

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 НАН Украины)

### **ВЛИЯНИЕ УГЛА СМАЧИВАНИЯ НА НАЧАЛЬНУЮ СТАДИЮ ПРОПИТКИ ТЕЛА С ОДНОРОДНОЙ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРОЙ**

**Єлісеєв В. І.**, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співр.,  
**Луценко В. І.**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.  
(ІГТМ НАН України)

### **ВПЛИВ КУТА ЗМОЧУВАННЯ НА ПОЧАТКОВУ СТАДІЮ ПРОСОЧЕННЯ ТІЛА З ОДНОРІДНОЮ ПОРИСТОГО СТРУКТУРОЮ**

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

### **HOW WETTING ANGLE INFLUENCES ON THE PRIMARY STAGE OF SATURATION OF BODY WITH HOMOGENEOUS POROUS STRUCTURE**

**Аннотация.** Рассмотрена приближенная модель расчета начальной стадии процесса вытеснения газового пузыря из пористого тела однородной структуры при его погружении в жидкость. В модели не учитывается сопротивление при входе жидкости в поры. Проведенные расчеты показывают, что в начальной стадии возникают колебания газового пузыря, которые быстро затухают. В однородном поровом пространстве при постоянном угле смачивания вся поверхность пузыря в целом находится в неравновесном состоянии, за исключением локального участка его поверхности, что является источником возмущений, в результате которых поверхность пузыря искривляется и перемещается. Это приводит к вытеснению пузыря. Наличие гистерезиса смачивания дает дополнительную степень свободы элементам поверхности раздела фаз. Однако в однородном поровом пространстве, согласно расчетам, это не приводит к качественным изменениям картины вытеснения. Из расчетов следует, что в случае однородной пористой структуры с примерно одинаковыми условиями смачивания газовый пузырь должен выталкиваться из глубин пористого тела, при этом для повышения эффективности пропитки целесообразно вести процесс таким образом, чтобы фронт жидкости двигался с какой-то одной стороны.

**Ключевые слова:** пористое тело, пропитка, капиллярные силы, гистерезис, смачивание, газовый пузырь.

**Введение.** При помещении пористого тела в жидкость, она, под действием силы тяжести и капиллярных сил, будет проникать вглубь тела, вследствие чего внутри него образуется газовый пузырь. По мере продвижения фронта жидкости пузырь будет сжиматься, в результате, при этом давление в нем будет увеличиваться. В зависимости от капиллярных свойств жидкости и структуры пористого объема возможны различные варианты динамики межфазной поверхности.

Для плохо смачиваемых тел (для углов смачивания близких к 90 градусам)

при относительно простой однородной структуре пористого пространства, например, для сыпучих слоев частиц, близких к шарообразной форме, картина наиболее проста.

В этом случае жидкость, практически без капиллярного взаимодействия с телом, вытесняет пузырь, и его поведение слабо отличается от поведения обычных пузырей в воде. Под действием силы Архимеда он должен подниматься вверх, при этом сравнительно большие вязкие силы будут тормозить динамику подъема, и демпфировать волнообразный характер изменения фазовой поверхности.

Более сложная картина возникает при хорошем смачивании жидкости. Сложность здесь возникает вследствие того, что углы смачивания могут меняться в зависимости от различных факторов, вызывающих гистерезис смачивания. При этом практически по всей поверхности, за исключением отдельных локальных участков, будет иметь место неравновесность, в результате чего пузырь должен деформироваться. Эта деформация должна приводить: во-первых, к движению межфазной поверхности; во-вторых, к перераспределению сил, в результате чего локальные зоны равновесия или квазиравновесия будут перемещаться по поверхности. Все это, в конечном итоге, должно приводить к всплытию пузыря.

При наличии гистерезиса смачивания, угол смачивания изменяется в зависимости от нагрузок, оказываемых на мениск по обе стороны межфазной поверхности. В статическом положении мениск представляет собой ячейку Фойгта [1, 2], т.е. он обладает упругими свойствами. Это хорошо показано в экспериментах [3], из которых следует, что движение мениска начинается после того, как углы смачивания достигают определенных предельных величин (углы натекания и оттеkania).

Гистерезис смачивания вносит ряд особенностей в процесс вытеснения газового пузыря из пористого тела. Примем, что мениск при деформации остается сферическим и капиллярные силы уравнивают перепад давления по обе его стороны, т.е. выполняется известный классический закон [4]

$$\Delta p = p_p - p_G = 2 \cos \theta \frac{\sigma}{r_c}, \quad (1)$$

где  $p_p$ ,  $p_G$  – давление соответственно в пузыре и в жидкости;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $r_c$  – радиус капилляра;  $\theta$  – угол смачивания.

