

УДК 532.685:536.24

А. П. Лукиша

Институт геотехнической механики НАН Украины

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСТИННЫХ СКОРОСТЕЙ ФИЛЬТРАЦИИ
ЖИДКОСТНОЙ И ПАРОВОЙ ФАЗ ПРИ ДВИЖЕНИИ ДВУХФАЗНОГО
ИСПАРЯЮЩЕГОСЯ ПОТОКА В ПОРИСТЫХ
ВЫСОКОТЕПЛОПРОВОДНЫХ КАНАЛАХ**

У статті приведені дані, що визначають гідравлічні характеристики пористих теплообмінних елементів (ПТЕ), котрі можуть застосовуватися в системах терморегулювання літальних апаратів (ЛА). Розраховано істинні швидкості фільтрації рідинної і парової фаз при русі двохфазного потоку, що випаровується, у пористих високотеплопровідних матеріалах. Показано складний і багатопараметричний характер залежності зазначених величин від основних режимно - конструктивних параметрів.

Ключові слова: системи терморегулювання, пористі матеріали, двофазні потоки, швидкості фільтрації пари та рідини.

В статье приведены данные, определяющие гидравлические характеристики пористых теплообменных элементов (ПТЭ), которые могут применяться в системах терморегулирования летательных аппаратов (ЛА). Рассчитаны истинные скорости фильтрации жидкостной и паровой фаз при движении двухфазного испаряющегося потока в пористых высокотеплопроводных материалах. Показан сложный и многопараметрический характер зависимости указанных величин от основных режимно - конструктивных параметров.

Ключевые слова: системы терморегулирования, пористые материалы, двухфазные потоки, скорости фильтрации пара и жидкости.

The article presents the data which determines the hydraulic characteristics of the porous heat exchange elements. These porous heat exchange devices can be applied in systems of thermal regulation of aerospace Engineering. The real velocities of a filtration of liquid and vapor phases are defined at a motion of a two-phase evaporating flow in porous materials with high thermal conductivity. It is shown a complex and multi-parameter character dependence of these quantities from the basic of regime parameters and design parameters.

Keywords: systems of thermal regulation, porous materials, two-phase flows, velocities of a filtration of liquid and vapour.

Важним направлением деятельности при проектировании систем термостабилизации летательных аппаратов (ЛА) является разработка компактных, высокоэффективных теплообменников, способных работать в условиях высоких тепловых нагрузок. Одним из способов решения подобного рода задач является применение пористых теплообменных элементов (ПТЭ), позволяющих значительно уменьшить массогабаритные характеристики систем терморегули-

рования и существенно повысить к.п.д. их работы. При этом ПТЭ могут изготавливаться из металлопорошка, металловолокна, высокопористых ячеистых материалов или сетчатых материалов на основе медных, бронзовых или других высокотеплопроводных волокон или частиц. ПТЭ могут работать в системах терморегулирования как с однофазным, так и с двухфазным (при испарении и конденсации) режимами движения теплоносителя. Кроме того, ПТЭ позволяют значительно расширить рабочий диапазон температур систем терморегулирования и воспринимать тепловые нагрузки до 10^8 Вт/м^2 .

Однако надежный расчет теплогидравлических характеристик систем терморегулирования с ПТЭ при работе в режимах с фазовыми переходами испарения и конденсации затруднен ввиду отсутствия надежных, приемлемых зависимостей, необходимых для этих целей, что обусловлено, в частности, недостаточной изученностью вопроса гидродинамики движения двухфазного испаряющегося или конденсирующегося потока в пористых высокотеплопроводных материалах. Это обусловлено, в частности, отсутствием полной физической картины процесса и отсутствием данных по величинам параметров, определяющих процесс, в частности, данных по величинам истинных скоростей фильтрации жидкостной U' и паровой U'' фаз.

В общем виде уравнения для определения величин истинных скоростей фильтрации жидкостной и паровой фаз в пористом материале, согласно [1], можно записать, используя выражения для массовых расходов каждой фазы:

$$\rho'U_0'(1-x) = \rho'U's, \quad (1)$$

$$\rho'U_0'x = \rho''U''(1-s). \quad (2)$$

Откуда легко можно получить следующие соотношения:

