

УДК 532.546

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКА СЖИМАЕМЫХ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ ТЕЧЕНИИ ИХ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

В. В. КОСИНСКИЙ

Запорожская государственная инженерная академия

Получено 23.10.2008 ◊ Пересмотрено 20.04.2009

На основе математической модели пропитки под высоким давлением пористых тел различными по физическим свойствам жидкостями дан анализ энергетических составляющих (потенциальной и кинетической) потока жидкости в порах тела на различной глубине. Обоснована методика расчета энергии с учетом изменяющихся от величины давления параметров: модуля упругости, плотности и объема жидкостей. По изменению модуля упругости жидкости, предложен способ определения степени энергоемкости жидкостей от величины давления.

На основі математичної моделі просочення під високим тиском пористих тіл різними за фізичними властивостями рідинами виконаний аналіз енергетичних складових (потенційної та кінетичної) потоку рідини в порах тіла на різній глибині. Обґрунтовано методику розрахунку енергії, враховуючи параметри, що змінюються в залежності від величини тиску: модуля пружності, густини і об'єму рідин. За зміною модуля пружності рідини запропоновано спосіб визначення ступеня енергоємності рідин від величини тиску.

The analysis of power components (potential and kinetic) of liquid energy in a body on various depths is given on the basis of mathematical model of impregnation under a high pressure of porous bodies by various liquids on physical properties. The design procedure of energy with consideration of parameters that is changing by pressure value (the module of elasticity, density and volume of liquids) is based. The method of definition of power consumption degree of liquids from pressure size is offered on the base of liquid module of elasticity changing.

## ВВЕДЕНИЕ

Процессы фильтрации различных по физическим свойствам жидкостей в пористые среды изучаются давно [1]. Особое внимание этим вопросам уделяют в нефтегазовой сфере [2], химической промышленности, а также в отраслях, связанных с очисткой или разделением вязких жидких субстанций.

Процессы течения вязких сжимаемых жидкостей под высоким ( $> 100$  МПа) давлением изучены мало и информация о них незначительна. О степени влияния высокого давления на изменение физических свойств жидкостей отмечено в ряде работ [3, 4], относящихся к обработке металлов давлением (порошковая металлургия, композиционные материалы и т. д.). Аналогичные задачи решаются в горнодобывающей и строительной отрасли [5, 6].

В настоящее время с развитием и появлением новой техники и технологий в различных областях промышленности (авиации, машиностроении, атомной энергетике) возникает все большая потребность в новых видах материалов со специальными свойствами, получаемых методом пропитки пористых тел различными по физическим свойствам жидкими инфильтратами. При создании таких материалов (композитов) необходимо учитывать изменения физических свойств исполь-

зуемых инфильтратов в зависимости от давления. Для правильной оценки подбора технологического давления на инфильтраты (чтобы не разрушить или наоборот разрушить основу пористого тела) нужно знать физику процессов их течения (скорость движения, степень сжатия, потенциальную и кинетическую энергию) под высоким давлением в порах и каналах тел.

Для создания таких композитных материалов используются технологии, основанные на применении высоких давлений и температур [7]. Одно из направлений изготовления такого рода материалов и изделий – использование процессов гидростатики с применением давлений от 10 до  $10^3$  МПа, это при том, что размер пор пропитываемых тел может колебаться от десятых долей миллиметра до десятых долей микрометра.

Кроме создания новых видов композиционных материалов методом пропитки и способов интенсивной очистки жидкостей, высокие давления используют и для изменения физических свойств пропитываемых тел. От степени сжимаемости тел зависит изменение их фундаментальных свойств: зарождение и рост дислокаций, увеличение интенсивности их движения, "залечивание" микропор и дефектов, увеличение прочности, динамической вязкости, твердости поверхностного слоя и ряд других [8].

В свою очередь, определение и расчет сжи-

маемости основывается на использовании полуэмпирических потенциалов межатомного взаимодействия: Леннарда–Джонса, Борна–Майера и Берча–Мурнагана [9]. Зная величину энергетического потенциала жидкости, пропитавшей под высоким давлением пористое тело, и аналогичный потенциал тела, можно прогнозировать улучшенные вышеперечисленных свойств.