Если теперь принять, что эквивалентный радиус порового канала пористого тела соответствует данным [3], то можно приблизительно получить радиус пузыря, который может оставаться в пористом теле. В условиях гидростатики, используя выражение (1) для верхней и нижней точек пузыря, будем иметь следующие соотношения

$$p_P - [\rho g(H - R_P)] = 2 \cos \theta_O \frac{\sigma}{r_C}, \quad (2)$$

$$p_P - [\rho g(H + R_P)] = 2 \cos \theta_N \frac{\sigma}{r_C},$$

где  $\theta_O$ ,  $\theta_N$  – углы оттекания и натекания. Вычитая одно выражение (2) из другого, получим

$$R_P = (\cos \theta_O - \cos \theta_N) \frac{\sigma}{r_C}. \quad (3)$$

Это выражение относится к статическому положению, при этом пористая структура принимается сравнительно простой и ее можно представить в виде капиллярных каналов. В реальных же процессах межфазовый фронт имеет скорость, вследствие чего положение таких пузырей может быть неустойчивым. Необходимо также отметить, что для природных пористых тел, каковыми, например, являются куски углей, пористая структура чрезвычайно сложна, вследствие чего представление ее в виде каналов усложняется целым набором эквивалентных радиусов. Кроме того, эта структура неізотропна и имеет целый ряд тупиковых каналов. Некоторые характерные свойства газожидкостных сред, по крайней мере, качественно освещены в литературе, например [5]. Учесть все особенности реальной поровой системы не представляется возможным [6], однако модели, основанные на представлении пор в виде капиллярных каналов, актуальны и в настоящее время.

**Постановка задачи.** Представим пропитываемое пористое тело в виде цилиндра, помещенного в жидкость на некоторую глубину  $H$  (рис. 1) и составим для конкретной геометрической области следующую математическую модель.

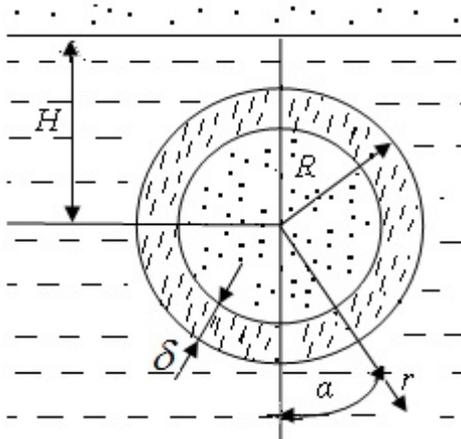
Выпишем основные уравнения движения в пористых средах

$$\rho \frac{\partial(\varepsilon v)}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial r} - K\mu(\varepsilon v) + \rho g \cos \alpha, \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial(\varepsilon w)}{\partial t} = -\frac{\partial p}{r \partial \alpha} - K\mu(\varepsilon w) - \rho g \sin \alpha, \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon v)}{\partial r} + \frac{\partial(\varepsilon w)}{\partial \alpha} = 0; \quad (6)$$

где  $t$  – время;  $r$ ,  $\alpha$  – полярная система координат;  $v$ ,  $w$  – проекции скоростей, соответствующие  $r$  и  $\alpha$ ;  $\varepsilon$  – пористость;  $K$  – коэффициент;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости.



$H$  – расстояние от центра пористой частицы до свободной поверхности жидкости,  $\delta$  – толщина слоя жидкости впитавшегося в частицу,  $R$  – радиус частицы,  $r, \alpha$  – полярная система координат

Рисунок 1 – Схема вытеснения газа при погружении пористого тела в жидкость

С использованием уравнения (6) выписанную систему можно привести к уравнению

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{\partial p}{r \partial r} + \frac{\partial^2 p}{r^2 \partial \alpha^2} = 0. \quad (7)$$

Введем безразмерную переменную  $n = \frac{1 - (r/R)}{h}$ . Здесь  $h = \delta/R$ , тогда

$$\frac{r}{R} = 1 - hn; \quad \frac{\partial}{\partial r} = -\frac{1}{Rh} \frac{\partial}{\partial n};$$

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} = \left( \frac{1}{Rh} \right)^2 \frac{\partial^2}{\partial n^2}; \quad \frac{\partial}{\partial \alpha} = \frac{\partial}{\partial \alpha} - \frac{h'}{h} n \frac{\partial}{\partial n};$$

$$\frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} = \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} + \left( 2 \frac{h'^2}{h^2} - \frac{h''}{h} \right) n \frac{\partial}{\partial n} - 2 \frac{h'}{h} n \frac{\partial^2}{\partial \alpha \partial n} + \frac{h'^2}{h^2} n^2 \frac{\partial^2}{\partial n^2}; \quad \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} - \frac{h^{\bullet}}{h} n \frac{\partial}{\partial n};$$

где  $h^{\bullet}$  – производная по времени, а  $h'$  – производная по углу  $\alpha$ .