$$\frac{U'}{U_0'} = \frac{1-x}{s}, \quad (3)$$

$$\frac{U''}{U_0'} = \frac{x}{1-s} \cdot \frac{\rho'}{\rho''}, \quad (4)$$

где U_0' – начальная скорость фильтрации жидкой фазы на входе в пористый канал; x – массовое расходное паросодержание двухфазного парожидкостного потока, s – насыщенность потока жидкой фазой, ρ' ρ'' – плотность паровой и жидкостной фаз на линии насыщения. В общем случае, при проектировании парогенерирующего оборудования, опираясь на исходные данные, заданными считаются число Рейнольдса потока на входе в канал $Re_0 = (G(\beta/\alpha))/\mu'$ и массовое расходное паросодержание потока x , определяемое из уравнения теплового баланса. Здесь $G = \rho'U_0'$ – удельный массовый расход, $\text{кг/м}^2 \text{ с}$; α и β – соответственно вязкостный и инерционный коэффициенты сопротивления пористого ма-

териала; μ' – динамическая вязкость жидкости на линии насыщения. Т.е., как видно из уравнений (3) и (4), основным неопределенным параметром при определении паровой и жидкостной скоростей фильтрации остается насыщенность пористого материала жидкостной фазой. Насыщенность пористого образца жидкостной фазой, как одна из составляющих величин, входит в модель относительной фазовой проницаемости при расчете перепада давления в случае движения двухфазного парожидкостного потока в пористых материалах [1].

На сегодняшний день существуют две методики или модели расчета гидравлического сопротивления двухфазного испаряющегося потока в пористых материалах. Одна из них – это модель относительной фазовой проницаемости, которая первоначально была разработана применительно к движению газожидкостных (нефтегазовых) смесей в грунтах [2], [3] и позже была применена к движению испаряющихся парожидкостных потоков в высокотеплопроводных пористых материалах [1]. Вторая модель [4] также первоначально разрабатывалась применительно к движению газожидкостных смесей в различных пористых засыпках и позволяла рассчитывать гидравлическое сопротивление при постоянном газосодержании смеси. Позже данную методику применили к движению адиабатных парожидкостных потоков в высокотеплопроводных спеченных пористых материалах [5]. Определим величину насыщенности s пористого материала при движении парожидкостной смеси, исходя из объединения двух указанных выше методик.

Систему уравнений для расчета гидравлического сопротивления двухфазного испаряющегося потока, согласно модели относительной фазовой проницаемости, можно записать следующим образом [1]:

$$G = \text{const},$$

$$-\frac{dP_1}{dZ} = \frac{\alpha\mu'v'G(1-x)}{f_1}, \quad (5)$$

$$-\frac{dP_2}{dZ} = \frac{\alpha\mu''v''G \cdot x}{f_2}, \quad (6)$$

$$P_2 - P_1 = \Delta P, \quad (7)$$

$$\varphi + s = 1, \quad (8)$$

где G – удельный массовый расход, $\text{кг}/\text{м}^2 \text{ с}$; α – вязкостный коэффициент сопротивления; v' , μ' – удельный объем и динамическая вязкость жидкости на линии насыщения; v'' , μ'' – удельный объем и динамическая вязкость пара на линии насыщения; $x = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_p + \dot{m}_e}$ – расходное массовое паросодержание потока; P_1 и P_2 – давление жидкости и пара в окрестности границы раздела фаз; ΔP –

капиллярное давление, в данной модели принимается $\Delta P = 0$; φ и s – насыщенности пористого материала паровой и жидкостной фазами (объемное содержание фаз); f_1 и f_2 – эмпирические функции, называемые относительными фазовыми проницаемостями. Эти функции, согласно данной методике, зависят в основном от насыщенности жидкой фазой. Относительные фазовые проницаемости учитывают увеличение гидравлического сопротивления из-за присутствия другой фазы в пористой матрице [1], [3], т.е. принимается, что для каждой фазы справедлив закон Дарси, как для однофазного потока, но с уменьшением проницаемости пористой структуры вследствие наличия другой фазы [7].

Для относительных фазовых проницаемостей в процессе движения двухфазного парожидкостного потока в пористом материале выполняются следующие условия:

$$x = 0 (\varphi = 0, s = 1), f_1 = 1, f_2 = 0,$$

$$x = 1 (\varphi = 1, s = 0), f_1 = 0, f_2 = 1.$$

При этом предлагается [1] однопараметрическая зависимость относительных фазовых проницаемостей от насыщенности жидкой фазой в виде степенных функций

$$f_1(s) = s^n, \tag{9}$$

$$f_2(s) = (1 - s)^n, \tag{10}$$

где n – показатель степени, о численных значениях которого будет сказано позже.

