом давления является важной технологической характеристикой. Знание законов изменения вязкости в зависимости от величины давления для различных жидкостей и их смесей позволяет правильно выбрать оборудование определенной мощности, а также повысить качество получаемых изделий.

Процесс классического определения изменения вязкости жидкостей с ростом давления требует специального дорогостоящего оборудования и аппаратуры [5]. В связи с этим очень незначительно число жидкостей, у которых определена зависимость изменения вязкости с ростом давления (т.е. пьезокоэффициент вязкости  $C$ ). К ним относят ряд технических масел, спиртов, глицерин, воду и некоторые другие жидкости. Еще меньше данных о пьезокоэффициентах вязкости смесей различных жидкостей [6].

### Постановка и решение задачи

Часто для понижения вязкости приходится используемые жидкости (масла) разбавлять керосином, спиртом и т.д. При этом нужную степень разбавления можно установить, зная пьезокоэффициент вязкости «новой» жидкости.

Автором был предложен и опробован метод определения пьезокоэффициента вязкости для различных жидкостей и их смесей под высоким давлением. Метод является косвенным и заключается в следующем: при достаточно быстром ( $\approx 0.1$  s) сбросе давления (в гидростате) пористые тела, пропитанные жидкостью, разрушаются [7]. Глубина разрушения соответствует длине зоны действия  $\text{grad}P_{\text{сг}}$ , образованной перепадом давления при истечении исследуемой жидкости из пористого тела. В последствии, рассчитав  $\text{grad}P_{\text{сг}}$ , можно получить и всю зависимость распределения давления исследуемой жидкости по глубине всего пористого тела, а далее методом половинчатого деления определить соответствующий пьезокоэффициент вязкости  $C$ .

Остановимся более подробно на сущности описываемого метода. Глубина зоны разрушения зависит от ряда технологических и физических факторов, связанных со свойствами используемых жидкостей и пористых тел, а также оборудования [7].

К технологическим относятся скорость подъема давления в гидростате до определенной величины, выдержка (по времени) под максимальным давлением и быстрый (желательно доли секунды) сброс давления в гидростате от максимального значения до 0.

Физические факторы включают: начальную вязкость используемой жидкости  $\mu_0$ ; коэффициент проницаемости течения жидкости через используемое пористое тело  $k_p$ ; механические свойства пористого тела  $\sigma_t$ ,  $E_p$ ,  $\sigma_c$ ; его пористость, %; коэффициенты сжимаемости жидкости Гэйта  $a$  и  $b$ .

Для определения пьезокоэффициента вязкости любой жидкости выполняем необходимые расчеты.

Устанавливаем физические и прочностные свойства используемого пористого тела: пределы прочности материала при одноосном растяжении  $\sigma_t$  и при сжатии  $\sigma_c$ ,  $\text{kg/mm}^2$ ; модуль упругости пористого тела  $E_p$ ,  $\text{kg/mm}^2$ ; пористость в долях единицы.

Оценку прочности структурно-неоднородных пористых и трещиноватых тел, к числу которых относится и пористая керамика, производим по критерию Писаренко–Лебедева [8]:

$$\chi\sigma_i + (1 - \chi)\sigma_1 = \sigma_t, \quad (3)$$

где  $\chi = \sigma_t/\sigma_c$  – коэффициент неравномерной работы на растяжение и сжатие;  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений;  $\sigma_1$  – наибольшее главное напряжение.

Применяем температурную аналогию (жидкость под давлением в пористом теле создает напряженное состояние, аналогичное температурному воздействию), предложенную Г.П. Черепановым [9]. Если выполняется закон Дарси, то в задачах теории фильтрации внутренние напряжения в упругом скелете описываются обычными уравнениями теории упругости с объемной силой, равной  $\text{grad}P$ , и рассчитываются посредством классической теории термоупругости:

$$\text{grad}P = \frac{\alpha E_p}{1 - 2\nu} \text{grad}T, \quad (4)$$

где  $P$  – давление фильтрующей жидкости в порах,  $\text{kg/mm}^2$ ;  $\alpha$  – коэффициент температурного расширения,  $\text{K}^{-1}$ ;  $T$  – температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Решая термоупругую задачу по определению напряженно-деформированного состояния с учетом критерия прочности (3) и известных физических и прочностных характеристик пористого тела, рассчитываем  $\text{grad}T_{\text{cr}}$  (при котором наступает разрушение), а следовательно, и  $\text{grad}P_{\text{cr}}$  (по аналогии с уравнением (2)).