Представим теперь решение для давления в виде суммы  $p = p_0 + p_1$ , где  $p_0$  удовлетворяет уравнению

$$\frac{\partial^2 p_0}{h^2 \partial n^2} - \frac{1}{1 - hn} \frac{\partial p_0}{h \partial n} = 0, \quad (8)$$

а, соответственно,  $p_1$  уравнению

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 p_1}{h^2 \partial n^2} - \frac{1}{1 - hn} \frac{\partial p_1}{h \partial n} + \frac{1}{(1 - hn)^2} \left[ \frac{\partial^2 p_1}{\partial \alpha^2} + \left( 2 \frac{h'^2}{h^2} - \frac{h''}{h} \right) n \frac{\partial p_1}{\partial n} - 2 \frac{h'}{h} n \frac{\partial^2 p_1}{\partial \alpha \partial n} + \frac{h'^2}{h^2} n^2 \frac{\partial^2 p_1}{\partial n^2} \right] = \\ & = -\frac{1}{(1 - hn)^2} \left[ \frac{\partial^2 p_0}{\partial \alpha^2} + \left( 2 \frac{h'^2}{h^2} - \frac{h''}{h} \right) n \frac{\partial p_0}{\partial n} - 2 \frac{h'}{h} n \frac{\partial^2 p_0}{\partial \alpha \partial n} + \frac{h'^2}{h^2} n^2 \frac{\partial^2 p_0}{\partial n^2} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

Далее, заменив  $u = -v$  (положительным направлением будем считать движение фронта во внутрь тела), перепишем (4 – 6) в виде

$$\rho \left( \frac{\partial(\varepsilon u)}{\partial t} - \frac{h^{\bullet}}{h} n \frac{\partial(\varepsilon u)}{\partial n} \right) = - \frac{1}{Rh} \frac{\partial p}{\partial n} - K\mu(\varepsilon u) - \rho g \cos \alpha, \quad (10)$$

$$\rho \left( \frac{\partial(\varepsilon w)}{\partial t} - \frac{h^{\bullet}}{h} n \frac{\partial(\varepsilon w)}{\partial n} \right) = - \frac{1}{R(1-hn)} \left( \frac{\partial p}{\partial \alpha} - \frac{h'}{h} n \frac{\partial p}{\partial n} \right) - K\mu(\varepsilon w) - \rho g \sin \alpha, \quad (11)$$

$$\frac{\partial[(1-hn)\varepsilon u]}{h\partial n} + \frac{\partial(\varepsilon w)}{\partial \alpha} - \frac{h'}{h} n \frac{\partial(\varepsilon w)}{\partial n} = 0. \quad (12)$$

Граничными условиями являются следующие выражения. Если пренебречь сопротивлением, при входе жидкости в поры, то при  $n = 0$   $p_0 = p_R$  (давление на поверхности тела). На фазовой поверхности при  $n = 1$

$$u_h = Rh^{\bullet} + w_h \frac{h'}{(1-hn)}, \quad (13)$$

$$p_h - 2\mu \frac{\partial u_N}{\partial N} \Big|_h = p_p - 2 \frac{\sigma}{r_c} \cos \theta, \quad (14)$$

где  $\frac{\partial u}{\partial N} \Big|_h = \frac{1}{R} \left[ \frac{\partial u}{h\partial n} \cos^2 \beta - \left( \frac{\partial w}{h\partial n} + \frac{\partial u}{(1-h)\partial \alpha} \right) \sin \beta \cos \beta + \frac{\partial w}{(1-h)\partial \alpha} \sin^2 \beta \right]_{n=1}$ ,

$tg \beta = \frac{h'}{1-h}$ ,  $u_h$ ,  $w_h$  – компоненты скорости жидкости на межфазной границе;

$p_h$ ,  $p_p$  – давление в жидкости на межфазной границе и давление в пузыре соответственно,  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $\theta$  – угол смачивания,  $r_c$  – радиус порового канала. Здесь соотношение (13) является кинематическим уравнением, а (14) – динамическим условием равновесия на фазовой поверхности.