Технология пропитки различных пористых материалов вязкими средами под высоким давлением рассмотрена автором в ряде работ [10, 11]. В них дана математическая модель пропитки с учетом изменения физических свойств текучих сред (вязкости, плотности, сжимаемости) от величины давления (до 1 ГПа) в гидростате. Рассмотрены и проанализированы основные технологические параметры процесса пропитки с учетом целостности пористых оснований (скорость подъема давления, время выдержки под максимальным давлением и скорость сброса давления в гидростате).

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Любое изменение объема пропитывающей жидкости при фильтрации в пористые среды под высоким давлением ведет к увеличению ее внутренней энергии. При движении под высоким давлением всю энергию жидкости можно разделить на кинетическую и потенциальную.

Полная энергия  $U_0^L$  движущейся под высоким давлением жидкости определяется [2]:

$$U_0^L = U_P^L + U_K^L = \int_v \rho(P) \left( T_P^L + \frac{v^2}{2} \right) dV, \quad (1)$$

где  $U_P^L = \int_v \rho(P) T_P^L dV$  – потенциальная энергия сжимаемой жидкости;  $T_P^L$  – удельная (отнесенная к единице массы) внутренняя энергия;  $U_K^L = \int_v \rho(P) \frac{v^2}{2} dV$  – кинетическая энергия сжимаемой жидкости;  $\rho = f(P)$  – плотность жидкости, как функция изменения давления  $P$ ;  $v$  – скорость течения жидкости в пористом теле.

Основная задача данной работы состоит в определении энергии жидкости на различной глубине в различные моменты времени технологического процесса пропитки ею пористого тела: при подъеме давления, выдержке под этим давлением и сбросе.

## 2. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ

Определение энергетических параметров течения вязких сжимаемых жидкостей в пористых телах под высоким давлением предлагается рассматривать на основе уравнения пропитки. Так как все без исключения жидкости с увеличением давления сжимаются, увеличивая свою вязкость и плотность, то в предлагаемой математической модели (2) все эти факторы учтены с использованием законов их изменения от величины давления [12]. Приближенные методы решения задач нестационарных движений вязкопластических сред довольно громоздки, зачастую приводят к плохо обзримым результатам и оцениваются лишь на некоторых эталонных решениях [13]. В предлагаемой модели (2) достоверность результатов решений при различных начальных и граничных условиях можно проверить экспериментально – по глубине зоны разрушения при быстром ( $\sim 0.1$  с) сбросе давления в гидростате [14].

Предлагаемая к рассмотрению математическая модель имеет вид

$$\frac{\partial P}{\partial t} (\rho \cdot \chi) = k \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho}{\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \right). \quad (2)$$

Законы изменения вязкости  $\mu$ , плотности  $\rho$  и сжимаемости  $\chi$  жидкостей от величины давления  $P$ , используемые в решении общего уравнения пропитки под давлением, будут:

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{CP}, \quad (3)$$

$$\rho = \rho_0 \cdot \left( 1 + a \cdot \ln \frac{b+P}{b} \right), \quad (4)$$

$$\chi = \frac{a}{(b+P) \left( 1 - a \cdot \ln \frac{b+P}{b} \right)}, \quad (5)$$

где  $P = P(x, t)$  – давление жидкости как функция двух переменных, (МПа);  $x$  – линейная координата, (мм);  $t$  – время, (с);  $\mu_0$  – динамическая вязкость среды при  $T = 20^\circ\text{C}$ , (Па·с);  $C$  – пьезокэффициент вязкости, (Па $^{-1}$ );  $k$  – коэффициент проницаемости пористого тела, (м $^2$ );  $a$  и  $b$  – коэффициенты сжимаемости жидкостей Тэйтта;  $\chi$  – сжимаемость жидкости, (МПа $^{-1}$ ).

Зависимость (3) отражает закон изменения вязкости  $\mu$  жидкостей от величины давления [15]. Пьезокэффициенты вязкости жидкостей  $C$  подбирают из литературных источников или самостоятельно, имея надлежащее оборудование [16]. Изменение плотности  $\rho$  жидкостей от давления (4)

зависит от сжимаемости (5) и базируется на определении коэффициентов сжимаемости жидкостей Тэйта  $a$  и  $b$ . Начальное значение плотности жидкости  $\rho_0$  не влияет на изменение давления по глубине пористого тела. Влияет только закон ее изменения [8].