Систему уравнений для расчета гидравлического сопротивления двухфазного парожидкостного потока в случае постоянного паросодержания согласно другой указанной выше методике (методике Локкарта-Мартинелли), при движении сквозь пористые спеченные материалы, можно записать следующим образом:

$$\left(\frac{\Delta P}{\ell} \right)_{\text{дв}} = (\Delta P / \ell)_L \cdot \Phi_L^2, \tag{11}$$

$$\left(\frac{\Delta P}{\ell} \right)_{\text{дв}} = (\Delta P / \ell)_G \cdot \Phi_G^2, \tag{12}$$

где $(\Delta P / \ell)_L$ и $(\Delta P / \ell)_G$ – перепады давления при течении через пористую структуру только жидкой фазы в количестве, содержащемся в смеси, либо только паровой фазы. Эти величины рассчитываются по уравнению Дарси, в котором в качестве массовых скоростей фильтрации $\rho w = G$ используются со-

ответствующие массовые скорости фильтрации каждой из фаз. Согласно [4], параметры Φ_L и Φ_G являются функцией параметра Мартинелли $X = \sqrt{(\Delta P/\ell)_L/(\Delta P/\ell)_G}$. Для параметра X^2 можно записать следующее выражение [5]:

$$X^2 = \left(\frac{1-x}{x}\right) \left(\frac{\mu'}{\mu''}\right) \left(\frac{\rho''}{\rho'}\right) \frac{1 + (\beta/\alpha)[G(1-x)]/\mu'}{1 + (\beta/\alpha)[G \cdot x]/\mu''} = \left(\frac{1-x}{x}\right) \left(\frac{\mu'}{\mu''}\right) \left(\frac{\rho''}{\rho'}\right) \frac{1 + \mathbf{Re}'}{1 + \mathbf{Re}''}. \quad (13)$$

Связь параметра X с Φ_L и Φ_G можно выразить аналитически [6]:

$$\Phi_L^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2}, \quad (14)$$

$$\Phi_G^2 = 1 + CX + X^2. \quad (15)$$

Ю. А. Зайгарником и И. В. Калмыковым [5] в результате обработки опытных данных было получено, что коэффициент C является функцией массовой скорости фильтрации $(\rho w)_0 = G$, физических свойств (ρ' и μ') и гидравлических характеристик пористой структуры (коэффициенты α и β):

$$C = 4,0 \left(\frac{\beta/\alpha}{G} \cdot \frac{\rho'}{\mu'} \right)^{0,4}. \quad (16)$$

Если взглянуть на характер уравнений (5), (6) и (11), (12), описывающих гидравлическое сопротивление двухфазных парожидкостных потоков в пористых материалах, согласно методикам Маскета-Леверетта и Локкарта-Мартинелли соответственно, то можно заметить их сходство. Различие уравнений заключается в записи поправочных коэффициентов f_1 , f_2 и Φ_L^2 , Φ_G^2 .

Нетрудно заметить, что коэффициент $\Phi_L^2 = 1/f_1$, а коэффициент $\Phi_G^2 = 1/f_2$. Однако коэффициенты Φ_L^2 и Φ_G^2 распространяются на обе части уравнения Дарси – вязкостную и инерционную (а расчетные зависимости для их определения получены на основе опытных экспериментальных данных). Зависимости же для расчета коэффициентов f_1 и f_2 (относительных фазовых проницаемостей), исходя из практики движения газожидкостных смесей в грунтах, были получены для вязкостной области движения двухфазной смеси. Поскольку зависимости (5), (6) и (11), (12) описывают одну и ту же величину – гидравлическое сопротивление двухфазного парожидкостного потока в пористых материалах и, кроме того, зависимости для расчета параметров Φ_L^2 и Φ_G^2 получены экспериментальным путем, примем, что зависимости для расчета относительных фазовых проницаемостей f_1 и f_2 также справедливы во всем вязкостно-инерционном режиме движения двухфазного потока.

Запишем систему уравнений для расчета коэффициентов Φ_L^2 , Φ_G^2 и f_1, f_2 , исходя из того, что согласно (5), (6) и (11), (12) $\Phi_L^2=1/f_1$, $\Phi_G^2=1/f_2$:

$$\frac{1}{s^n} = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2}, \quad (17)$$

$$\frac{1}{(1-s)^n} = 1 + CX + X^2. \quad (18)$$

Как видно, (17), (18) являются системой двух нелинейных алгебраических уравнений, относительно двух неизвестных (параметров) – насыщенности s и показателя степени n .