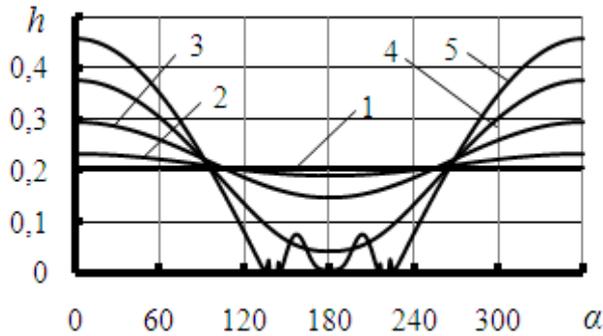
Рассмотрим теперь приближенное решение задачи. Примем, что величина  $h'$  в процессе движения фронта пропитки является малой величиной, тогда в уравнениях отбросим все члены, связанные с этим параметром. Решение задачи теперь значительно упрощается и сводится практически к уравнению (8), которое имеет аналитическое решение

$$p_0 = p_R - (p_R - p_h) \frac{\ln(1-hn)}{\ln(1-h)}. \quad (15)$$

Вследствие такого упрощения, количественные величины могут быть изменены, однако, физическая сущность остается, и по ней можно судить об основ-

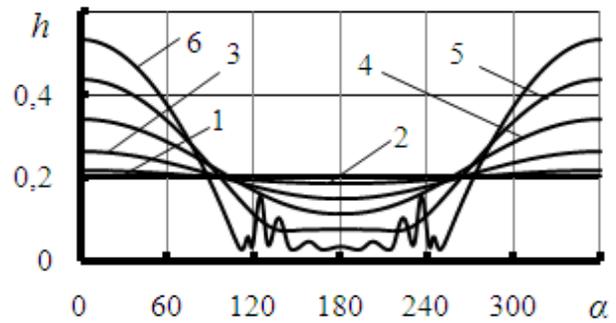
ных характерных особенностях процесса.

**Результаты расчетов.** На рис. 2 – 4 показаны кривые фазовых поверхностей для различных времен при постоянных углах смачивания. Это наиболее простой случай и для однородной пористой структуры он должен заканчиваться прорывом пузыря к поверхности пористого тела. Покажем несколько возможных вариантов для разных углов смачивания, при этом положим радиус порового канала равным  $r_c = 0,1$  мм, радиус частицы примем равным 25 мм.



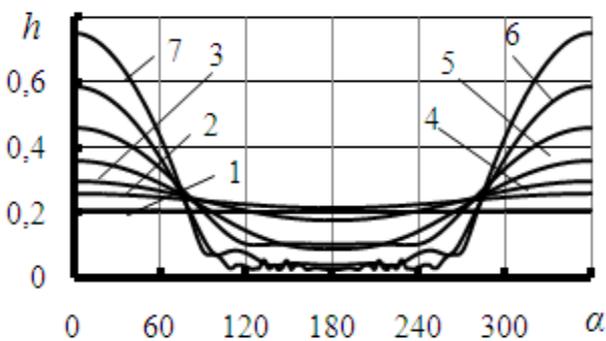
1 –  $t = 3,01 \cdot 10^{-4}$  с; 2 –  $2,37 \cdot 10^{-3}$  с;  
3 –  $4,65 \cdot 10^{-3}$  с; 4 –  $7,42 \cdot 10^{-3}$  с; 5 –  $9,70 \cdot 10^{-3}$  с

Рисунок 2 – Изменение фазовой границы в процессе пропитки.  $\theta = 135^\circ$



1 –  $t = 2,60 \cdot 10^{-4}$  с; 2 –  $2,04 \cdot 10^{-3}$  с;  
3 –  $4,05 \cdot 10^{-3}$  с; 4 –  $6,27 \cdot 10^{-3}$  с; 5 –  $9,43 \cdot 10^{-3}$  с;  
6 –  $1,29 \cdot 10^{-2}$  с

Рисунок 3 – Изменение фазовой границы в процессе пропитки.  $\theta = 90^\circ$



1 –  $t = 2,23 \cdot 10^{-4}$  с; 2 –  $2,61 \cdot 10^{-3}$  с;  
3 –  $4,47 \cdot 10^{-3}$  с; 4 –  $7,60 \cdot 10^{-3}$  с; 5 –  $1,15 \cdot 10^{-2}$  с;  
6 –  $1,78 \cdot 10^{-2}$  с; 7 –  $2,46 \cdot 10^{-2}$  с