Образцы, используемые для исследования процесса пропитки пористых тел под высоким давлением различными жидкостями, представляли собой в сечении прямоугольник длиной  $L=150$  мм со свободными торцами и экранированной металлом боковой поверхностью. Вследствие этого жидкость могла проникать в тело только со стороны открытых торцов. Поставленная задача носит одномерный характер и основные параметры – давление  $P$  и градиент давления – определяются по координате  $x$ .

**Граничные условия** для данного случая принимают вид:

$$P(0, t) = v_p \cdot t + 0.1,$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} \left( \frac{L}{2}, t \right) = 0.$$

Первое условие отражает закон изменения давления на границе входа жидкости в пористое тело. Это изменение носит линейный характер и определяется произведением скорости увеличения давления  $v_p$ , МПа/с, на время  $t$ , с. Второе условие определяется симметрией, т. е. в среднем сечении образца поток отсутствует.

**Начальное условие** задается исходя из того, что в начальный момент времени давление жидкости равно атмосферному (0.1 МПа):

$$P(x, 0) = 0.1.$$

Математическая модель пропитки различных сжимаемых жидкостей в пористые тела (2) представляет собой **нелинейное дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка параболического типа** и точного аналитического решения не имеет. Решение задачи осуществлялось с использованием конечно-разностной аппроксимации по неявной схеме.

Численные решения этого уравнения дают возможность анализировать по времени распределение давления жидкости по глубине пористого тела при заданных краевых условиях. Зная давление сжатой жидкости на любом участке глубины пропитываемого тела, можно определить энергетическое состояние как самого тела, так и пропитавшей его жидкости. Алгоритм решения (2) позволяет найти величины давлений исследуемой жидкости на различной глубине пористого тела при

различных краевых условиях в моменты: 1 – подъема давления до максимальной величины  $P_{max}$ ; 2 – выдержки по времени под этим давлением; 3 – при различной скорости сброса давления в гидростате от  $P_{max}$  до атмосферного.

Полную энергию жидкости можно определить по величине работы, затраченной на ее сжатие в **камере высокого давления** (КВД). Полагаем, что сжатие жидкости выполняется линейно, т. е. прикладываемое усилие повышается (например, до 1 МН) линейно. Тогда величина работы (погрешность на энергию деформации КВД составляет  $\sim 0.4\%$  и ею можно пренебречь), затраченной на сжатие жидкости, будет определяться

$$A = U_0^L = \frac{F}{2} \cdot \Delta H, \quad (6)$$

где  $A$  – работа, затрачиваемая на изменение объема сжимаемой жидкости (Дж);  $U_0^L$  – внутренняя энергия сжимаемой жидкости (Дж);  $F$  – усилие, прикладываемое на жидкость (МН);  $\Delta H$  – изменение высоты жидкости в КВД от приложенной силы  $F$  (м).

Изменение высоты сжимаемой жидкости  $\Delta H$  от действия силы  $F$  будет соответствовать изменению ее объема  $\Delta V$  (диаметр КВД не изменяется) от давления  $P$ . Тогда соотношение (6) можно записать в виде:

$$A = \frac{P}{2} \cdot \Delta V, \quad (7)$$

где  $\Delta V$  – изменение объема жидкости в КВД от приложенного давления ( $\text{м}^3$ ).

Сжимаемость любых сред  $\chi$  есть величина, обратная их модулю упругости  $\chi = 1/E$ , и определяется как  $\chi = \Delta V/V \cdot \Delta P$ . Тогда изменение модуля упругости будет вычисляться следующим образом:

$$E_L = V \cdot \frac{\Delta P}{\Delta V}. \quad (8)$$

Подставляя в выражение (7) значение  $\Delta V$  из соотношения (8) и учитывая, что при этом  $\Delta P$  принимает значение прикладываемого усилия  $P$ , получаем, что работа, а следовательно и внутренняя энергия, затраченная на изменение объема жидкости с учетом ее физических свойств (модуля упругости  $E_L$ ), будет определяться как

$$A = U_0^L = \frac{P^2}{2E_L} \cdot \Delta V. \quad (9)$$

Исходя из уравнения Тэйта [17], описывающего закон изменения объема сжимаемой жидкости от величины давления

$$\frac{\Delta V}{V} = a \cdot \ln \frac{b+P}{b}, \quad (10)$$

и используя значение коэффициента сжимаемости жидкости  $\chi$ , с учетом того, что  $\chi = 1/E_L$ , находим величину модуля упругости сжимаемой жидкости  $E_L$  от величины давления:

$$E_L = \frac{(b+P) \left(1 - a \cdot \ln \frac{b+P}{b}\right)}{a}. \quad (11)$$

Изменение модуля упругости жидкостей от величины давления в первом приближении можно считать линейным.