Постановка задачи и механизм разрушения пористых тел вязкими сжимаемыми жидкостями при высоких давлениях подробно рассмотрены в работе [10].

На сегодняшний день существует достаточно много программных комплексов по численному решению задач термоупругости. В данной работе  $\text{grad}P_{\text{cr}}$  и напряженно-деформированное состояние исследуемого пористого тела находили методом конечных элементов (МКЭ) [11].

Проведем определение физических данных используемой в работе смеси жидкостей.

Начальную вязкость  $\mu_0$  жидкости или смеси при атмосферном давлении и комнатной температуре находим в справочной литературе или определяем на вискозиметре.

Вычисляем значения коэффициентов сжимаемости  $a$  и  $b$  с помощью уравнения Тэйта [12]:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V_1}{V_0} &= a \ln \frac{b + P_1}{b}, \\ \frac{\Delta V_2}{V_0} &= a \ln \frac{b + P_2}{b}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\Delta V_1$  и  $\Delta V_2$  – изменения объема исследуемой жидкости при давлениях соответственно  $P_1 = 300$  и  $P_2 = 500$  МПа;  $V_0$  – начальный объем исследуемой жидкости.

Используя методику, отработанную во ВНИИМетМаш им. А.И. Целикова [13], определяем сжимаемость жидкости  $\Delta V/V$  на прессе усилием 200 т в контейнере высокого (до 1500 МПа) давления с габаритами: внутренний диаметр – 55 мм, общая длина – 350 мм.

Далее переходим к нахождению искомого пьезокоэффициента  $C$  жидкости с помощью математической модели пропитки пористых тел вязкими сжимаемыми жидкостями. В процессе пропитки распределение давления любой жидкости по глубине пропитываемого пористого тела описывается уравнением

$$\left\{ \frac{\left( \frac{a}{b+P} \right) \left( 1 + a \ln \frac{b+P}{b} \right)}{1 - a \ln \frac{b+P}{b}} \right\} \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k_p}{\mu_0} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1 + a \ln \frac{b+P}{b}}{e^{CP}} \frac{\partial P}{\partial x} \right). \quad (6)$$

Решая это уравнение, можно с достаточной точностью рассчитать истинное давление жидкости в пористом теле на любой его глубине и, исходя из этого, обратным пересчетом вычислить искомый пьезокоэффициент вязкости  $C$ .

Исходя из потребностей новых технологий, автором был предложен метод определения давления вязких сжимаемых жидкостей в пористом теле на любой его глубине. Сущность и основные положения данного метода подробно описаны в работах [3,10].

Точность данных предложенной математической модели (6), отражающей сущность процессов пропитки пористых тел вязкими жидкостями, сжимаемыми под высоким давлением, проверяли при различных технологических параметрах на различных по физическим свойствам жидкостях [5,14]. Однако для исследований выбрали глицерин и касторовое масло, исходя из следующих соображений. Эти жидкости недороги, легко доступны, негорючи и невзрывоопасны. Они обладают текучестью при высоком давлении, т.е. не «затвердевают» при давлениях  $> 1100$  МПа. Существует значительная разница в значениях  $\mu$  и  $C$  этих жидкостей:  $\mu_{gl} = 1.48 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ;  $\mu_{c.o} = 0.99 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ;  $C_{gl} = 0.58 \cdot 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$ ;  $C_{c.o} = 0.13 \cdot 10^{-7} \text{ Pa}^{-1}$ .

Методика экспериментов для выявления точности данных математической модели (6) состояла в следующем. Образец помещали в гидростат, заполненный глицерином или касторовым маслом, и подвергали обработке: поднимали давление жидкости в гидростате с определенной скоростью  $v$  до величины  $P_{max}$ ; выдерживали в течение  $t_{p,r}$  под давлением  $P_{max}$ ; быстро сбрасывали давление в гидростате от максимального  $P_{max}$  до 0.

