

ный запас при работе на воде;  $\rho$  – относительная плотность ВУТ.

Полученные данные свидетельствуют, что при перекачивании ВУТ не наблюдается существенного изменения напорных и энергетических характеристик центробежных насосов по сравнению с характеристиками на воде. Это обстоятельство в сочетании с низкой удельной материалоемкостью центробежных насосов (в 6 – 8 раз ниже, чем у поршневых) говорит о целесообразности их использования в рассматриваемых технологических схемах.

### Список литературы

- 1 Смолдырев, А.Е. Трубопроводный транспорт концентрированных гидросмесей / А.Е. Смолдырев, Ю.К. Сафонов. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.
- 2 Киричко, С.Н. Расчет параметров гидротранспорта высококонцентрированных гидросмесей при разработке техногенных месторождений / С.Н. Киричко, Е.В. Семенов // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: материалы 8-й междунар. конф.- Тула – Донецк – Минск, 2012. – Т. 1. – С. 199 – 206.
- 3 Круть, О.А. Водовугільне паливо / О.А. Круть. – К.: Наук. думка, 2002. – 172 с.
- 4 Світлий, Ю.Г. Гідравлічний транспорт / Ю.Г. Світлий, В.С. Білецький. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2009. – 436 с.
- 5 Островерхов, В. Влияние поверхностно-активных веществ и других факторов на получение высококонцентрированных водоугольных суспензий с низкой вязкостью / В. Островерхов. – М: Углетехиздат, 1973. – 154 с.
- 6 Урьев, Н.Б. Влияние высокоскоростной активации водоугольных суспензий на их структурно-реологические свойства / Н.Б. Урьев, Э.И. Рукин // Исследование технологии и оборудования терминальных комплексов магистрального гидротранспорта: сб. науч. тр. / НПО Гидротрубопровод. – М., 1985. – С. 19 – 24.
- 7 Круть, А.А. Водоугольное топливо на основе угольных шламов / А.А. Круть, Л.Н. Козыряцкий // Гірнична електромеханіка: зб. наук. праць / ДНТУ. – 2009. – Вип. 17 (157). – С. 185 – 194.
- 8 Дунаевская, Н.И. Отходы угля. Обзор ресурсов и возможности использования / Н.И. Дунаевская, А.И. Росколуца, Н.В. Чернявский // Member State Technologies dedicated to Help the Energy Self Sufficiency Process optimising the local Resources such as Coal: materials of The Seminar. –К., 1997. – Р. 9.
- 9 Высококонцентрированные водоугольные суспензии – новый вид композиционного экологически чистого жидкого топлива / Е.В. Титов, С.Л. Хилько, Ю.Г. Світлий [и др.] // Технологічні дослідження: стан і перспективи: зб. наук. праць міжнарод. наук.-практ. конф. – Івано-Франківськ, 1995. – С. 125 – 127.
- 10 Лучников, В. Состояние энергетики Украины, возможности для инвесторов по реабилитации тепловых электростанций / В. Лучников // Деловые возможности и потребность в инвестициях. Возможности модернизации украинских угольных электростанций: материалы украинско-американской объединённой конф. – К., 1988. – С. 121 – 125.
- 11 Обоснование параметров и режимов работы гидротранспортных систем горных предприятий / Ю.Д. Баранов, Б.А. Блюсс, Е.В. Семенов, В.Д. Шурыгин. – Д. : Новая идеология, 2006. – 416 с.
- 12 Нурок, Г.А. Процессы и технологии гидромеханизации открытых горных работ / Г.А. Нурок. – М.: Недра, 1979. – 549 с.
- 13 Семенов, Е.В. Научные основы технологий гидромеханизации открытой разработки титан-цирконовых россыпей / Е.В. Семенов. – К.: Наукова думка, 2011. – 231 с.
- 14 Зелепукин, Н.П. Справочник гидромеханизатора / Н.П. Зелепукин, Л.М. Раввинский, А.И. Харин. – К.: Буівельник, 1969. – 226 с.
- 15 Животовский, Л.С. Техническая механика гидросмесей и грунтовые насосы / Л.С. Животовский, Л.А. Смйловская. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
- 16 Смолдырев, А.Е. Трубопроводный транспорт / А.Е. Смолдырев. – М.: Недра, 1980. – 390 с.