Величина потенциальной энергии  $U_P^L$ , получаемой жидкостью при изменении объема, от величины давления  $P$  вычисляется согласно зависимостям (9) и (11):

$$U_P^L = \frac{P^2 \cdot a}{2(b+P) \left(1 - a \cdot \ln \frac{b+P}{b}\right)} \cdot \Delta V_L, \quad (12)$$

где  $\Delta V_L = V \left(a \cdot \ln \frac{b+P}{b}\right)$  – объем, на который жидкость сжалась (из уравнения Тэйта).

Величина кинетической энергии  $U_K^L$ , затрачиваемой на движение сжимаемой жидкости в порах тела, определяется как

$$U_K^L = \frac{M \cdot v^2}{2}, \quad (13)$$

где  $M = \rho \cdot V$  – масса используемой жидкости в единице объема  $V$  пористого тела;  $\rho$  – находится согласно (4).

Масса жидкости на соответствующей глубине пористого тела под давлением  $P$  в объеме  $V$  будет вычисляться по формуле:

$$M = V \cdot \rho_0 \cdot \left(1 + a \cdot \ln \frac{b+P}{b}\right).$$

Скорость течения жидкости в порах под соответствующим давлением на соответствующей глубине определяется, исходя из **нелинейного** закона Дарси [18]:

$$v = -\frac{k}{\mu} \cdot \text{grad}P, \quad (14)$$

где  $\text{grad}P$  – градиент давления на исследуемой глубине тела (МПа/мм).

**Кинетическая энергия жидкости**, движущейся в пористом теле под высоким давлением,

находится как

$$U_K = \frac{\rho_0 \left(1 + a \cdot \ln \frac{b+P}{b}\right) \cdot V}{2} \times \left(\frac{k \cdot \text{grad}P}{\mu_0 \cdot e^{CP}}\right)^2. \quad (15)$$

В процессах пропитки пористых тел под высоким давлением **на стадиях подъема давления** и выдержки ввиду малости значений кинетической энергии жидкостей, по сравнению с потенциальной, учитываться не будет. Полная энергия жидкостей с незначительными погрешностями приравняется к потенциальной ( $U_0^L = U_P^L$ ) и определяется формулой

$$U_0^L = U_P^L = \frac{P^2 \cdot a \cdot V \left(a \cdot \ln \frac{b+P}{b}\right)}{2(b+P) \left(1 - a \cdot \ln \frac{b+P}{b}\right)}. \quad (16)$$

Анализ энергетического состояния вязкой сжимаемой жидкости по глубине пористого тела в процессе пропитки будет проведен на примере **глицерина**.

**Физические характеристики глицерина** при  $T = 20$  °С: начальная вязкость  $\mu = 1.48$  Па·с, плотность  $\rho_0 = 1.26$  г/см<sup>3</sup>, коэффициенты сжимаемости (Тэйта)  $a = 0.117$  и  $b = 425$  МПа, пьезокоэффициент вязкости  $C = 0.58 \cdot 10^{-2}$  МПа<sup>-1</sup> [19].

**Физические характеристики пористого тела:** оксидная керамика (основа SiO<sub>2</sub>) с коэффициентом проницаемости  $k = 1.26 \cdot 10^{-13}$  м<sup>2</sup> и средним размером пор  $\Phi_{sr} = 0.001$  мм. Основа инертна – в процессе пропитки химически не взаимодействует с пропитывающей ее жидкостью.

Коэффициент проницаемости  $k$  служит геометрической характеристикой пористого тела, и при пропитке тела различными по физическим свойствам жидкостями считается величиной постоянной. В процессах пропитки под высоким давлением коэффициент фильтрации есть величина переменная, зависящая от прочностных свойств пористого тела, что может отражаться на увеличении количества открытой пористости за счет "вскрытия" замкнутых пор и частичного разрушения "слабых" перегородок. В используемой пористой керамике коэффициент проницаемости оставался величиной постоянной при давлении  $P = 700$  (МПа) [20].