Рисунок 4 – Изменение фазовой границы в процессе пропитки  $\theta = 0^\circ$

Угол смачивания  $\theta = 135^\circ$ . При таком угле смачивания, происходит отталкивание жидкости от поверхности, в результате чего жидкость испытывает дополнительные силы сопротивления при продвижении фронта пропитки. Для того, чтобы продавить такое давление, необходима определенная глубина, при которой гидростатический перепад давления должен быть больше капиллярной силы, вследствие этого положим глубину погружения  $H = 0,4$  м. Для такой глубины капиллярная составляющая меньше

гидростатической силы, вследствие чего фазовая поверхность начнет двигаться, при этом, как показано на рис. 2, жидкость снизу начинает поджимать пузырь газа, который постепенно поднимается в пористом теле, пока верхняя часть фазовой поверхности не достигнет поверхности тела (кривая 5 определяет конец процесса в данной постановке).

Угол смачивания  $\theta = 90^\circ$ . Такое значение угла смачивания отключает капиллярные силы жидкости, и пузырь, практически, аналогичен пузырю в среде, как бы, со значительно большим вязким сопротивлением.

Из рис. 3 видно, что кривые фазовой поверхности аналогичны предыдущим. Некоторое отличие состоит в том, что нижний участок фронта пропитки более продвинут к середине пористого тела, при этом верхняя часть несколько более расширена. Кривая 6 показывает состояние пузыря перед прорывом, при этом верхний участок фазовой поверхности становится волнообразным. Это явление известно в литературе, оно приводит к образованию так называемых “пальцев” [5], локальных прорывов газа с образованием узких каналов. На рис. 2 это также видно по кривой 5, хотя в целом рассматриваемая математическая модель не описывает этого процесса.

Угол смачивания  $\theta = 0^\circ$ . При таком угле капиллярные силы имеют максимальное значение, вследствие чего должны оказывать значительное влияние на процесс пропитки и, соответственно, на вытеснение пузыря.

Такое воздействие, как следует из рис. 4, приводит к еще большему проникновению нижнего участка фронта вглубь тела и к большему расширению верхнего участка фазовой поверхности. Расширение зоны сопровождается образованием волн, сначала сравнительно плавных (кривая 6), а затем переходящих в коротковолновые структуры (кривая 7).

Угол с учетом гистерезиса смачивания. Как отмечалось выше, постоянный угол смачивания может обеспечить локальную устойчивость какого-то отдельного отрезка поверхности пузыря, однако соседние участки будут находиться в неравновесном состоянии. Это, в конечном итоге, приводит к общей неустойчивости межфазовой поверхности. В результате этого локальные движения элементов поверхности складываются в общее движение пузыря, которое интегрально приводит к его поднятию. В случае наличия гистерезиса смачивания для газового пузыря появляется степень свободы, которая может способствовать более тонкому поведению каждого его отрезка поверхности. В этом случае возникает порог, ниже которого возмущения либо демпфируются, либо просто гасятся. Понятие гистерезиса смачивания является многопараметрическим, его причины многообразны [7]. Не вдаваясь в точность и адекватность модели упругости мениска, упомянутой во введении, формально это можно представить в виде

$$\theta_{st} = \theta_0 + 0,5(\theta_N - \theta_o)P_M + 0,5(\theta_N + \theta_o - 2\theta_0)P_M^2, \quad (16)$$

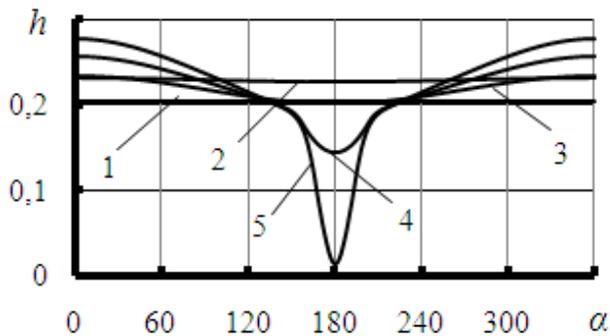
где  $P_M = \frac{k_P \Pi}{[1 + k_P |\Pi|]}$ ;  $\Pi = \frac{\sigma/r_C \cos \theta_0 - \Delta_M p}{\sigma/r_C}$ ;  $\Delta_M p$  – перепад давления на мениске;  $k_P$  – коэффициент, который был принят в расчетах равным 10. Из (16) следует, что при  $P_M = 0$  угол смачивания равен равновесному  $\theta_0$ . В предельных точках при больших перепадах давления на мениске, т.е. при  $P_M \approx \pm 1$ , углы

