

УДК 532.6: 622.7

Елисеев В. И., канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
Луценко В. И., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
(ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины)

ВЫТЕСНЕНИЕ ЖИДКОСТЬЮ ГАЗОВОГО ПУЗЫРЯ ИЗ КАПИЛЛЯРА

Єлісеєв В. І., канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співр.,
Луценко В. І., канд. техн. наук, ст. наук. співр.
(ІГТМ ім. М.С. Полякова НАН України)

ВИТІСНЕННЯ РІДИНОЮ ГАЗОВОГО ПУЗИРЯ З КАПІЛЛЯРА

Yeliseyev V. I., Ph. D. (Phys.-Math.), Senior Researcher,
Lutsenko V. I., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher
(N.S. Polyakov IGTM NAS of Ukraine)

GAS BUBBLE DISPLACEMENT FROM CAPILLARY BY LIQUID

Аннотация. В приближенной постановке рассмотрена задача пропитки тела с однородной пористой структурой. В связи с невозможностью моделирования реального процесса задача сводится к теоретическому анализу вытеснения газового пузыря из одиночного капилляра, погруженного в жидкость. Показано, что изучаемый процесс, в основном, состоит из двух этапов: сжатия пузыря и его вытеснения из капилляра. При этом, время вытеснения является преобладающим. В предположении постоянства давления в пузыре, получено аналитическое выражение для определения изменения во времени высоты уровня жидкости, вытесняющей газовый пузырь. Проведено сравнение теоретических результатов с полученной ранее экспериментальной зависимостью водонасыщения образцов из базальта, которое показало удовлетворительное качественное совпадение. Для более точного теоретического описания процесса пропитки необходимо учитывать структурные характеристики пропитываемых образцов.

Ключевые слова: пропитка, газовый пузырь, мениск, угол смачивания, капилляр

Введение. Пропитка пористого тела зависит от многих параметров, в частности, от его поровой структуры, от смачиваемости поверхности поровых каналов, а также и от особенностей самого процесса. При частичном погружении образца в воду и его медленном опускании, жидкость будет подниматься по поровым каналам в основном за счет капиллярных сил. В другом случае, например, при погружении тела в жидкость на глубину, превышающую его размеры, значительную роль будут играть гидростатические и динамические силы. Гидростатические силы определяются перепадами давления, связанными с размерами тела, а динамические – с взаимодействием жидкости с образовавшимся внутри тела газовым пузырем.

При однородной пористой структуре внутренний пузырь газа, практически независимо от глубины его расположения в теле, будет вытесняться жидкостью, при этом время вытеснения зависит от многих факторов.

В случае, если в пористой системе имеются тупиковые поры, часть газа будет оставаться в теле. Интересный случай может возникать, когда пористая структура внутри пропитываемого тела имеет некоторые сужения или участки поверхности с другими смачиваемыми свойствами, тогда возникают условия для проявления гистерезиса смачивания. Он может приводить к тому, что газовый пузырь будет оставаться в некоторой зоне сколь угодно долго, т.к. вязкоупругие свойства менисков позволяют ему подстраиваться под локальные усилия тем самым, демпфируя возмущения, возникающие в теле. Гистерезисные эффекты смачивания [1] связаны со многими факторами и параметрами, как самой поверхности, так и пропитывающей жидкости. Одним из важнейших параметров является шероховатость, которая влияет на взаимодействие жидкости с твердой стенкой, а также поверхностные силы, зависящие от состояния поверхности [1, 2]. Важное значение имеют вязкоупругие силы, действующие в непосредственной близости к мениску и определяющие, как статические [3], так и динамические углы смачивания [2, 4].