Технологические параметры процесса: максимальное гидростатическое давление  $P = 500$  МПа,

скорость увеличения давления  $v_P = 25$  МПа/с, выдержка под максимальным давлением  $t_r = 30$  с. Время сброса давления –  $t_c = 0.1$  и 1 с.

Исходные значения подставлялись в выражение (2) и по данным численных решений строились графики распределения давления глицерина по глубине пористого тела после подъема давления до максимального значения  $P_{max} = 500$  МПа, после выдержки и после сброса давления от  $P_{max}$  до атмосферного.

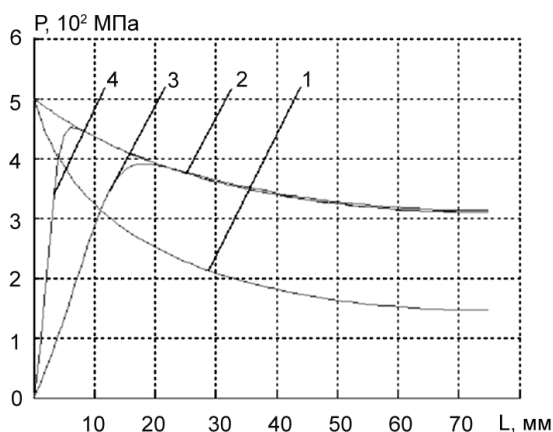


Рис. 1. Графики распределение давления глицерина по глубине пористого тела:  
1 – после подъема давления; 2 – после выдержки;  
3 – после сброса за 1 с; 4 – после сброса за 0.1 с

На основе данных таблицы определяем, что на стадиях: 1 – увеличения давления до максимального значения  $P_{max}$  энергия жидкости по глубине тела уменьшается; 2 – после технологической выдержки под давлением энергия по глубине тела увеличивается. При соответствующем уменьшении скорости подъема давления и увеличения выдержки можно добиться полного выравнивания энергии по всей глубине пропитываемого тела.

Анализируя влияние времени сброса давления на изменение энергетических составляющих жидкости, нужно отметить, что чем меньше время сброса, тем больше ее энергия на первых 15–20 мм глубины тела.

Из определения (9) видно, что изменение энергии сжимаемой жидкости зависит от изменения модуля упругости  $E_L$  (11), поэтому проведем анализ изменения модуля упругости ряда различных по физическим свойствам жидкостей: воде, маслу трансформаторному и глицерину.

Изменения модуля упругости от величины гидростатического сжатия этих жидкостей показаны на рис. 2.

Согласно представленным на рисунке данным

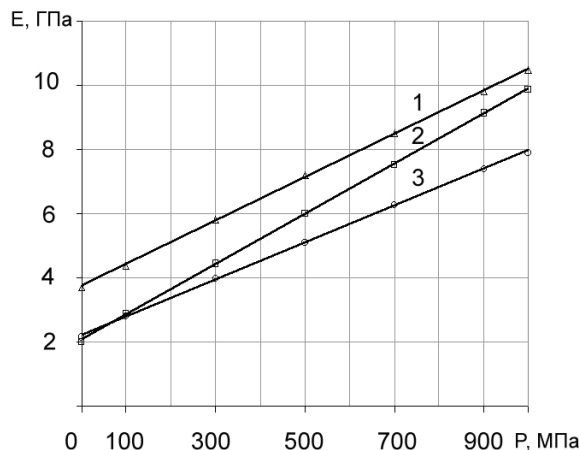


Рис. 2. Изменение модуля упругости  $E_L$  жидкостей от величины давления  $P$  при их изостатическом сжатии:  
1 – глицерин, 2 – трансформаторное масло, 3 – вода

можно утверждать, что из трех вышеприведенных жидкостей **при одинаковом давлении сжатия** наибольшую энергию будет аккумулировать та, у которой изменение (увеличение) модуля упругости с ростом давления более значительно, т. е. трансформаторное масло, затем глицерин и затем вода.

Анализируя выражение (7), отметим, что **основным параметром**, влияющим на изменение энергии, является изменение давления жидкости  $P$ . Другой параметр –  $\Delta V_L$ , входящий в (7), зависит от модуля упругости жидкости  $E_L$  и влияет менее значительно.

Исходя из вышеизложенного, можно утверждать, что:

1. При гидростатической пропитке пористых тел жидкостями под высоким давлением на стадиях увеличения давления и выдержки под этим давлением можно считать, что полная энергия жидкости равна ее потенциальной энергии  $U_0^L = U_P^L$ .