становятся равными, соответственно, углу натекания ( $\theta_N$ ) или оттекания ( $\theta_O$ ). Кроме этого, угол смачивания зависит от скорости движения мениска [8], при этом также вводятся предельные динамические углы натекания и оттекания. Также формально и в этом случае можно представить динамический угол смачивания в виде

$$\theta = \theta_{ST} + 0,5(\theta_N^D - \theta_O^D)U_M + 0,5(\theta_N^D + \theta_O^D - 2\theta_{ST})U_M^2, \quad (17)$$

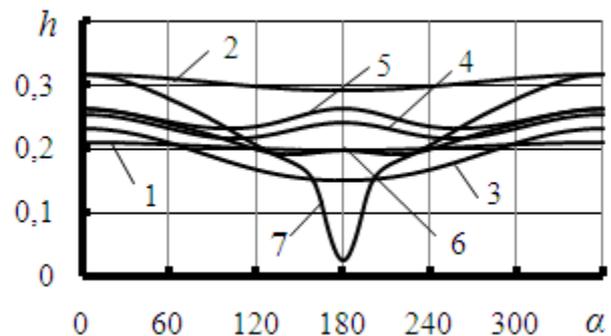
где  $\theta_N^D$ ,  $\theta_O^D$  – предельные динамические углы натекания и оттекания;  $U_M = \frac{k_U u}{[1 + k_U |u|]}$ ,  $k_U$  – коэффициент, принятый в расчетах равным 100.

Конечно, зависимости (16), (17) не могут отразить всю совокупность возможных проявлений гистерезиса смачивания, но дают возможность просмотреть влияние изменения угла на процесс выдавливания пузыря. На рис. 5 приведены результаты расчетов с учетом выписанных соотношений (16), (17) при этом принималось:  $\theta_0 = 45^\circ$ ;  $\theta_N = 66^\circ$ ;  $\theta_O = 12^\circ$ ;  $\theta_N^D = 90^\circ$ ;  $\theta_O^D = 0^\circ$ .



1 –  $t = 2,55 \cdot 10^{-4}$  с; 2 –  $8,01 \cdot 10^{-4}$  с;  
3 –  $2,51 \cdot 10^{-3}$  с; 4 –  $1,28 \cdot 10^{-2}$  с; 5 –  $2,53 \cdot 10^{-2}$  с

Рисунок 5 – Изменение фазовой границы в процессе пропитки с учетом гистерезиса угла смачивания



1 –  $t = 6,59 \cdot 10^{-4}$  с; 2 –  $1,11 \cdot 10^{-3}$  с;  
3 –  $2,23 \cdot 10^{-3}$  с; 4 –  $3,26 \cdot 10^{-3}$  с; 5 –  $4,31 \cdot 10^{-3}$  с;  
6 –  $6,83 \cdot 10^{-3}$  с; 7 –  $2,17 \cdot 10^{-2}$  с

Рисунок 6 – Изменение фазовой границы в процессе пропитки с учетом гистерезиса смачивания при наличии тупиковых пор

Из этого рисунка видно, что процесс вытеснения заметно отличается от случаев с постоянным углом смачивания. Здесь фазовая граница снизу не распространяется далеко вглубь, как на рис. 3, 4, а верхняя часть узким клином продвигается к границе пористого тела.

**Влияние тупиковых каналов.** В рассматриваемой модели, как было указано выше, структура пористой среды принималась однородной и хорошо проницаемой для жидкости. Это характерно для насыпных сред с относительно правильными шарообразными частицами с примерно одинаковыми диаметрами. Однако, во многих случаях, пористые каналы могут быть непроточными, в ре-

зультате чего жидкость, продвигаясь внутри тела, будет обходить тупиковые ячейки. Такой вариант пропитки вполне реален даже для хорошо проницаемых тел. Поэтому примем, что структура пористой среды по-прежнему однородна, но фазовый фронт не полностью вытесняет газ из поровых каналов, в результате чего в той части тела, в которой находится жидкость, пористость его будет несколько меньше, т. е.  $\varepsilon = \varepsilon_0 - \varepsilon_T$ , где  $\varepsilon_T = k_T \varepsilon_0$ ;  $k_T$  – коэффициент тупиковых пор, который примем равным 0,4.