В дисперсных и пористых средах трудность рассмотрения движения фронта жидкости усугубляется неизвестностью самой поровой структуры, вследствие чего в [5] отмечается практическая невозможность математического моделирования поведения жидкости в конкретных условиях. Однако, математическое моделирование полезно тем, что раскрывает общие физические положения, которые лежат в основе пропитки и обезвоживания дисперсных материалов. Одним из модельных элементов порового пространства принято считать капилляр, с помощью которого можно сравнительно простыми средствами определять необходимые физические условия поведения менисков жидкости. В зависимости от условий и сложности задач в качестве элементов порового пространства используют различные модели капилляров [6], для моделирования однородного порового пространства прямой капилляр представляет простую и удачную модель для исследования капиллярных явлений в дисперсно-пористых средах.

Если действительно пористая система в образце близка к однородной, то ее можно заменить системой одинаковых капилляров с эквивалентным радиусом и построить математическую модель для одного капилляра. Учитывая, что в начальный момент давление в капилляре атмосферное, а затем при мгновенном опускании в воду на его концах оно резко поднимается, жидкость должна быстро устремляться вовнутрь капилляра как сверху, так и снизу, сжимая запертый газовый пузырь. Для широких капилляров это должно приводить к колебаниям газового пузыря, для очень узких капилляров колебания могут не возникать, т.к. они будут поглощаться вязкими силами.

В нашей постановке будем рассматривать случай однородной поровой системы, которая, в принципе, может быть в относительно большом куске породы. В этом случае, образовавшийся пузырь газа через какое-то время должен быть вытеснен жидкостью.

Расчетная модель. Согласно схеме, приведенной на рис. 1, выпишем уравнение движения верхнего (индекс 1) и нижнего (индекс 2) менисков [7]:

$$\rho h_1 \frac{\partial^2 h_1}{\partial t^2} - \rho g h_1 + k \rho h_1 \frac{\partial h_1}{\partial t} = p_1 - p_P + \frac{2\sigma}{r_c} \cos \theta_1, \quad (1)$$

$$\rho h_2 \frac{\partial^2 h_2}{\partial t^2} + \rho g h_2 + k \rho h_2 \frac{\partial h_2}{\partial t} = p_2 - p_P + \frac{2\sigma}{r_c} \cos \theta_2, \quad (2)$$

где t – время; h – высота столба жидкости в капилляре; ρ – плотность жидкости; $k = 8\nu/r_c^2$; ν – кинематический коэффициент вязкости; σ – коэффициент поверхностного натяжения; θ_1, θ_2 – углы смачивания, соответственно для верхнего и нижнего мениска; r_c – радиус капилляра; p_1, p_2, p_P – давление, соответственно в точках 1, 2 и в газовом пузыре.

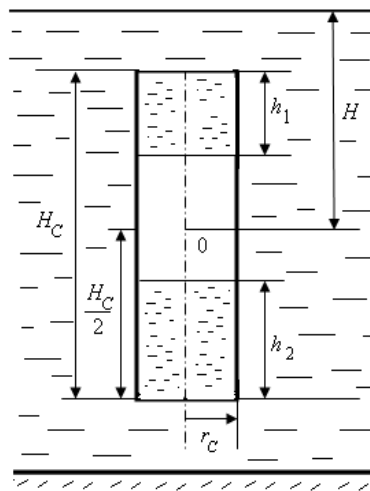


Рисунок 1 – Расчетная схема процесса и используемые условные обозначения

Углы смачивания для наступающего и отступающего мениска могут сильно отличаться друг от друга, однако, для упрощения модели рассмотрим случай, когда они равны, т. е. $\theta_1 = \theta_2 = \theta$. Введем безразмерные величины $\tau = t/T$ (T – масштаб времени), $\bar{h}_j = h_j/H_c$ и перепишем уравнения (1), (2), отбросив первые члены этих уравнений (нестационарные члены для очень узких капилляров малы), в виде:

$$\rho \chi \bar{h}_1 \frac{\partial \bar{h}_1}{\partial \tau} - \rho g H_c \bar{h}_1 = p_1 - p_P + \frac{2\sigma}{r_c} \cos \theta, \quad (3)$$

$$\rho \chi \bar{h}_2 \frac{\partial \bar{h}_2}{\partial \tau} + \rho g H_c \bar{h}_2 = p_2 - p_P + \frac{2\sigma}{r_c} \cos \theta. \quad (4)$$