2. Величина энергии жидкости, движущейся в пористом теле под высоким давлением, в основном зависит от изменения давления  $P$ .

3. Из двух, различных по физическим свойствам жидкостей наибольшей потенциальной энергией **при одинаковом давлении нагружения** будет обладать та, у которой модуль упругости изменяется более значительно.

Проведем аналогию между внутренней энергией пористого тела и энергией сжимаемой вязкой жидкости. Полную энергию тела под гидростатической нагрузкой можно разделить на две составляющие: энергию изменения объема и энергию изме-

Табл 1. Параметры глицерина в пористом теле на различной его глубине: после подъема давления, выдержки в 30 секунд, и сброса давления за 1 и 0.1 секунды

Глубина точки определения L (мм)	Давление P (МПа)	Модуль упругости E (ГПа)	Энергия (подъем давления) $U_0$ (Дж)	Энергия (выдержка) $U_0$ (Дж)	Энергия (сброс 1 с) $U_0$ (Дж)	Энергия (сброс 0.1 с) $U_0$ (Дж)
1	500	7.187	4.75	4.75	~ 0	~ 0
10	334	6.047	1.88	3.58	0.996	3.58
20	257	5.507	1.0	2.78	2.7	2.78
50	164	4.832	0.32	1.77	1.77	1.77

нения формы:

$$U_0^T = U_V^T + U_F^T, \quad (17)$$

где  $U_V^T$  – энергия изменения объема тела;  $U_F^T$  – энергия изменения формы.

**Полная энергия пропитываемого тела** определяется как [17]:

$$U_0^T = \frac{1}{2E_T} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1 + \sigma_1\sigma_2)], \quad (18)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные нормальные напряжения;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $E_T^*$  – модуль упругости тела, зависящий от величины гидростатического давления.

В рассматриваемом случае (**гидростатическое сжатие**  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = P$ ) полная энергия пористого тела будет определяться как потенциальная энергия изменения объема:

$$U_0^T = \frac{3 \cdot (1 - 2\nu)}{2E_T^*} \cdot P^2 \cdot \Delta V_T. \quad (19)$$

А энергию изменения объема тела (через энергию гидростатического сжатия) всегда можно выразить через потенциалы: Борна–Майера, Морзе, Леннарда–Ждонса.

При всестороннем сжатии  $U_F^T = 0$ , поэтому при течении вязких сжимаемых жидкостей в пористых телах под высоким давлением можно считать, что полная энергия пропитанного тела равна его потенциальной (энергии изменения объема), т. е.  $U_0^T = U_V^T$ . Существенной разницей в расчетах по изменению объема от всестороннего давления "твердых" тела и жидкостей будет то, что изменение объема твердых тел минимальны (при  $P = 1000$  МПа – от нескольких % до десятых долей %), в то время как у жидкостей при аналогичном давлении изменение объема может составлять 15 и более %. В связи с этим при расчетах энергетических составляющих жидкостей необходимо учи-

тывать изменения их модуля упругости от величины давления [15].

Зная энергетический потенциал пористого тела и потенциал пропитавшей его под высоким давлением жидкости, можно судить об изменении пористости, степени "залечивания" микропор и дефектов, об изменении таких важных свойств металлов как увеличение прочности, динамической вязкости, твердости поверхностного слоя и ряд других качеств.

В работе [18] при исследовании течений вязких, сжимаемых жидкостей в пористых телах под высоким давлением было выявлено, что у жидкостей с начальной вязкостью  $\mu_0 \geq 0.5$  Па·с при давлениях  $P \geq 10$  МПа течение будет носить ламинарный характер. В рассматриваемой задаче используемое давление превышает 10 МПа, поэтому течение глицерина в порах тела носит только ламинарный характер.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе предложенной математической модели пропитки пористых тел под высоким давлением различными по физическим свойствам жидкостями дан анализ физических и технологических параметров, влияющих на изменения энергии жидкости в порах тела, на различной глубине в стадиях увеличения давления и выдержки под этим давлением.

2. Определены зависимости расчета энергии жидкостей с учетом изменяющихся от величины давления: модуля упругости, плотности и объема.