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук Блюссом Б.А.*

УДК 532.685:536.24

*А.П. Лукиша, канд. техн. наук, М.В. Кирсанов, В.И. Елисеев, канд. ф-м наук;*

*В.И. Луценко, канд. техн. наук*

*(Украина, Днепропетровск, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины)*

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА ДВУХФАЗНОСТИ ПРИ ДВИЖЕНИИ ИСПАРЯЮЩЕГОСЯ ПОТОКА В ПОРИСТЫХ ВЫСОКОТЕПЛОПРОВОДНЫХ КАНАЛАХ

Одним из приоритетных направлений развития науки и техники как в Украине, так и во всём мире является внедрение энергосберегающих технологий и систем. Примером устройств, повышающих эф-

фективность энергетического оборудования, могут служить пористые теплообменные элементы (ПТЭ), которые могут изготавливаться из металлопорошка, металловолокна, высокопористых ячеистых материалов или сетчатых материалов на основе медных, бронзовых или других высокотеплопроводных волокон или частиц. ПТЭ позволяют значительно увеличить рабочий диапазон температур энергетических машин и воспринимать тепловые нагрузки до  $10^8$  Вт/м<sup>2</sup>. При этом ПТЭ могут применяться в энергетических машинах как с однофазным, так и с двухфазным (при испарении и конденсации) режимами движения теплоносителя.

Однако точный расчет теплогидравлических характеристик энергетических машин с ПТЭ при работе в режимах с фазовыми переходами испарения и конденсации затруднен ввиду отсутствия приемлемых зависимостей, что обусловлено, в частности, недостаточной изученностью вопроса гидродинамики движения двухфазного испаряющегося или конденсирующегося потока в пористых высокотеплопроводных материалах.

Согласно работе [1] формулу для расчета перепада давления при движении двухфазного испаряющегося потока в пористых материалах в общем виде можно записать так:

$$(P_L - P_Z)/(P_0 - P_1)_0 = \int_L^Z \Phi[x(z)] dz \quad , \quad (1)$$

где  $L$  – координата начала области испарения;  $Z$  – произвольная координата вдоль оси канала в области испарения;  $\Phi = (dP/dZ)/(dP/dZ)_0$  – параметр двухфазности, представляющий собой отношение обусловленного трением градиента давления  $dP/dZ$  двухфазного потока к аналогичной величине  $(dP/dZ)_0$  для однофазного потока жидкости при одинаковых удельных массовых расходах, а также показывающий во сколько раз возрастает давление в двухфазной смеси при движении её сквозь пористый материал по сравнению со случаем движения однофазного теплоносителя;  $(P_0 - P_1)_0$  – перепад давления в пористом материале длиной  $\delta$  при движении сквозь него жидкости на линии насыщения. Градиент  $(dP/dZ)_0$  рассчитывается согласно уравнению Дарси

$$\frac{-dP}{dZ} = \beta \mu \alpha G + \alpha \nu G^2 \quad , \quad (2)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – инерционный и вязкостный коэффициенты сопротивления пористого материала;  $\mu$  и  $\nu$  – динамический коэффициент вязкости и удельный объем жидкости;  $G$  – удельный массовый расход жидкости сквозь пористый материал.

Для часто встречающихся на практике случаев постоянного по длине пористого заполнителя среднего объемного теплосъема ( $q_v = \text{const}$ ) и постоянного по длине канала внешнего теплового потока, характеризующихся линейной зависимостью массового расходного паросодержания по длине канала  $x = (z - l)/(k - l)$ , уравнение для расчета перепада давления в пористом образце при движении сквозь него двухфазной испаряющейся парожидкостной смеси несколько упрощается [3]:

$$(P_L - P_Z)/(P_0 - P_1)_0 = \int_L^Z \Phi[x(z)] dz = (k - l) \int_0^x \Phi(x) dx = (k - l) J(x) \quad , \quad (3)$$

где  $z = Z/\delta$ ;  $l = L/\delta$ ;  $k = K/\delta$ ,  $J(x) = \int_0^x \Phi(x) dx$  – интегральная характеристика.

При этом на сегодняшний день существуют две методики или модели расчёта гидравлического сопротивления двухфазного испаряющегося потока в пористых материалах ( $P_L - P_Z$ ). 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 парожидкостных смесей в различных пористых засыпках и позволяла рассчитывать гидравлическое сопротивление при постоянном газосодержании смеси. Потом данную методику применили к движению адиабатных парожидкостных потоков в высокотеплопроводных спеченных пористых материалах [5].