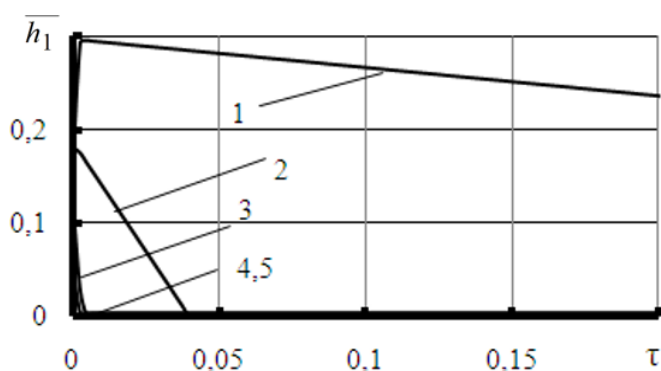
В этих уравнениях $p_1 = p_a + \rho g(H - H_c/2)$, $p_2 = p_a + \rho g(H + H_c/2)$, где p_a – атмосферное давление; $\chi = 8 \frac{\nu H_c^2}{T r_c^2}$.

Давление в газовом пузырьке, считая процесс изотермическим, можно представить, как

$$p_P = \frac{p_a}{[1 - (\overline{h_1} + \overline{h_2})]} \quad (5)$$

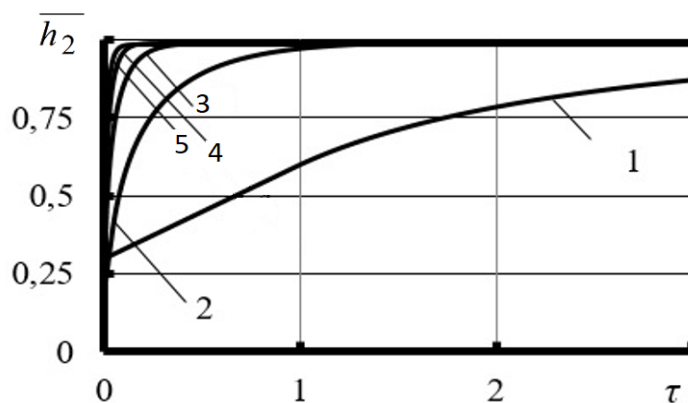
Выражение (5) следует из закона сохранения массы газа в капиллярном канале. В качестве начальных условий можно принять, что при $\tau = 0$, $h_1 = h_{10}$ и $h_2 = h_{20}$ (в расчетах эти величины были приняты равными $h_{10}/H_c = h_{20}/H_c = 0,001$).

На рис. 2 и рис. 3 показаны кривые $\overline{h_1}$ и $\overline{h_2}$ в зависимости от времени при различных значениях радиусов капилляра: $r_c = 10^{-6}$ м, $2,5 \cdot 10^{-6}$ м, $5 \cdot 10^{-6}$ м, $7,5 \cdot 10^{-6}$ м, $1 \cdot 10^{-5}$ м.



Кривая 1 – $r_c = 10^{-6}$ м, 2 – $r_c = 2,5 \cdot 10^{-6}$ м, 3 – $5 \cdot 10^{-6}$ м, 4 – $7,5 \cdot 10^{-6}$ м, 5 – 10^{-5} м

Рисунок 2 – Изменение высоты $\overline{h_1}$ в зависимости от времени



Кривая 1 – $r_c = 10^{-6}$ м, 2 – $r_c = 2,5 \cdot 10^{-6}$ м, 3 – $5 \cdot 10^{-6}$ м, 4 – $7,5 \cdot 10^{-6}$ м, 5 – 10^{-5} м.

