

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 μ_0 – динамическая вязкость жидкости при атмосферном давлении и температуре $T = 20^\circ\text{C}$; P – давление, Па; C – пьезокоэффициент вязкости жидкости, Pa^{-1} .

Изменение плотности жидкости ρ 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, Pa^{-1}	$0.58 \cdot 10^{-8}$	$0.13 \cdot 10^{-7}$
Коэффициенты уравнения Тэйга, Pa		
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 μ глицерина увеличится в 18.2 раза, а касторового масла – в 665 раз. Изменение плотности ρ 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 (≈ 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 μ_0 ; коэффициент проницаемости течения жидкости через используемое пористое тело k_p ; механические свойства пористого тела σ_t , E_p , σ_c ; его пористость, %; коэффициенты сжимаемости жидкости Гэйти 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 σ_t и при сжатии σ_c , kg/mm^2 ; модуль упругости пористого тела E_p , 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; σ_i – интенсивность напряжений; σ_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, kg/mm^2 ; α – коэффициент температурного расширения, K^{-1} ; T – температура, $^{\circ}\text{C}$; ν – 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 μ_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 ΔV_1 и ΔV_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 пьезокэффициент 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 μ 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 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 Θ (табл. 3) позволяет отметить, что с увеличением давления и времени выдержки значение Θ 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 Θ , %			Среднее значение Θ , %
	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 Θ , 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. Коссинский*, 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. Коссинский*, 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.