При проведении исследований варьировались 2 величины: максимальное давление жидкости в гидростате ( $P_{max} = 300; 400$  и  $500$  МПа) и время выдержки образца в гидростате ( $t_{p,r} = 30; 45$  и  $60$  s) под давлением  $P_{max}$ .

Скорость подъема давления в гидростате ( $v = 25$  МПа/s) и время его сброса от  $P_{max}$  до 0 ( $t_{rel} \leq 0.1$  s) были величинами постоянными для всех экспериментов. Объяснялось это техническими характеристиками используемого оборудования.

Изменение  $gradP$  жидкости в пористом теле при сбросе давления отслеживали в течение 0.5 s и определяли длину зон пористого тела  $L$ , на которой выполнялось условие  $gradP \geq gradP_{cr}$  (для исследуемой керамики  $gradP_{cr} = 41$  МПа/mm – величина, характеризующая ее прочностные свойства). Заранее следует отметить, что желательно использовать образцы с пористостью 15–40%, величина пор может колебаться от нескольких микрон до десятых долей миллиметра. Для более точного и удобного определения длины зон разрушения требуется, чтобы образцы находились по периметру в жесткой оболочке (металл, жесткая пластмасса, фарфор и т.п.) и в поперечном сечении имели простую геометрическую форму (круга, квадрата или прямоугольника).  $GradP_{cr}$  – величина, с которой начиналось разрушение исследуемой в работе [14] пористой (30%) керамики на основе  $\text{SiO}_2$ . Контроль глубины зон разрушения в пористом теле осуществляли визуально (по длине зоны разрушения  $L$ ).

Таблица 2

Разрушение образцов, подвергнутых пропитке жидкостями при высоких давлениях

Давление жидкости $P_{\max}$ , МПа	Величина зон разрушения в рассчитанных при условии $\text{grad}P \geq \text{grad}P_{\text{cr}}$ образцах, мм					
	Время выдержки под давлением $P_{\max}$ , s					
	30	45	60	30	45	60
Жидкая среда – глицерин						
300	4–5	4–5	4–5	4	4.1	4.2
400	7–8	7–8	8	7	7.3	7.5
500	8–9	9–10	10–11	9.5	10.4	11.3
Жидкая среда – касторовое масло						
300	4–5	5–6	5–7	5.1	6	6.6
400	6–7	6–7	7–9	5.9	7.1	8.2
500	6–7	8–9	8–10	7.4	8.2	8.9

Соответствие данных модели и экспериментальных результатов проверяли путем сопоставления длин зон разрушения экспериментальных образцов и зон, рассчитанных по модели (6), в которых выполнялось условие  $\text{grad}P \geq \text{grad}P_{\text{cr}}$ . На каждый эксперимент приходилось по 3 образца. Данные заносили в табл. 2.

Сравнивая данные табл. 2 по длине зоны разрушения образцов, нужно отметить, что при давлении  $P_{\max} \leq 300$  МПа, а также при минимальном времени выдержки ( $t_{\text{p.r.}} = 30$  s) разница в длине зон разрушения отсутствует. Отличие начинает проявляться либо с повышением  $P_{\max}$  до 400 и 500 МПа, либо с увеличением  $t_{\text{p.r.}}$  до 45 и 60 s под этим давлением, либо с одновременным увеличением этих параметров.

Констатируем, что чем больше значения  $P_{\max}$  и  $t_{\text{p.r.}}$ , тем точнее результаты, отражающие физическую сущность процесса пропитки.

Сравнение результатов относительного изменения величин реальной зоны разрушения к моделируемой  $\Theta$  (табл. 3) позволяет отметить, что с увеличением давления и времени выдержки значение  $\Theta$  постепенно уменьшается.