Рисунок 3 – Изменение высоты $\overline{h_2}$ в зависимости от времени

Как видно из приведенных рисунков в начальный момент столбики жидкости в капилляре растут. Когда давление в газовом пузырьке становится больше $p_P > p_1 + \frac{2\sigma}{r_c} \cos\theta$, правая часть уравнения (3) становится

отрицательной и верхний мениск начнет двигаться в обратную сторону, т.е. вверх, при этом величина h_1 будет уменьшаться, что и видно на рис. 1 (время роста h_1 для кривых 3 – 5 очень мало, поэтому на рис. 2 эти части кривых почти не видны). Когда первый столбик становится меньше начального значения, в модели принимается, что давление в пузырьке постоянно. Этим условием учитывается выход газа из капилляра. Конечно, в реальном случае газ выходит в виде маленьких пузырьков, при этом газ в капилляре должен находиться в колебательном движении (несколько сжиматься и расширяться). В решении пренебрегается этими колебаниями, но учитывается, что при выходе газа давление должно быть близким к той величине, которая привела мениск к верхней границе тела. Из рисунков следует, что значительно большая часть времени при пропитке капилляра уходит на вытеснение газового пузыря. Это обстоятельство дает возможность сравнить теоретические зависимости с экспериментальными величинами. Но для удобства сопоставления сначала получим аналитическое выражения для h_2 . Приняв постоянство давления в пузыре, найдем его из уравнения (3), положив $h_1 = 0$, тогда из уравнения (4) прямым интегрированием можно получить следующую формулу:

$$\bar{h}_2 = \frac{a}{b} - \frac{a - b\bar{h}_{20}}{b} \exp\left\{-\frac{b}{a}\left[(\bar{h}_2 - \bar{h}_{20}) + b(\tau - \tau_0)\right]\right\}, \quad (6)$$

где $a = \frac{p_2 - p_1}{\rho\chi}$, $b = \frac{gH_c T}{\chi}$. Учитывая соотношения для p_1 и p_2 , а также

принимая во внимание, что при равномерном расположении влагопроводящих каналов в пропитываемом образце такой капиллярный канал моделирует влагопотребление, выражение (6) можно переписать в несколько другом виде, т.е. (положив $w = h/H_c$, где w – водонасыщение)

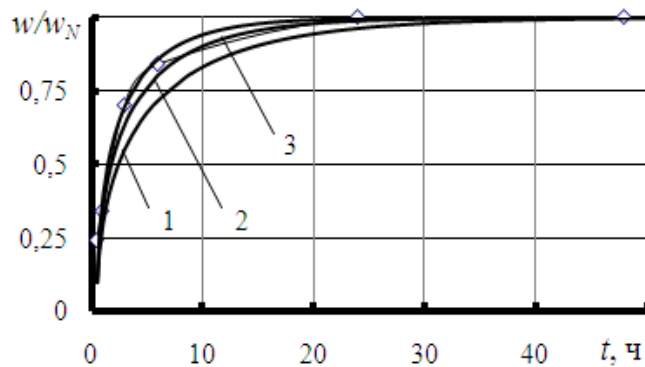
$$w = 1 - (1 - w_0) \exp\left\{-\left[(w - w_0) + b(\tau - \tau_0)\right]\right\}, \quad (7)$$

или

$$w = 1 - (1 - w_0) \exp\left\{-\left[(w - w_0) + b/T(t - t_0)\right]\right\}, \quad (8)$$

где в качестве масштаба времени можно взять $T = 1$ час. Из формулы (8) видно, что при некотором значении $t = t_0$ $w = w_0$, а при $t \rightarrow \infty$ $w \rightarrow 1$. Здесь t_0 и w_0 уже не начальные условия, а некоторые характерные величины, соответствующие стадии процесса с $h_1 = 0$. Теперь эту формулу можно сравнивать с экспериментальной кривой, например для большого куска базальта. Как указывалось выше, это условие необходимо, чтобы считать, что поровая структура куска однородна, тогда размеры рассматриваемого капиллярного канала принимают как бы осредненные эффективные значения экспериментального образца. На рис. 4 приведена экспериментальная кривая зависимости водонасыщения (w/w_N) куска базальта [8] от времени (w_N предельная величина водонасыщения). Коэффициент b в формуле (8) можно