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

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

$$-\frac{dP_1}{d\mathcal{K}} = \frac{\bar{b}'x'G(1-x)}{f_1}; \quad (4)$$

$$-\frac{dP_2}{d\mathcal{K}} = \frac{\bar{b}''x''G \cdot x}{f_2}; \quad (5)$$

$$P_2 - P_1 = \Delta P; \quad (6)$$

$$\varphi + s = 1, \quad (7)$$

где  $G$  – удельный массовый расход двухфазного испаряющегося потока, кг/м<sup>2</sup>·с;  $a$  – вязкостный коэффициент сопротивления;  $u\zeta m\zeta$  – удельный объем и динамическая вязкость жидкости на линии насыщения;  $u^2, m^2$  – удельный объем и динамическая вязкость пара на линии насыщения;  $x = \frac{m_p}{m_p + m_e}$  – рас-

ходное массовое паросодержание потока  $x$ ;  $P_1$  и  $P_2$  – давление жидкости и пара в окрестности границы раздела фаз;  $\Delta P$  – капиллярное давление, в данной модели принимается  $\Delta P = 0$ ;  $j$  и  $s$  – насыщенности пористого материала паровой и жидкостной фазами (объемное содержание фаз);  $f_1$  и  $f_2$  – эмпирические функции, называемые относительными фазовыми проницаемостями.

Функции  $f_1$  и  $f_2$ , согласно данной методике, зависят в основном от насыщенности жидкой фазой. Относительные фазовые проницаемости учитывают увеличение гидравлического сопротивления, возникающего 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 должны выполняться следующие условия:

$$x = 0 \quad (j = 0, \quad s = 1); \quad f_1 = 1; \quad f_2 = 0;$$

$$x = 1 \quad (j = 1, \quad s = 0); \quad f_1 = 0; \quad f_2 = 1.$$

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

$$f_1(s) = s^n; \quad (8)$$

$$f_2(s) = (1-s)^n, \quad (9)$$

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

Систему уравнений для расчета гидравлического сопротивления двухфазного парожидкостного потока в случае постоянного паросодержания при движении сквозь пористые спеченные материалы согласно методике Локкарта - Мартинелли можно записать так:

$$\left(\frac{\Delta P}{\mathbf{1}}\right)_{\text{об}} = (\Delta P/\mathbf{1})_L \cdot \Phi_L^2; \quad (10)$$

$$\left(\frac{\Delta P}{\mathbf{1}}\right)_{\text{об}} = (\Delta P/\mathbf{1})_G \cdot \Phi_G^2, \quad (11)$$

где  $(\Delta P/\mathbf{1})_L$  и  $(\Delta P/\mathbf{1})_G$  – перепады давления при прохождении через пористую структуру только жидкой фазы в количестве, содержащемся в смеси, либо только паровой. Эти величины рассчитываются по уравнению Дарси (2), в котором в качестве массовых скоростей фильтрации  $gw = G$  используются соответствующие массовые скорости фильтрации каждой из фаз. Согласно работе [4] параметры  $\Phi_L$  и  $\Phi_G$  являются функцией параметра Мартинелли  $X = \sqrt{(\Delta P/\mathbf{1})_L / (\Delta P/\mathbf{1})_G}$ . Для параметра  $X^2$  можно записать следующее выражение [5]:

$$X^2 = \left(\frac{1-x}{x}\right) \left(\frac{\mu'}{\mu''}\right) \left(\frac{\rho''}{\rho'}\right) \frac{1 + (\beta/\alpha)[G(1-x)]/\mu'}{1 + (\beta/\alpha)[G \cdot x]/\mu''} = \left(\frac{1-x}{x}\right) \left(\frac{\mu'}{\mu''}\right) \left(\frac{\rho''}{\rho'}\right) \frac{1 + Re'}{1 + Re''}. \quad (12)$$

Связь параметра  $X$  с  $F_L$  и  $F_G$  можно выразить аналитически [6], как

$$F_L^2 = 1 + C/X + 1/X^2; \quad (13)$$

$$F_G^2 = 1 + CX + X^2 . \quad (14)$$

Авторами роботи [5] в результаті обробки опытных данных было установлено, что коэффициент  $C$  является функцией массовой скорости фильтрации  $(\rho w)_0 = G$ , физических свойств ( $r\zeta$  и  $m\theta$ ) и гидравлических характеристик пористой структуры (коэффициенты  $a$  и  $b$ ), т.е.

$$C = 4,0 \left( \frac{\theta/b}{G} \cdot \frac{c'}{m'} \right)^{0,4} . \quad (15)$$

Если взглянуть на характер уравнений (4), (5) и (10), (11), описывающих гидравлическое сопротивление двухфазных парожидкостных потоков в пористых материалах, согласно методикам Маскета-Леврегетта и Локкарта-Мартинелли соответственно, то можно заметить их сходство. Различие уравнений заключается в записи поправочных коэффициентов  $f_1$ ,  $f_2$  и  $F_L^2$ ,  $F_G^2$ .