Прологарифмируем выражение (17):

$$-n \ln s = \ln \left(1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \right), \quad (19)$$

откуда

$$n = - \frac{\ln \left(1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \right)}{\ln s}. \quad (20)$$

Подставляя (20) в (18), получаем

$$(1-s) \frac{\ln \left(1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \right)}{\ln s} = 1 + CX + X^2. \quad (21)$$

Уравнение (21) является нелинейным алгебраическим уравнением относительно величины насыщенности пористого канала жидкой фазой s . Оно может быть решено численно, каким-либо методом, например, методом половинного деления. После нахождения величины s из (21) и подстановки ее в уравнение (20), можно найти численное значение показателя степени n , соответствующее данному значению насыщенности и набору параметров X^2 и C .

Данные расчета системы уравнений (17), (18) относительно параметров S и n показаны в таблицах 1, 2.

Приведенные в таблицах 1 и 2 данные решения системы уравнений (17)–(18) $S = f(X, C)$ и $n = f(X, C)$ можно обобщить следующими интерполяционными уравнениями:

$$s = \frac{1}{1 + X^A}, \quad (22)$$

Таблица 1

Зависимость насыщенности пористого образца S от параметров X и C
($X=0,01 \div 100$; $C=0,01 \div 10000,0$)

Значение параметра X	Значение параметра C						
	0,01	0,1	1	10	100	1000	10000
0,01	0	0,001	0,006	0,034	0,132	0,249	0,318
0,1	0,011	0,018	0,061	0,194	0,322	0,382	0,412
1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
10	0,989	0,983	0,94	0,806	0,678	0,618	0,588
100	1	0,999	0,994	0,966	0,868	0,751	0,682

Таблица 2

Зависимость показателя степени n от параметров X и C
($X=0,01 \div 100$; $C=0,01 \div 10000,0$)

Значение параметра X	Значение параметра C						
	0,01	0,1	1	10	100	1000	10000
0,01	1,208	1,329	1,794	2,756	4,892	7,999	11,71
0,1	1,018	1,144	1,679	3,235	6,177	9,252	12,667
1	1,007	1,07	1,585	3,585	6,672	9,647	12,966
10	1,017	1,139	1,677	3,235	6,177	9,253	12,668
100	1,073	1,302	1,78	2,753	4,892	7,999	11,71

$$A = \frac{1,835}{1 + \left(\frac{C}{2,1}\right)^{-0,64}} - 2, \quad (23)$$

$$n = B(\ln X)^2 + D, \quad (24)$$

$$B = \frac{-0,05 \ln \frac{C}{5}}{\left(\frac{C}{12} + \frac{12}{C}\right)^{0,35}} - 0,02, \quad (25)$$

$$D = (10^3 (0,62 + 6,2 C))^{0,154} - 1,8. \quad (26)$$

Имея данные расчетов насыщенности пористой структуры s и показателя степени n , для формул (9) и (10) в зависимости от комплексов X и C (таблицы 1, 2, формулы (20)–(26)), можно вычислить истинные скорости фильтрации жидкой U' и паровой U'' фаз в пористом материале (в зависимости от числа Рейнольдса $Re_0 = (G(\beta/\alpha))/\mu'$ и массового расходного паросодержания x , при

различных значениях комплекса (β/α) и сравнить их с начальной скоростью фильтрации U'_0 жидкой фазы. Данные расчета отношения истинных скоростей фильтрации жидкой и паровой фаз к начальной скорости фильтрации жидкой фазы U_0 для воды при $P_s = 1$ атм., $t_s = 100^\circ\text{C}$, при значениях комплекса $\beta/\alpha = 10^6; 10^5; 10^4; 10^3$ показаны на рис. 1,а-г и рис. 2,а-г.

Обсуждение результатов

Для анализа полученных на рис. 1, а-г и на рис. 2, а-г графиков исследуем характер зависимости инерционного и вязкостного коэффициентов сопротивления пористых материалов, а также отношения инерционного к вязкостному коэффициенту сопротивления в зависимости от пористости. Для примера рассмотрим хорошо исследованные металловолокнистый и металлопорошковый пористые материалы. Диапазон изменения пористости примем равным $\theta = 0,3 \div 0,9$. Диаметр волокон и диаметр частиц металлопорошка и металловолокна примем равным $d_b = d_q = 200$ мкм $= 2 \cdot 10^{-4}$ м. Для металловолокнистого пористого материала расчетные зависимости для вычисления параметров α и β возьмем в [8]:

$$\alpha = 2,57 \cdot 10^8 \theta^{-3,91}, \quad (27)$$

$$\beta = 0,91 \cdot 10^3 \theta^{-5,33}, \quad (28)$$

а для металлопорошка расчетные зависимости возьмем в [9]:

$$\alpha = 171(1 - \theta)^2 d_q^{-2} \theta^{-3}, \quad (29)$$

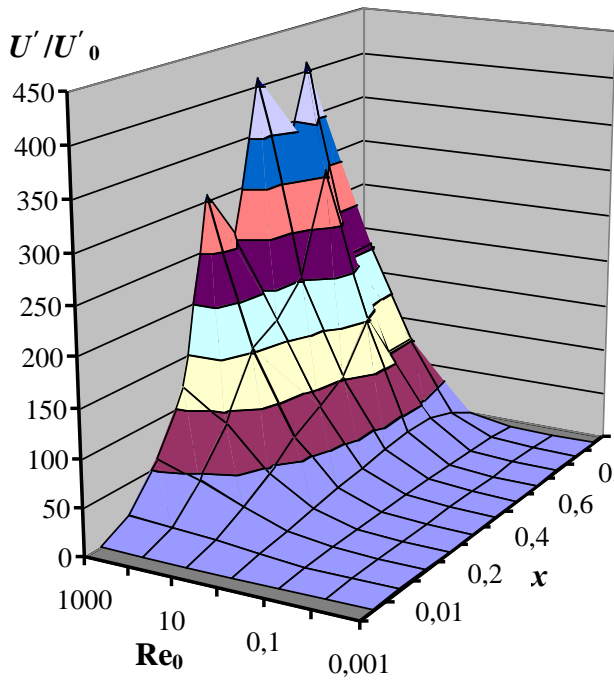
$$\beta = 0,635(1 - \theta) d_q^{-1} \theta^{-4,72}. \quad (30)$$

Данные расчета величин α , β и β/α для металловолокна поместим в таблицу 3, а для металлопорошка – в таблицу 4. Данные таблицы 4 ограничим значением пористости 0,6, поскольку согласно [10] металлопорошковые пористые материалы не могут иметь пористость, выше 0,6.