определить методом наименьших квадратов, аппроксимируя экспериментальную кривую этим выражением. В данном случае, учитывая, что у нас только одна экспериментальная кривая, показано несколько расчетных кривых по формуле (8) для нескольких значений b . Из рис. 4 видно, что при $b = 0,1$ теоретическая кривая идет несколько ниже во всем интервале времени. Для значений $b = 0,15$ и $0,2$ теоретические кривые ближе к экспериментальной. Дальнейшее уточнение этого параметра возможно при наличии необходимого количества экспериментальных данных, но из приведенного рисунка уже видно, что решение (8) вполне отражает процесс вытеснения газового пузыря из образца базальта при пропитке. Из определения коэффициента b следует, что, например, для образца с $H_c = 0,1$ м при $b = 0,2$ эффективный радиус капиллярного канала $r_c = 2,11 \cdot 10^{-6}$ м.



Кривая 1 – $b = 0,1$, 2 – $b = 0,15$, 3 – $b = 0,2$.

Тонкая линия с маркерами – эксперимент [8]

Рисунок 4 – Кривые пропитки. Сравнение с экспериментом

Определив эффективный радиус капилляра, найдем количество таких каналов в образце радиусом поперечного сечения, например, для $R_c = 0,06$ м. В этом случае влажность такого куска при полном насыщении будет равна

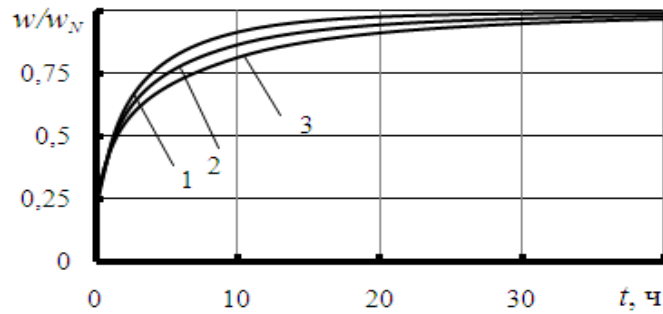
$$w_N = \frac{\rho}{\rho_{OB}} N \left(\frac{r_c}{R_c} \right)^2, \quad (9)$$

откуда принимая, что $w_N = 0,5 \cdot 10^{-2}$ $\rho_{OB} / \rho = 2,5$, будем иметь $N = 1,02 \cdot 10^7$.

Приведенные оценки показывают, какое количество каналов и, примерно, какие их размеры могут быть в куске базальта. Одним из интересных вопросов в исследовании структуры поровых каналов является их распределение по радиусу и, соответственно, их долевое распределение в перколяционной системе, т.е. участие в проводимости жидкости. Ответить на этот вопрос не представляется возможным, но можно хотя бы очень приближенно промоделировать влияние различных каналов на общую влагонасыщенность. Будем считать, что образец с поперечным радиусом $R_{CH} = 0,06$ м и высотой

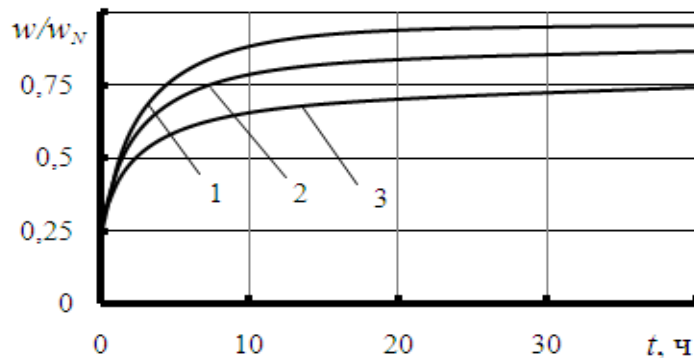
$H_c = 0,1$ м имеет $N = 10^7$ вертикальных внутренних каналов не связанных друг с другом, из которых n_1 каналов имеют радиус $1 \cdot 10^{-6}$ м, n_2 – радиус $2 \cdot 10^{-6}$ м и n_3 – радиус $4 \cdot 10^{-6}$ м, при этом общая насыщенность образца составляет $w_N = 0,005$. Величину n_2 будем задавать, например: $(0,9, 0,7, 0,5) 10^7$.