Нетрудно заметить, что коэффициент  $F_L^2 = 1/f_1$ , а коэффициент  $F_G^2 = 1/f_2$ . Однако коэффициенты  $F_L^2$  и  $F_G^2$  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 (4), (5) и (10), (11) описывают одну и ту же величину – гидравлическое сопротивление двухфазного парожидкостного потока в пористых материалах и, кроме того, зависимости для расчета параметров  $F_L^2$  и  $F_G^2$  получены экспериментальным путём, примем, что зависимости для расчета относительных фазовых проницаемостей  $f_1$  и  $f_2$  так же справедливы во всем вязкостно-инерционном режиме движения двухфазного потока.

Запишем систему уравнений для расчета коэффициентов  $F_L^2$ ,  $F_G^2$  и  $f_1$ ,  $f_2$  исходя из того, что согласно выражениям (4), (5) и (10), (11)  $F_L^2 = 1/f_1$ ,  $F_G^2 = 1/f_2$  :

$$\frac{1}{s^n} = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (16)$$

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

Как видно, (16), (17) являются системой двух нелинейных алгебраических уравнений, относительно двух неизвестных (параметров) – насыщенности  $s$  и показателя степени  $n$ .

Прологарифмируем выражение (16)

$$-n \ln s = \ln \left( 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \right), \quad (18)$$

откуда

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

Подставляя (19) в (17), получим

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

Выражение (20) 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 уравнения (20) и подстановки её в уравнение (19) можно определить числовое значение показателя степени  $n$ , соответствующее величине насыщенности и набору параметров  $X^2$  и  $C$ .

Значения параметров  $s$  и  $n$  сведены в табл. 1 и 2.

Таблиця 1

**Зависимость насыщенности пористого образца  $s$  от параметров  $X$  и  $C$  ( $X=0,01-100$ ;  $C=0,01-10000,0$ )**

Значение параметра $X$	Значения параметра $s$ при $C$						
	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

Таблиця 2

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

Значение параметра $X$	Значения параметра $n$ при $C$						
	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

Приведенные в табл. 1 и 2 данные решения системы уравнений (15), (16)  $s = f(X, C)$  и  $n = f(X, C)$  можно обобщить следующими интерполяционными уравнениями:

$$S = \frac{I}{I + X^A} ; \quad (21)$$

$$A = \frac{1,835}{I + (\frac{C}{2,1})^{-0,64}} - 2 ; \quad (22)$$

$$n = B(\ln X)^2 + D ; \quad (23)$$

$$B = [(-0,05 \ln \frac{C}{5}) / (\frac{C}{12} + \frac{12}{C})^{0,35}] - 0,02 ; \quad (24)$$

$$D = (10^3 (0,62 + 6,2 C)^{0,154} - 1,8) \quad (25)$$

Данными соотношениями можно воспользоваться при определении функций относительных фазовых проницаемостей и других параметров, необходимых для расчета перепада давления во время движения двухфазных парожидкостных потоков сквозь пористые материалы.

**Определение параметра двухфазности**

Выведем уравнение для определения параметра двухфазности в зависимости от величин  $X$  и  $C$ , определяемых по уравнениям (12) и (15) соответственно.

Учитывая соотношения (2), (10), (13), согласно приведенному выше определению, запишем уравнение для нахождения параметра двухфазности с помощью величин  $(\Delta P/L)_L$  и  $\Phi_L^2$ :

$$\Phi = \frac{\bar{b}'x'G(1-x) + \bar{v}x'G^2(1-x)^2}{\bar{b}'x'G + \bar{v}x'G^2} \left(1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2}\right). \quad (26)$$

Преобразуем уравнение (26), учитывая, что число Рейнольдса для исходного жидкостного потока

$$Re_0 = \frac{\bar{v}}{\bar{b}} \cdot G \cdot \frac{1}{m'} , \quad (27)$$

получим :

$$\Phi = \frac{(1-x)(1+Re_0(1-x))}{1+Re_0} \cdot \left(1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2}\right), \quad (28)$$

где величина  $C$  определяется по формуле (15), а  $X^2$  – по формуле (12).