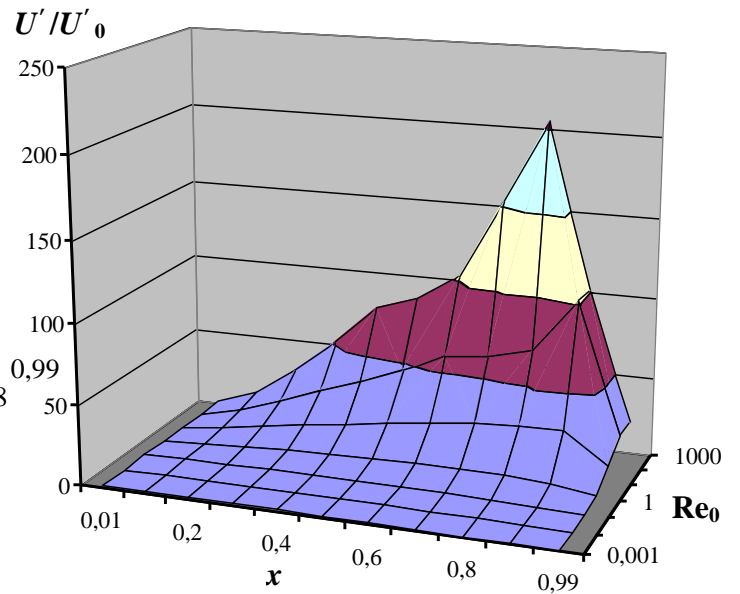
Таблица 3

Данные расчета коэффициентов α и β , а также комплекса β/α для металловолокна

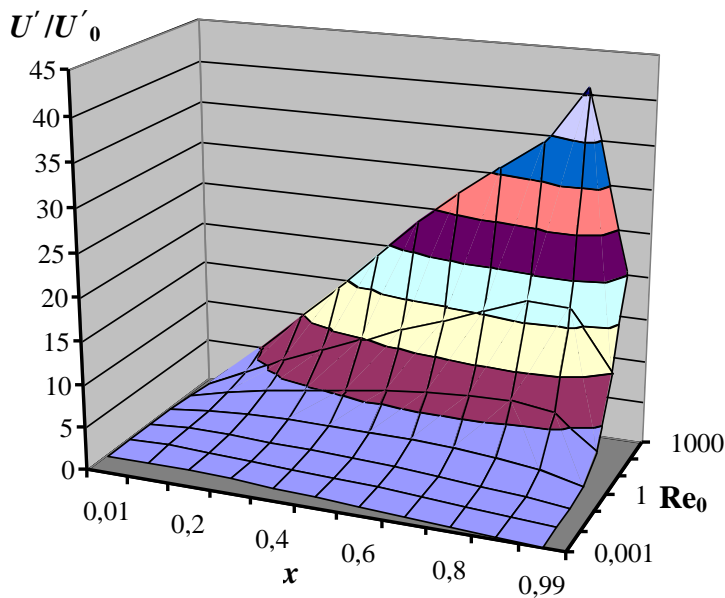
Параметры	Пористость, θ						
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
α , $1/\text{м}^2$	$2,84 \cdot 10^{10}$	$9,24 \cdot 10^9$	$3,86 \cdot 10^9$	$1,89 \cdot 10^9$	$1,04 \cdot 10^9$	$6,14 \cdot 10^8$	$3,88 \cdot 10^8$
β , $1/\text{м}$	$5,57 \cdot 10^5$	$1,20 \cdot 10^5$	$3,66 \cdot 10^4$	$1,39 \cdot 10^4$	$6,09 \cdot 10^3$	$2,99 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^3$
β/α , м	$1,95 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$0,95 \cdot 10^{-5}$	$0,73 \cdot 10^{-5}$	$0,59 \cdot 10^{-5}$	$0,49 \cdot 10^{-5}$	$0,41 \cdot 10^{-5}$



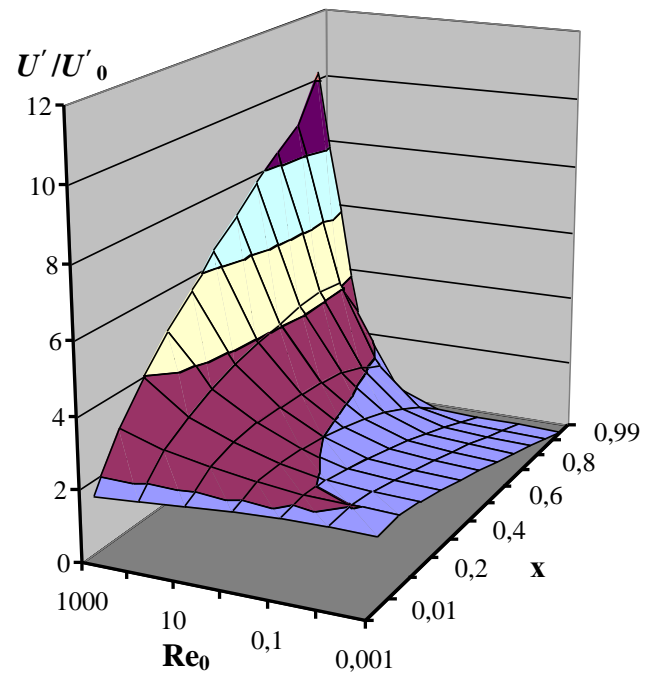
a



б



в



г

**Рис. 1. Данные расчета истинной скорости фильтрации жидкостной фазы в двухфазном парожидкостном потоке воды ($U'/U'_0=f(Re_0, x)$) в зависимости от числа Рейнольдса потока Re_0 и массового расхода паросодержания потока x :
a – $\beta/\alpha = 10^{-6}$; *б* – $\beta/\alpha = 10^{-5}$; *в* – $\beta/\alpha = 10^{-4}$; *г* – $\beta/\alpha = 10^{-3}$**