3. На примере глицерина и пористой керамики ( $\Phi_{sr} = 0.001$  мм) в процессе пропитки под высоким ( $P = 500$  МПа) давлением рассмотрено изменение энергии глицерина на стадиях: увеличения давления, выдержки под давлением и при различных по времени сбросах давления в гидростате от  $P_{max}$  до атмосферного – 0.1 МПа.

4. На основе анализа изменения модуля упруго-

сти жидкостей предложен способ определения степени энергоемкости жидкостей от величины давления.

5. Выявлено, что от величины энергии сжимаемой жидкости зависит потенциал пропитываемого твердого тела, который в свою очередь может влиять на изменение его физических (изменение пористости) и структурных (изменение пластичности, прочности) характеристик.

1. *Лойцянский Г. П.* Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. – 848 с.
2. *Босниев К. С., Дмитриев Н. М., Розенберг Г. Д.* Нефтегазовая гидромеханика. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. – 544 с.
3. *Влияние высоких давлений на вещество.* Т 1./ Под ред. Пилянкевича А. Н. – К.: Наукова думка, 1987. – 232 с.
4. *Гидропластическая обработка металлов /* Под ред. Богоявленского К. Н., Рябина А. Г. – Л.: Машиностроение, 1988. – 256 с.
5. *Михалюк А. В.* Торпедирование и импульсный гидроразрыв пластов. – К.: Наукова думка, 1986. – 208 с.
6. *Гудок Н. С.* Изучение физических свойств пористых сред. – М.: Недра, 1970. – 208 с.
7. *Тучинский Л. И.* Композиционные материалы, получаемые методом пропитки. – М.: Металлургия, 1986. – 208 с.
8. *Ударные волны и экспериментальное состояние вещества /* Под ред. В. Е. Фортова. – М.: Наука, 2000. – 426 с.
9. *Поляков В. В., Щеголев Е. А.* К расчету ударных адиабат твердых тел // ПМТФ. – 1982. – № 2. – С. 94–98.
10. *Косинский В. В., Косинский В. Ф.* Проникновение жидкостей в пористые тела под высоким давлением. Физика и техника высоких давлений // Сб. научных трудов АН УССР. – Донецк, 1990. – № 34. – С. 90–94.
11. *Косинский В. В.* Влияние физических свойств жидкостей на процесс пропитки пористых тел под высоким давлением // Металлургия. Труды запорожской государственной инженерной академии. – 2003. – Выпуск 8. – С. 75–79.
12. *Косинский В. В.* Математическое обоснование влияния основных технологических факторов на процессы пропитки недеформируемых пористых оснований вязкими средами под высоким давлением // Журн. Порошковая металлургия. НАНУ. – 2009. – № 1/2. – С. 18–28.
13. *Огибалов П. М., Мирзаджанзаде А. Х.* Нестационарное движение вязко-пластических сред. – М.: Издат. Моск. ун-та, 1977. – 373 с.
14. *Косинский В. В.* Разрушение пористых тел жидкостью под высоким давлением // Проблемы прочности. – 1991. – № 4. – С. 69–73.
15. *Золотых Е. В., Бухаров Ю. Т., Кузнецов Д. Т.* Исследования в области высоких давлений. Вып. 104/164. – М.: Комитет стандартов мер и измерительных приборов, 1969. – 386 с.
16. *Косинский В. В.* Определение пьезокоэффициента вязкости различных жидкостей и их смесей при высоких давлениях // Физика и техника высоких давлений. Сб. научных трудов НАНУ. – Том 18, № 1. – Донецк, 2008. – С. 93–100.
17. *Бриджмен П. В.* Новейшие работы в области физики высоких давлений. – М.: ИЛ, 1948. – 300 с.
18. *Косинский В. В.* Нелинейные законы Дарси и критерий Рейнольдса при течении сжимаемых жидкостей под высоким давлением в пористых телах // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. Науковий журнал. – Запоріжжя, ЗНТУ. – 2007. – № 1. – С. 60–69.
19. *Циклис Д. С.* Техника физико-химических исследований при высоких и сверхвысоких давлениях. – М.: Химия, 1976. – 432 с.
20. *Косинский В. В.* Определение коэффициента проницаемости пористых тел при пропитке вязкими жидкостями под давлением // Металлургия. Труды Запорожской государственной инженерной академии. – 2006. – Выпуск 13. – С. 55–59.
21. *Работнов Ю. Н.* Сопроотивление материалов. – М.: ФМ литература, 1962. – 456 с.