С учётом того, что  $Re'' = \frac{G(\beta/\alpha)x}{\mu''} = \frac{G(\beta/\alpha)x}{\mu'} \cdot \frac{\mu'}{\mu''} = Re_0 x \frac{\mu'}{\mu''}$ , а  $Re' = Re_0(1-x)$ , выражение (12) можно записать следующим образом :

$$X^2 = \left(\frac{1-x}{x}\right) \left(\frac{m'}{m''}\right) \left(\frac{c'}{c''}\right) \left(\frac{1+Re_0(1-x)}{1+Re_0 x \frac{m'}{m''}}\right) \quad (29)$$

Используя формулы (2), (11), (14), получим для параметра двухфазности второе выражение в виде

$$\Phi = \frac{\delta m'' x'' G x + \delta x'' G^2 x^2}{\delta m' x' G + \delta x' G^2} (1 + CX + X^2) . \quad (30)$$

После несложных преобразований уравнение (30) можно привести к следующему виду :

$$\Phi = \frac{x(1+Re_0 \frac{m'}{m''} x)}{(1+Re_0)} \frac{m'' c'}{m' c''} (1 + CX + X^2) . \quad (31)$$

Как видно из выражений (28) и (30), параметр двухфазности парожидкостного потока в пористых материалах является функцией числа Рейнольдса исходного жидкостного потока  $Re_0$ , массового расходного паросодержания  $x$ , гидравлических параметров пористой структуры (вязкостного  $\alpha$  и инерционного  $\beta$  коэффициентов сопротивления пористого материала) и давления насыщения  $P_s$  потока (параметры  $\rho'$ ,  $\rho''$ ,  $\mu'$ ,  $\mu''$ ).

Рассчитанная для воды при  $P_s = 1$  атм,  $t_s = 100^\circ\text{C}$  по формуле (28) двумерная поверхность параметра двухфазности в координатах  $\Phi = f(Re_0, x)$  при значениях параметра  $\beta/\alpha = 10^{-6}; 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}$  изображена на рис. 1, а-г. Расчеты параметра двухфазности по формуле (31) приводят к тем же результатам, что и по формуле (28). При расчете перепада давления в пористом канале по формуле (3), в случае линейного изменения по длине канала массового расходного паросодержания, выражение (28) возможно проинтегрировать при постоянных значениях числа Рейнольдса потока  $Re_0$  и постоянных значениях параметра ( $\beta/\alpha$ ).

Графически интеграл  $J(x) = \int_0^x \Phi(x) dx$  при  $\beta/\alpha = 10^{-6}; 10^{-5}; 10^{-4}; 10^{-3}$  и рассчитанный для охлаждающей среды воды при  $P_s = 1$  атм. и  $t_s = 100^\circ\text{C}$ , изображен на рис. 2, а – г. Определённый интеграл  $J(x)$  вычислялся по формуле Симпсона.

### Анализ результатов

Для анализа полученных графиков (рис. 1 и 2) исследуем характер зависимостей инерционного и вязкостного коэффициентов сопротивления пористых материалов, а также отношение инерционного к вязкостному коэффициенту сопротивления в зависимости от пористости. Для примера рассмотрим хорошо исследованные металловолокнистый и металлопорошковый пористые материалы. Диапазон изменения пористости примем равным  $q = 0,3-0,9$ . Диаметр волокон и диаметр частиц металлопорошка и металловолокна примем равным  $d_e = d_i = 200 \text{ мкм} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ . Для металловолокнистого пористого материала расчетные зависимости для определения параметров  $a$  и  $b$  возьмем с работы [8]

$$a = 2,57 \cdot 10^8 q^{-3,91}, \quad (32)$$

$$b = 0,91 \cdot 10^3 q^{-5,33}, \quad (33)$$

а для металлопорошка – с работы [9]