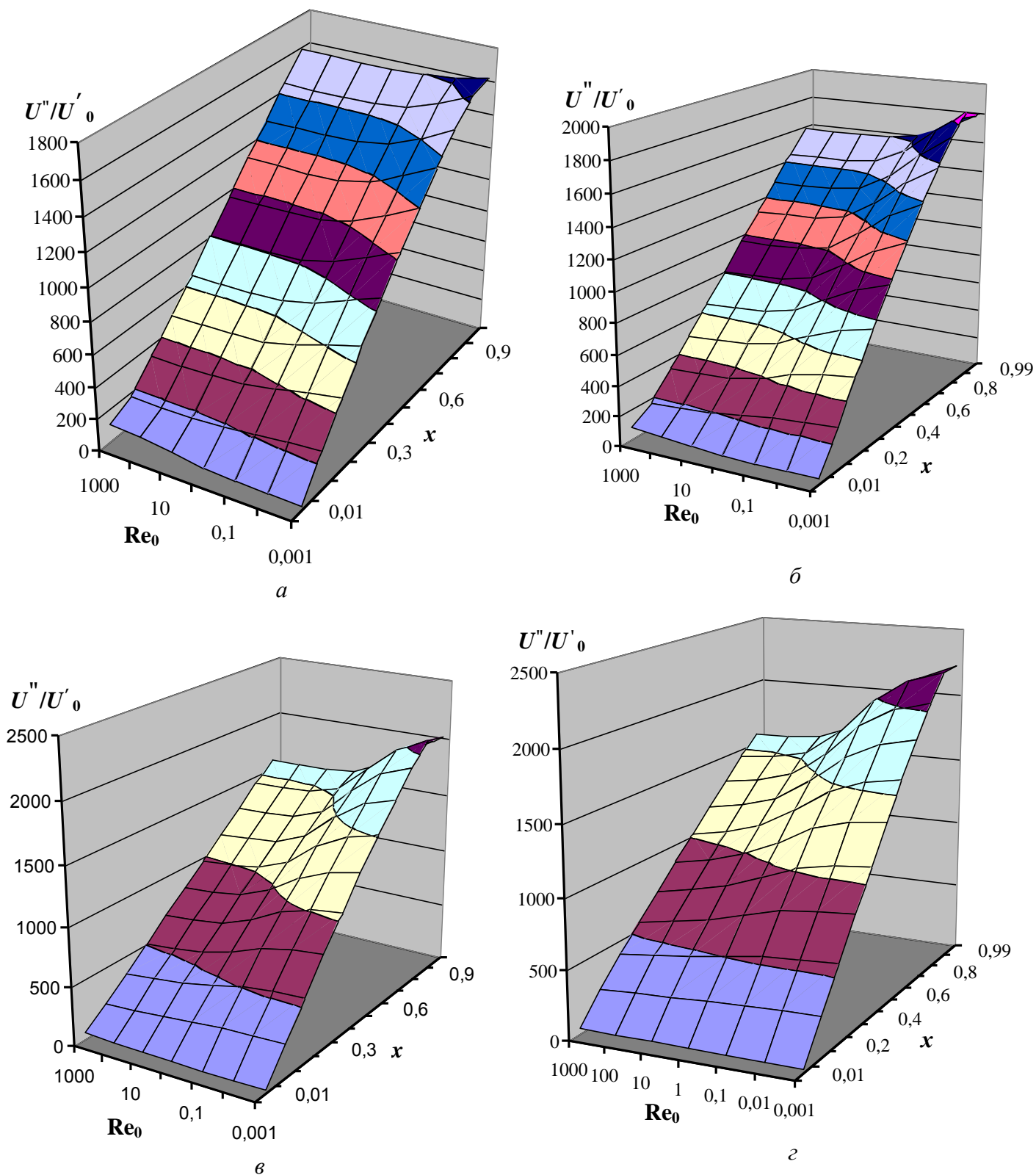


Рис. 2. Данные расчета истинной скорости фильтрации паровой фазы в двухфазном парожидкостном потоке воды $(U''/U'_0)=f(Re_0, x)$ в зависимости от числа Рейнольдса потока Re_0 и массового расходного паросодержания потока x :
 $a - \beta/\alpha = 10^{-6}$; $б - \beta/\alpha = 10^{-5}$; $в - \beta/\alpha = 10^{-4}$; $г - \beta/\alpha = 10^{-3}$

**Данные расчета коэффициентов α и β , а также комплекса β/α
для металлопорошка**

Параметры	Пористость, θ			
	0,3	0,4	0,5	0,6
α , 1/м ²	$7,76 \cdot 10^{10}$	$2,405 \cdot 10^{10}$	$8,55 \cdot 10^9$	$3,17 \cdot 10^9$
β , 1/м	$6,53 \cdot 10^5$	$1,44 \cdot 10^5$	$4,18 \cdot 10^4$	$1,42 \cdot 10^4$
β/α , м	$8,42 \cdot 10^{-6}$	$5,99 \cdot 10^{-6}$	$4,89 \cdot 10^{-6}$	$4,47 \cdot 10^{-6}$