Для этого распределения радиусов на рис. 5 показаны кривые водонасыщения от времени. Такие же кривые показаны на рис. 6 для случая, когда n_1 каналов имеют радиус $0,5 \cdot 10^{-6}$ м, а n_3 каналов – радиус $8,10^{-6}$ м.



Кривая 1 – $n_2 = 0,9 \cdot 10^7$, 2 – $n_2 = 0,7 \cdot 10^7$, 3 – $n_2 = 0,5 \cdot 10^7$

Рисунок 5 – Кривые пропитки для первого варианта набора радиусов



Кривая 1 – $n_2 = 0,9 \cdot 10^7$, 2 – $n_2 = 0,7 \cdot 10^7$, 3 – $n_2 = 0,5 \cdot 10^7$

Рисунок 6 – Кривые пропитки для второго варианта набора радиусов

Количество каналов первого и третьего радиуса в данном случае определялось при задании n_2 из условия для количества каналов

$$n_1 + n_2 + n_3 = N, \quad (10)$$

и формулы для величины насыщенности w_N

$$w_N = \frac{\rho}{\rho_{OB}} \left\{ N \left(\frac{r_1}{R_{CH}} \right)^2 + n_2 \left[\left(\frac{r_2}{R_{CH}} \right)^2 - \left(\frac{r_1}{R_{CH}} \right)^2 \right] + n_3 \left[\left(\frac{r_3}{R_{CH}} \right)^2 - \left(\frac{r_1}{R_{CH}} \right)^2 \right] \right\}. \quad (11)$$

Для первого и второго вариантов набора радиусов величины n_1 и n_3 представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Значения n_1 и n_3

вариант 1			вариант 2		
n_2	n_3	n_1	n_2	n_3	n_1
$9,00 \cdot 10^6$	533333,3	466666,7	$9,00 \cdot 10^6$	137254,9	862745,1
$7,00 \cdot 10^6$	933333,3	2066667	$7,00 \cdot 10^6$	254902	2745098
$5,00 \cdot 10^6$	1333333	3666667	$5,00 \cdot 10^6$	372549	4627451

Из рисунков 5 и 6 следует, что для первого варианта набора радиусов время насыщения куска базальта близко к экспериментальному (см. рис. 4), хотя при сравнительно небольшом n_2 , т.е. при $0,5 \cdot 10^7$ кривая идет довольно низко. Для второго варианта распределений кривые сильно расходятся друг с другом. Их общее время пропитки сильно затянуто и оно, практически, заметно отличается от экспериментального, т.е. такое распределение явно не соответствует тому реальному образцу, для которого получена кривая 1 на рис. 4. Из табличек видно, что во втором случае количество широких капилляров значительно меньше, чем в первом, а время заполнения узких капилляров, согласно рис. 3 значительно больше, чем широкого, вследствие этого общее время заполнения такой системы сильно затягивается.

В принципе, для не связанных каналов, используя определенный статистический закон распределения, можно построить кривую водопоглощения испытуемым образцом. Принимая, например, в дискретном варианте, что $n_j / N_{CH} = a (r_j / r_0) \exp [-\gamma (r_j / r_0)^2]$ и учитывая, что $\sum_{j=1}^k n_j / N_{CH} = 1$

(это условие служит для связи коэффициентов a и γ), можно провести расчет для соответствующих капилляров с радиусами r_j , а затем подбирать r_0 таким образом, чтобы получить необходимую величину водонасыщения. Для связанных каналов ситуация несколько сложнее. Во-первых, в расчет необходимо вводить еще одну неизвестную величину - дополнительный объем газа, который связывает все каналы образца. Во-вторых, необходимо представить такую конструкцию сообщающихся каналов. Такие расчеты можно проводить, но при этом необходимо иметь достаточно большой объем экспериментальных данных.