$$a = 171(1-q)^2 d_i^{-2} q^{-3}; \quad (34)$$

$$b = 0,635(1-q) d_i^{-1} q^{-4,72}. \quad (35)$$

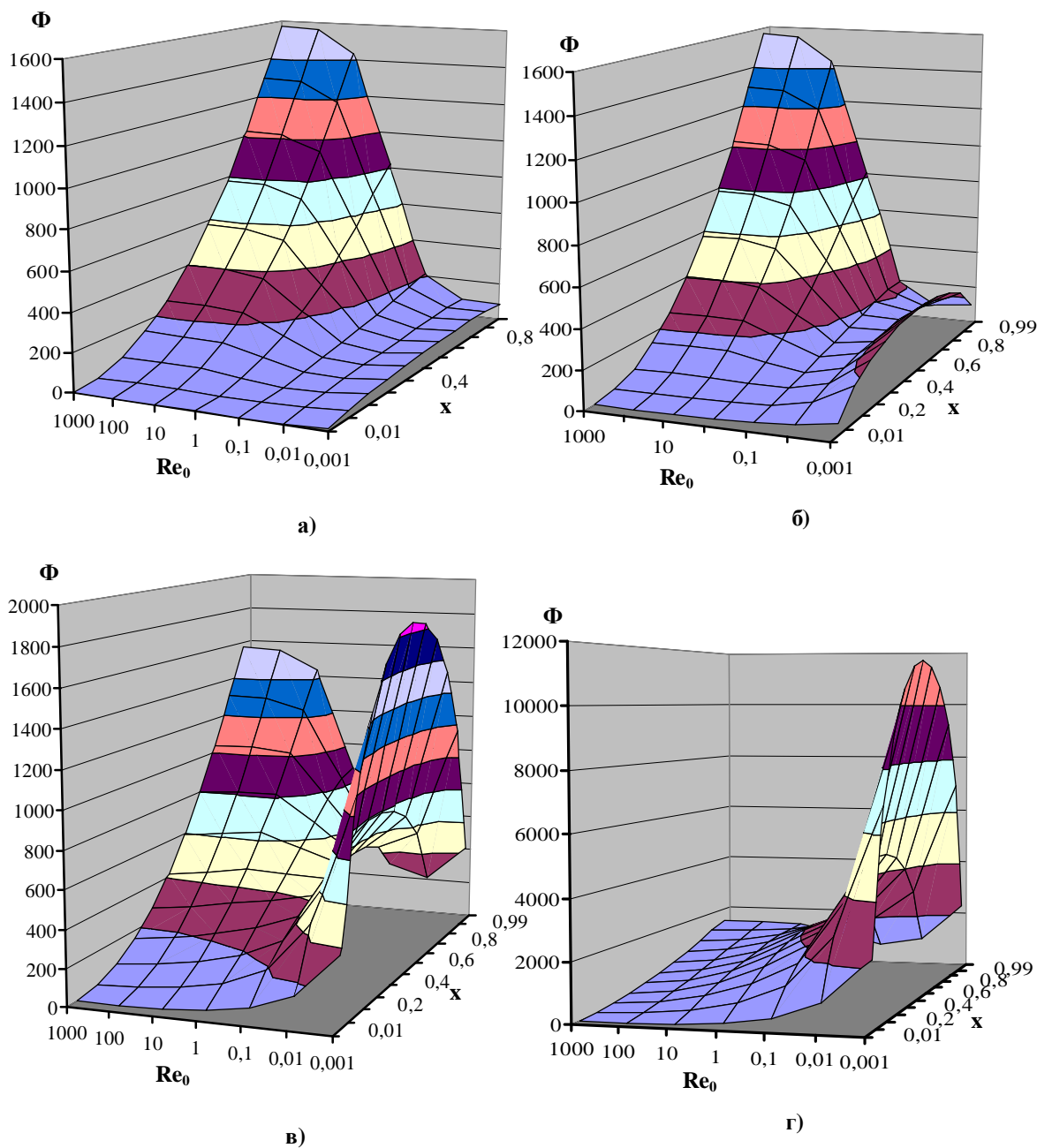


Рис. 1. Данные расчёта параметра двухфазности для воды  $\Phi = f(Re_0, x)$  в зависимости от числа Рейнольдса исходного жидкостного потока  $Re_0$  и массового расходного паросодержания потока  $x$  ( $P_s = 1$  атм,  $t_s = 100^\circ\text{C}$ ): а)  $\beta/\alpha = 10^{-6}$ ; б)  $\beta/\alpha = 10^{-5}$ ; в)  $\beta/\alpha = 10^{-4}$ ; г)  $\beta/\alpha = 10^{-3}$

Данные расчета величин  $a$ ,  $b$  и  $b/a$  для металловолокнистых и металлопорошковых материалов размещены в табл. 3, и 4 соответственно. Причём данные таблицы 4 ограничим значением пористости 0,6, поскольку согласно источнику [10] металлопорошковые пористые материалы не могут иметь пористость выше 0,6.

Таблица 3

Данные расчета коэффициентов  $a$  и  $b$ , а так же и комплекса  $b/a$  для металловолокна

Параметр	Значения коэффициентов $a$ , $b$ и параметра $b/a$ при пористости $q$						
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$a, 1/\text{м}^2$	$2,84 \cdot 10^{10}$	$9,24 \cdot 10^9$	$3,86 \cdot 10^9$	$1,89 \cdot 10^9$	$1,04 \cdot 10^9$	$6,14 \cdot 10^8$	$3,88 \cdot 10^8$
$b, 1/\text{м}$	$5,57 \cdot 10^5$	$1,20 \cdot 10^5$	$3,66 \cdot 10^4$	$1,39 \cdot 10^4$	$6,09 \cdot 10^3$	$2,99 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^3$
$b/a, \text{м}$	$1,95 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$0,95 \cdot 10^{-5}$	$0,73 \cdot 10^{-5}$	$0,59 \cdot 10^{-5}$	$0,49 \cdot 10^{-5}$	$0,41 \cdot 10^{-5}$