Для описания фильтрации двухфазных сред широкое распространение получила теория Маскета – Леверетта [5], в которой учитывается движение двух сред. Здесь примем, что тупиковые ячейки, в которых остается газ, неподвижны. Картина вытеснения, показанная на рис. 6, несколько сложнее, ввиду более сильных колебаний пузыря, однако она близка к рис. 5. Здесь фазовая поверхность, несмотря на колебания, продвинулась глубже в пористую структуру, чем без тупиковых ячеек. Кроме того, образуется такой же клин вытесняющей жидкости, что и в предыдущем случае.

**Выводы.** Рассмотрена динамическая стадия процесса вытеснения газа, когда под действием гидродинамических и капиллярных сил происходит, как бы фронтальное наступление жидкости и продвижение газового объема в целом к границе пористого тела. Проведенные расчеты показывают, что в начальной стадии возникают колебания газового пузыря, которые в зависимости от сопротивления (коэффициент  $K$ ) быстро затухают. В однородном поровом пространстве при постоянном угле смачивания вся поверхность пузыря в целом находится в неравновесном состоянии, за исключением какого-то отрезка его поверхности. Такое состояние является источником возмущений, в результате которых поверхность пузыря должна искривляться и перемещаться, что интегрально должно приводить к его вытеснению.

Наличие гистерезиса смачивания дает дополнительную степень свободы элементам поверхности пузыря. В этом случае появляется возможность сглаживать напряжения и, вследствие этого, соответственно, подстраиваться к локальному равновесию фаз. Однако в однородном поровом пространстве, как показывают расчеты, это не приводит к каким-то качественным изменениям, хотя картина вытеснения несколько другая. Это, возможно, связано с тем, что общая неравновесность положения поверхности остается, несмотря на появление дополнительного параметра для локального согласования условия равновесия.

Наличие тупиковых пор также оказывает влияние на динамику процесса, хотя в целом картина вытеснения остается качественно прежней. Из расчетов следует, что в случае однородной пористой структуры с примерно одинаковыми условиями смачивания газовый пузырь должен выталкиваться из глубин пористого тела.

В [6] отмечается, что, ввиду того, что в пропитываемых телах неизвестна поровая структура, математическое моделирование наталкивается на непреодолимые трудности в описании процессов, что, практически, обесценивает сам процесс расчета. Однако на наш взгляд, несмотря на объективные трудности в

математическом моделировании, оно полезно тем, что посредством его раскрываются возможные условия физического воздействия на процесс. Выясняются какие-то причины проявления того или иного эффекта и определяются возможные методы либо его исключения, либо его усиления. В частности, например, для выдавливания внутреннего пузыря газа из пористого тела целесообразно в динамической стадии использовать несмачивающую жидкость ( $\theta \approx \pi/2$ ), либо вести процесс таким образом, чтобы фронт жидкости двигался с одной какой-то стороны, например, снизу.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заславский, Ю.М. Экспериментальное исследование движения капель жидкости в капилляре под действием вибрации / Ю.М. Заславский // *Акустический журнал*, 2002. – Т. 48, №1. – С. 56 – 60.
2. Надутый, В.П. Определение условий потери устойчивости положения жидкости в капилляре при вибрационном воздействии / В.П. Надутый, В.И. Елисеев, В.И. Луценко // *Вібрації в техніці та технологіях*. – 2015. – № 4(80). – С. 39–43.
3. Волков, В.И. Экспериментальное исследование гистерезиса смачивания / В.И. Волков, С.С. Лескова, Е.Р. Кирколуп // *Известия Алтайского гос. ун-та*. – Барнаул : АлтГУ, 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. Ахтареев, А. А. Неравновесная модель фильтрации жидкости в ненасыщенной пористой среде: диссертация канд. физ–мат наук: 05.13.18: защищена 27.11.2011 / Ахтареев А.А. – Казань: Казанский Федеральный университет, 2011. – 134 с.
6. Димов, С.В. Гидродинамика капиллярных течений в пористой среде: автореферат дис. канд. физ.-мат. наук: 01.02.05 Механика жидкости и газа. – Новосибирск, 2004. – 114 с.
7. Сумм, Б.Д. Гистерезис смачивания / Б.Д. Сумм // *Соровский образовательный журнал*, 1999. – № 7. – С. 98–102.
8. Чураев, Н.В. Физикохимия процессов массопереноса в пористых телах / Н.В. Чураев. – М. : Химия, 1990. – 272 с.