Выводы. На основе экспериментальных исследований [8] построена математическая модель, в которой принято, что вытеснение газового пузыря из дисперсно-пористого тела при опускании его в жидкость проходит при постоянном давлении. Проведенные численные расчеты по этой модели, а также полученные аналитические выражения показывают справедливость такого утверждения. Далее расчеты показали, что процесс водонасыщения в значительной степени зависит от статистического распределения поровых

каналов по их внутренним радиусам, т.е. от структуры порового пространства. Это, в свою очередь, указывает на зависимость закономерности пропитки небольших образцов от их масс, т.к. поровые структуры тел небольших размеров могут сильно отличаться друг от друга, что и было показано в [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сумм, Б. Д. Гистерезис смачивания / Б. Д. Сумм // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – № 7. – С. 98–102.
2. Чураев, Н. В. Физикохимия процессов массопереноса в пористых телах / Н. В. Чураев. – М.: Химия, 1990. – 272 с.
3. Волков, В. И. Экспериментальное исследование гистерезиса смачивания / В. И. Волков, С. С. Лескова, Е. Р. Кирколуп // Известия Алтайского гос. ун-та. – Барнаул, 2006. – Вып. 49. – № 1. – С. 106–110.
4. Kralchevsky P. A. Particles at Fluids Interfaces and membranes. Attachment of Colloid Particles and Proteins to Interfaces and Formation of Two-Dimensional Arrays / P. A. Kralchevsky, K. Nagayama. – Amsterdam – Tokyo. Elsevier, 2001. – 654 с.
5. Димов, С. В. Гидродинамика капиллярных течений в пористой среде: дис...д-ра физ-мат. наук: 01.02.05, защищена 23.06.2004 / С.В. Димов. – Новосибирск: ИТФ СО РАН, 2004. – 114 с.
6. Ентов, В. М. Микромеханика течений в пористых средах / В. М. Ентов // Механика жидкости и газа – 1992. – № 6. – С. 90–102.
7. Капиллярные эффекты в динамических процессах обезвоживания измельченной горной массы / А. Ф. Булаг, В. П. Надутый, В. И. Елисеев, В. И. Луценко. – Днепр: Пороги, 2017. – 278 с.
8. Надутый, В. П. Экспериментальное определение зависимости водонасыщения измельченной горной массы от размеров кусков / В. П. Надутый, В. И. Елисеев, В. И. Луценко, С. В. Костыря // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 23 (1245). – С. 36–40. – doi:10.20998/2413-4295.2017.23.06.

REFERENCES

1. Summ, B. D. (1999), “Wetting Gisteresis”, *Sorosovskiy obrazovatelnyy Journal*, no. 7, pp. 98–102.
2. Churaev, N. V. (1990), *Fizikokhimiya protsessov massoperenosa v poristyykh telakh* [Physicochemistry of mass transfer processes in porous bodies], Khimiya, Moscow, Pussia.
3. Summ, B. D. and Goryunov, Yu. V. (1976), *Fiziko-khimicheskie osnovy smachivaniya i rastekaniya* [Physico-chemical basis of wetting and spreading], Khimiya, Moscow, Russia.
4. Kralchevsky, P. A. and Nagayama, K. (2001), «Particles at Fluids Interfaces and membranes. Attachment of Colloid Particles and Proteins to Interfaces and Formation of Two-Dimensional Arrays», Elsevier, Amsterdam – Tokyo.
5. De Gennes, P.G. (1987), “Wetting: Statics and dynamics”, *Uspekhi fizicheskikh nauk*, vol. 151, issue 4, pp. 619–681.
6. Dimov, S. V. (2004), “Hydrodynamics of capillary flows in a porous medium”, Ph.D. Thesis, Mechanics of fluid, gas and plasma, S. S. Kutateladze Institute of Thermophysics, Novosibirsk, Russia.
7. Entov, V. M. (1992), “Micromechanics of flows in porous media”, *Mekhanika zhidkosti i gaza*, no. 6, pp. 90–102.
8. Bulat A. F., Naduty, V. P., Yeliseyev, V. I. and Lutsenko, V. I. (2017), *Kapillyarnye efekty v dinamicheskikh protsessakh obezvozhivaniya izmelchennoy gornoj massy* [Capillary effects in the dynamic processes of dehydration of crushed mined rock], Porogi, Dnepr, Ukraine.
9. Naduty, V. P., Yeliseyev, V. I., Lutsenko, V. I. and Kostyrya, S. V. (2017), “Experimental determination of the dependence of the water sediment of the milled mount mass from the sizes of pieces”, *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: New solutions in modern technologies*, no. 23(1245), pp. 36–40. – doi:10.20998/2413-4295.2017.23.06.