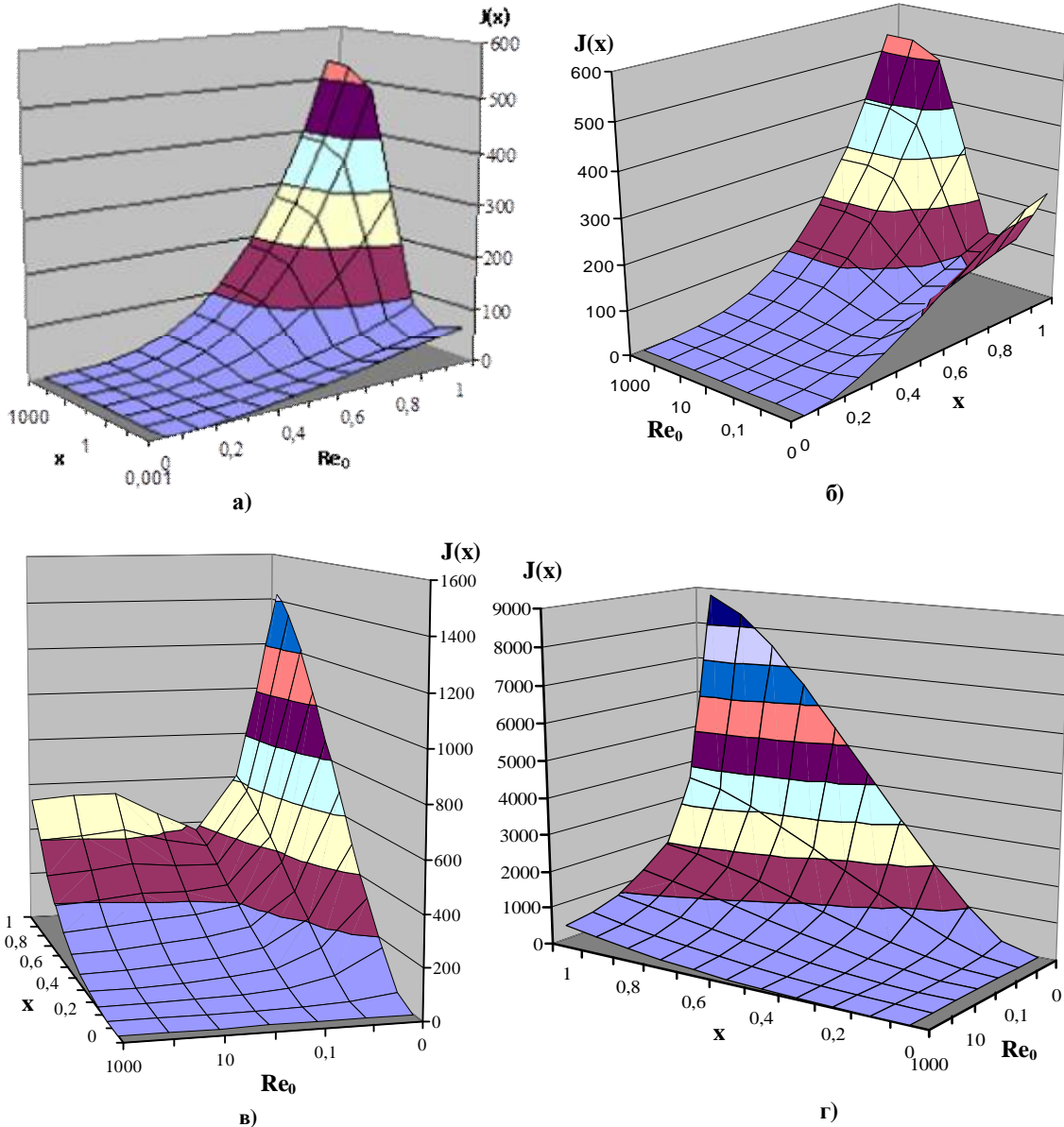


Рис. 2, а–г Данные расчёта интеграла  $J(x) = f(Re_0, x)$  для воды ( $P_s = 1$  атм,  $t_s = 100^{\circ}C$ ) в зависимости от числа Рейнольдса исходного жидкостного потока  $Re_0$  и массового расходного паросодержания  $x$ .  
 а)  $\beta/a = 10^{-6}$  ; б)  $\beta/a = 10^{-5}$  ; в)  $\beta/a = 10^{-4}$  ; г)  $\beta/a = 10^{-3}$

Таблица 4

Данные расчета коэффициентов  $a$  и  $b$  и комплекса  $b/a$  для металлопорошка