Таблица 3

Относительное разрушение образцов, подвергнутых пропитке жидкостями при высоких давлениях

Давление жидкости $P_{\max}$ , МПа	Относительное изменение величины реальной зоны разрушения к моделируемой $\Theta$ , %			Среднее значение $\Theta$ , %
	Время выдержки, s			
	30	45	60	
Жидкая среда – глицерин				
300	11.1	8.9	6.7	8.9
400	6.7	2.7	6.2	5.2
500	11.7	9.5	8.6	9.8
Жидкая среда – касторовое масло				
300	13.3	9.1	10	10.8
400	9.2	9.2	9.3	9.2
500	13.8	3.5	1.1	6.1

Анализируя среднее значение  $\Theta$ , отмечаем, что чем больше давление жидкости  $P_{\max}$  и время выдержки  $t_{p,r}$  под этим давлением, тем меньше расхождения между расчетными (на основании модели (6)) и экспериментальными значениями. Из этого вытекает, что для получения более точных результатов при исследовании поведения вязких сжимаемых жидкостей под высоким давлением необходимо экспериментировать, как минимум, при  $P \geq 300$  МПа и максимально возможной длительности выдержки по времени ( $t_{p,r} \geq 60$  s).

Анализируя литературные источники [4,13,15], можно отметить, что отклонения от истинных значений в результатах исследований по определению изменения вязкости жидкостей, а также их смесей под высоким давлением считаются приемлемыми для расчетов, если эти отклонения составляют не более 10%.

Проведенные исследования и предложенная автором математическая модель (6) пропитки пористых сред вязкими жидкостями, сжимаемыми под высоким давлением, свидетельствуют, что погрешность результатов при давлениях  $P_{\max} \sim 300$  МПа и выдержке по времени  $t_{p,r} \geq 60$  s составляет  $\sim 11\%$ , при  $P_{\max} \sim 400$  МПа – 9%, а при  $P_{\max} \sim 500$  МПа – 7%. С применением предложенных рекомендаций можно достичь еще большей точности результатов.

### Выводы

Определение пьезокоэффициентов вязкости различных жидкостей и их смесей с использованием предложенной модели, учитывающей уровень давления и время пропитки, позволяет получить расчетные результаты с отклонением от экспериментальных не более 10%.

1. *Л.И. Тучинский*, Композиционные материалы, получаемые методом пропитки, Металлургия, Москва (1986).
2. *Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд*, Свойства газов и жидкостей, Химия, Ленинград (1982).
3. *В.В. Косинский*, в сб.: Металлургия, Тр. Запорожской государственной инженерной академии, вып. 8, 75 (2003).
4. *Гидропластическая* обработка металлов, К.Н. Богоявленский, А.Г. Рябинин (ред.), Машиностроение, Ленинград (1988).
5. *Е.В. Золотых, Ю.Т. Бухаров, Д.Т. Кузнецов*, Исследования в области высоких давлений, Комитет стандартов мер и измерительных приборов, Москва (1969), вып. 104.
6. *Л.В. Прозоров, А.А. Костава, В.Д. Ревов*, Прессование металлов жидкостью высокого давления, Машиностроение, Москва (1972).
7. *В.В. Косинский, В.Ф. Косинский*, в сб.: Физика и техника высоких давлений, вып. 34, 90 (1990).
8. *Г.С. Писаренко, А.А. Лебедев*, Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии, Наукова думка, Киев (1976).
9. *Г.П. Черепанов*, Механика хрупкого разрушения, Наука, Москва (1974).

10. *В.В. Косинский*, Проблемы прочности № 4, 69 (1991).
11. *Вычислительные методы в механике разрушения*, С. Атлури (ред.), Мир, Москва (1990).
12. *Д.С. Циклис*, Техника физико-химических исследований при высоких и сверх-высоких давлениях, Химия, Москва (1976).
13. *Совместные работы по созданию и освоению технологии и оснастки для гидродинамического удаления пористых стержней турбинных лопаток: Отчет о НИР (заключительный)*, ВНИИМетМаш, Москва (1985).
14. *В.В. Косинский, Л.Ю. Максимов и др.*, А.с. № 1384335, Бюл. № 12, 1988 г.
15. *С.С. Кутателадзе, И.М. Борошанский*, Справочник по теплопередаче, Госэнергоиздат, Ленинград–Москва (1959).

*V.V. Kosinsky*

#### **DEFINITION OF VISCOSITY PIEZOCOEFFICIENT FOR DIFFERENT LIQUIDS AND THEIR MIXTURES UNDER HIGH PRESSURES**

The behaviour of viscous compressed liquids under high pressure has been analysed. Drawbacks in definition of the basic physical characteristics of viscous liquids and their mixtures have been revealed. A method is proposed to define piezocoefficient of viscosity for various liquids and their mixtures under high pressure.