Об авторах

Елисеев Владимир Иванович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела проблем шахтных энергетических комплексов, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ им. Н.С. Полякова НАНУ), Днепр, Украина.

Луценко Василий Иванович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Бстарший научный сотрудник отдела проблем шахтных энергетических комплексов, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ им. Н.С. Полякова НАНУ), Днепр, Украина, lvi151156@gmail.com

About the authors

Yeliseyev Vladimir Ivanovich, Candidate of Physics and Mathematics Sciences (Phys.-Mat.), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Mine Energy Complexes, N. S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (N. S. Polyakov IGTM NASU), Dnepr, Ukraine.

Lutsenko Vasiliy Ivanovich Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Mine Energy Complexes, N. S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (N. S. Polyakov IGTM NASU), Dnepr, Ukraine. lvi151156@gmail.com

Анотація. У наближеній постановці розглянуто задачу просочення тіла з однорідною пористою структурою. У зв'язку з неможливістю моделювання реального процесу завдання зводиться до теоретичного аналізу витіснення газового пузиря з одиночного капіляра, зануреного в рідину. Показано, що досліджуваний процес, в основному, складається з двох етапів: стиснення пузиря і його витіснення. Показано, що досліджуваний процес, в основному, складається з двох етапів: стиснення пузиря і його витіснення з капіляра. При цьому, час витіснення є переважаючим. У припущенні сталості тиску в пупирі, отримано аналітичний вираз для визначення зміни у часі висоти рівня рідини, що витісняє газовий пупир. Проведено порівняння теоретичних результатів з отриманої раніше експериментальної залежності насичення водою зразків з базальту, яке показало задовільний якісний збіг. Для більш точного теоретичного опису процесу просочення необхідно враховувати структурні характеристики зразків які просочуються.

Ключові слова: просочення, газовий пупир, рідина, меніск, кут змочування, капіляр

Abstract. Problem of impregnating a body with a homogeneous porous structure is considered in a simplified formulation. Since real process of the gas bubble displacement from a single capillary, which is immersed into liquid, cannot be modeled, the problem was analyzed theoretically. It is shown that, basically, the process under the study consists of two stages: compression of the bubble and its displacement from the capillary. In this case, the displacement duration was predominant. Basing on the assumption that pressure in the bubble was constant, an analytical expression was obtained that determines, within the domain of time, change of the height of the liquid level that displaces the gas bubble. Theoretical results were compared with obtained earlier experimental dependence of the basalt sample saturation with water, and the comparison showed satisfactory qualitative coincidence. In order to obtain more accurate theoretical description of the impregnation process, it is necessary to take into account structural characteristics of the samples to be impregnated.

Keywords: impregnation, gas bubble, liquid, meniscus, angle of wetting, capillary.

Статья поступила в редакцию 18.06. 2017

Рекомендовано к печати чл. – корр. НАН Украины А.И. Волошиным