Параметр	Значения коэффициентов $a$ , $b$ и параметра $b/a$ при пористости $\varrho$			
	0,3	0,4	0,5	0,6
$a, 1/m^2$	$7,76 \cdot 10^{10}$	$2,405 \cdot 10^{10}$	$8,55 \cdot 10^9$	$3,17 \cdot 10^9$
$b, 1/m$	$6,53 \cdot 10^5$	$1,44 \cdot 10^5$	$4,18 \cdot 10^4$	$1,42 \cdot 10^4$
$b/a, m$	$8,42 \cdot 10^{-6}$	$5,99 \cdot 10^{-6}$	$4,89 \cdot 10^{-6}$	$4,47 \cdot 10^{-6}$

Если взглянуть на характер изменения параметра  $b/a$  в зависимости от пористости (табл.3, 4), то можно заметить обратно пропорциональную зависимость этих величин, т.е. с ростом пористости величина параметра  $b/a$  уменьшается. Кроме того можно отметить, что для реальных пористых материалов значения параметра  $b/a$  находятся в пределах  $4 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-5}$ . Исходя из этого и вида полученных многомерных зависимостей, представленных на рис. 1, а – г, можно сделать вывод, что для реальных пористых материалов уменьшения значений относительного перепада давления при движении двухфазной парожидкостной смеси через пористые материалы, по сравнению с движением однофазного потока, можно добиться путём уменьшения числа Рейнольдса потока на входе в канал и увеличения пористости образца, вплоть до значений 0,9. Характер зависимости графиков интегрирования параметра двухфазности



относительно паросодержания потока от основных режимно-конструктивных параметров аналогичен характеру зависимости параметра двухфазности от тех же величин.

### Выводы

В результате расчетно-аналитических исследований получены данные, характеризующие параметр двухфазности для пористых высокотеплопроводных материалов при движении сквозь них двухфазных парожидкостных потоков. На основании объединения теоретических исследований В.А. Майорова и экспериментальных Ю.А. Зейгарника и И.В. Калмыкова, а так же в результате выполненных на этой основе вычислений и построенных по их результатам графических зависимостей, можно сделать следующие выводы.

1. Параметр двухфазности для рассматриваемого случая движения двухфазного парожидкостного потока зависит от гораздо более широкого перечня параметров, чем это считалось ранее. При этом, режимно-конструктивными параметрами, от которых зависит параметр двухфазности, являются:

- число Рейнольдса исходного жидкостного потока  $Re_0$ ;
- массовое расходное паросодержание  $x$ ,
- гидравлические параметры пористой структуры (вязкостный  $\alpha$  и инерционный  $\beta$  коэффициенты сопротивления пористого материала);
- давление насыщения  $P_s$  потока (параметры  $\rho', \rho'', \mu', \mu''$ ).

2. Рост гидравлического сопротивления при движении парожидкостного потока в пористых материалах, по сравнению с однофазным движением теплоносителя, при одинаковых массовых расходах, может составлять тысячу и более раз.

3. Рост гидравлического сопротивления в пористых высокотеплопроводных каналах, при движении сквозь них двухфазных парожидкостных потоков, может быть сведён к минимуму в результате уменьшения числа Рейнольдса потока на входе в канал и увеличения пористости канала.

Полученные результаты, наряду с известным фактом значительного роста интенсивности теплообмена в пористых высокотеплопроводных каналах, по сравнению с гладкостенными каналами, в случае рассмотрения движения двухфазных испаряющихся потоков, позволят в дальнейшем провести расчётно – аналитическое исследование теплогидравлической эффективности пористых теплообменных каналов при движении сквозь них испаряющегося теплоносителя, с целью возможного применения пористых теплообменных элементов в энергетических комплексах горного оборудования.

### Список литературы

1. Майоров В.А. Структура и сопротивление двухфазного испаряющегося потока в пористых материалах / В.А. Майоров // Известия 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.: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы (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 адiabатическом 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, Sutherland L.A. // 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. – 247с.
10. Пористые проницаемые материалы: справ. изд. / Под ред. С.В. Белова. – М.: Металлургия, 1987. – 335 с.

*Рекомендовано до друку проф. Давидовим С.А.*

УДК [622.648.22:622.693.4].001.57

*Е.В. Семененко, Е.С. Лапшин, д-ра техн. наук, С.Н. Киричко*

*(Украина, г. Днепропетровск, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины)*

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗНАПОРНОГО ТЕЧЕНИЯ ПО НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ ПУЛЬПЫ С КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ПАСТЫ

Безнапорные течения пульпы с концентрацией пасты (ПКП) в технологиях обогащения минерального сырья (ТОМС) возможны по наклонной плоскости, лоткам и произвольной поверхности сложной геометрии, обладающей геодезической разностью отметок. Безнапорное течение по наклонной плоскости реали-