#### REFERENCES

1. Zaslavskiy, Yu.M. (2002), “Experimental study of the motion of liquid droplets in a capillary under the action of vibration”, *Akusticheskiy zhurnal*, vol. 48, no. 1, pp. 56–60.
2. Nadutyu, V.P., Eliseev, V.I. and Lutsenko, V.I. (2015), “Determination of the conditions for loss of stability of the liquid position in the capillary under vibration influence”, *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnologiyakh*, no. 4(80), pp. 39–43.
3. Volkov, V.I., Leskova, S.S. and Kirkolup, E.R. (2006), “Experimental study of wetting hysteresis”, *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta*, Barnaul, Russia, issue 49, no. 1, pp. 106–111.
4. Kralchevsky P. A., 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, Netherlands – Japan.
5. Akhtareev, A. A. (2011), “Nonequilibrium model of fluid filtration in an unsaturated porous medium”, Ph.D. dissertation, Math modeling, numerical methods, Kazan Federal University, Kazan, Russia.
6. Dimov, S.V. (2004), “Hydrodynamics of capillary flows in a porous medium”, Abstract Ph.D. dissertation, Mechanics of liquid and gas, Novosibirsk, Russia.
7. Summ, B.D. (1999), “Hysteresis of wetting”, *Sorovskiy obrazovatelnyy zhurnal*, no. 7, pp. 98–102.
8. Churaev, N.V. (1990), *Fizikokhimiya protsessov massoperenosa v poristykh telakh* [Physicochemistry of mass transfer processes in porous bodies], Khimiya, Moscow, Russia.

#### 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 НАНУ),

Днепр, Україна, [lvi151156@gmail.com](mailto:lvi151156@gmail.com).

**Луценко Васильй Іванович**, кандидат технічних наук, старший научний співробітник, старший научний співробітник відділу проблем шахтних енергетических комплексів, Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАНУ), Днепр, Україна, [lvi151156@gmail.com](mailto:lvi151156@gmail.com).

#### About the authors

**Yeliseyev Vladimir Ivanovich**, Candidate of Physics and Mathematics 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 Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, [lvi151156@gmail.com](mailto:lvi151156@gmail.com).

**Lutsenko Vasily 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 Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, [lvi151156@gmail.com](mailto:lvi151156@gmail.com).

**Анотація.** Розглянуто наближену модель розрахунку початкової стадії процесу витіснення газового пузиря з пористого тіла однорідної структури при його зануренні в рідину. У моделі не враховується опір при вході рідини в пори. Проведені розрахунки показують, що в початковій стадії виникають коливання газового пузиря, які швидко згасають. В однорідному поровому просторі при постійному куті змочування вся поверхня пузиря в цілому знаходиться в нерівноважному стані, за винятком локальної ділянки його поверхні, що є джерелом збурень, в результаті яких поверхня пузиря викривляється і переміщується. Це призводить до витіснення пузиря. Наявність гістерезису змочування дає додатковий ступінь свободи елементів поверхні розділу фаз. Однак в однорідному поровому просторі, згідно з розрахунками, це не призводить до якісних змін картини витіснення. З розрахунків випливає, що в разі однорідної пористої структури з приблизно однаковими умовами змочування газовий пузир повинен виштовхуватися з глибин пористого тіла, при цьому для підвищення ефективності просочення доцільно вести процес таким чином, щоб фронт рідини рухався з якоїсь однієї сторони.

**Ключові слова:** пористе тіло, просочення, капілярні сили, гістерезис, змочування, газовий пузир.

**Abstract.** This article describes an approximate model for calculating the initial stage of displacement of a gas bubble from a porous body of a homogeneous structure when immersed in a liquid. The model does not take into account the resistance at the entrance of liquid into the pores. The performed calculations demonstrate the occurrence of rapidly decaying gas bubble oscillations at the initial stage. In a uniform pore space with a constant wetting angle, the entire surface of the bubble is in a nonequilibrium state, except perturbations on the local portion of its surface, which results in bubble deformation and movement. These effects lead to bubble displacement.

Wetting hysteresis adds degree of freedom to the elements of the phase interface. However, in a homogeneous pore space, according to calculations, this does not qualitatively change the displacement pattern. Based on the calculations, in a homogenous porous structure with approximately the same wetting conditions, the gas bubble must be pushed out of the depths of the porous body. To increase efficiency of saturation, it is best to move the liquid from one side.

**Keywords:** porous body, saturation, capillary forces, wetting hysteresis, gas bubble.

Статья поступила в редакцию 10.02.2017

Рекомендовано к публикации д-ром технических наук Семененко Е.В.