Если взглянуть на характер изменения параметра β/α в зависимости от пористости (таблицы 3, 4), то можно заметить обратно пропорциональный вид этой зависимости. Т.е., с ростом пористости значение параметра β/α падает. Кроме того, можно заметить, что для реальных пористых материалов значения параметра β/α , находятся в диапазоне $4 \cdot 10^{-6} \div 2 \cdot 10^{-5}$. Исходя из этого и из вида полученных многомерных зависимостей, представленных на рис. 1,а–г, можно сделать заключение, что с увеличением пористости, т.е. с уменьшением значения параметра β/α относительная скорость жидкостной фазы увеличивается, в то время, как относительная скорость паровой фазы уменьшается. Это явление можно объяснить тем фактом, что с увеличением пористости увеличивается средний диаметр поровых каналов, т.е. уменьшается гидравлическое сопротивление. Это ведет к росту скорости жидкостной фазы, с другой стороны, как известно из курса газовой динамики, увеличение диаметра канала, при воздействии на газовый (паровый) дозвуковой поток, ведет к уменьшению скорости этого потока. Исходя из анализа рис. 1,а–г и 2,а–г, можно заметить следующую особенность поведения скоростей жидкостной и паровой фаз с ростом массового паросодержания потока – скорость паровой фазы монотонно возрастает, в то время как скорость жидкостной фазы вначале растет (до значений примерно 0,8), а затем уменьшается. Монотонный рост скорости паровой фазы в этом случае можно объяснить ростом массовой составляющей паровой фазы, что при постоянном среднем гидравлическом диаметре поровых каналов неизбежно должно вести к скорости паровой фазы (исходя из уравнения массового расхода паровой фазы, согласно которому массовый расход равен произведению скорости фильтрации, плотности и площади поперечного сечения). Характер поведения скорости жидкостной фазы можно объяснить разрывом сплошности жидкостной фазы при больших паросодержаниях и постепенным торможением жидкостных капель в паровом пространстве каналов пористой структуры. Характер влияния числа Рейнольдса исходного потока на относительную скорость фильтрации жидкостной и паровой фаз имеет следующий вид. С ростом числа Рейнольдса исходного потока относительная скорость жидкостной фазы возрастает, в то время, как относительная скорость паровой фазы незначительно снижается, особенно при больших паросодержаниях. Данную особенность можно попытаться объяснить тем, что при большем исходном числе Рейнольдса потока, а значит при большей исходной кинетической энергии потока, мощности потока хватает в большей мере, чтобы сохранить скорость жидкостной

фазы до больших значений паросодержания, чем при малых исходных числах Рейнольдса. Незначительное снижение скорости паровой фазы, при увеличении исходной скорости потока, можно попытаться объяснить тем, что при малых начальных скоростях и энергиях потока на сохранение скорости жидкостной фазы идет относительно меньшее количество энергии, а сравнительно большая ее часть расходуется на увеличение скорости паровой фазы.

Библиографические ссылки

1. Майоров В. А. Структура и сопротивление двухфазного испаряющегося потока в пористых материалах / В. А. Майоров // Изв. Академии наук СССР. Энергетика и транспорт. – 1980. – № 5. – С. 126 – 133.
2. Шейдеггер А. Физика течения жидкостей через пористую среду / А. Шейдеггер. – М.: Гостоптехиздат, 1960. – 250 с.
3. Чарный И. А. Подземная гидрогазодинамика / И. А. Чарный. – М.: Гостоптехиздат, 1963. – 396 с.
4. Lockhart R. W. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes / R. W. Lockhart, R. C. Martinelli // Chemical Engineering Progress. – 1949. – V.45. – Pp.39–48.
5. Зейгарник Ю. А. Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления пористых структур при адиабатическом движении пароводяных смесей / Ю. А. Зейгарник, И. В. Калмыков // Теплофизика высоких температур. – 1985. – Т. 23. – № 5. – С. 934–940.
6. Chisholm D. Prediction of pressure gradient in pipeline system during two-phase flow / D. Chisholm, L. A. Sutherland // Proc. Inst. Mech. Engrs. – 1969. – V. 184. – Pt. 3c. – P. 24–32.
7. Поляев В. М. Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах конструкций летательных аппаратов / В. М. Поляев, В. А. Майоров, Л. Л. Васильев. – М.: Машиностроение, 1988. – 168 с.
8. Косторнов А. Г. Проницаемые волокновые пористые материалы / А. Г. Косторнов. – К.: Техніка, 1983. – 128 с.
9. Белов С. В. Пористые металлы в машиностроении / С. В. Белов. – М.: Машиностроение, 1981. – 247 с.
10. Пористые проницаемые материалы: *справ. изд. под ред. С. В. Белова*. – М.: Металлургия, 1987. – 335 с.

Надійшла до редколегії 02.04.2013