

УДК 532.546+532.55 621.039.542:536.24

## РАСЧЕТ ТЕЧЕНИЯ ДВУХФАЗНОЙ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ЗАСЫПКУ ШАРОВ

**В. В. Сорокин**

*Лаборатория 19,  
Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны  
НАН Беларуси, Минск*

**Введение.** Гидродинамика двухфазных потоков в засыпках частиц интенсивно исследуются в связи с перспективами применения ядерного топлива в форме шаровых тепловыделяющих элементов в активных зонах водо-водяных реакторов с водой под давлением [1], [2]. Например, замена стержневой тепловыделяющей сборки (ТВС) ВВЭР второго или третьего поколений на насыпную ТВС с микротвэлами позволяет поднять показатели безопасности установки до уровня техники четвертого поколения [2]. Для осуществления разработки актуальны знания в области гидродинамики и теплообмена в трехфазных системах, состоящих из воды, пара и засыпки шаров.

Тепловыделяющий элемент представляет собой шар диаметром 0,5–2 мм, состоящий из топливного ядра и защитной оболочки. В работе [3] были предложены зависимости для расчета потерь давления при течении двухфазных потоков через шаровые засыпки от основных характеристик потока. Было получено удовлетворительное совпадение расчетных [3] и имевшихся экспериментальных данных при абсолютных давлениях до 3,3 МПа [4]. Для ядерной энергетики интересен пароводяной теплоноситель при больших давлениях, в частности, при 8 и 16 МПа. В статье [5] приведены данные экспериментов при давлениях до 15,6 МПа. Целью работы является распространение соотношений из [3], на диапазон абсолютных давлений изученный экспериментально в [5] и исследование закономерностей движения двухфазного потока через засыпку шаров.

**Устойчивость двухфазного потока.** Рассчитаем перепад давления  $(\Delta p)_{дф}$  при двухфазном течении через засыпку на основе системы уравнений предложенной в [3]

$$(\Delta p/H)_{дф} = (\Delta p/H)_в \Phi_v^2, \quad (1)$$

$$(\Delta p/H)_{\text{дф}} = (\Delta p/H)_{\text{г}} \Phi_{\text{г}}^2, \quad (2)$$

где  $(\Delta p/H)_{\text{в}}$ ,  $(\Delta p/H)_{\text{г}}$  – перепады давления при течении через шаровую засыпку длиной  $H$  жидкой и газообразной фаз соответственно. Перепады давления устанавливаются по уравнениям однофазной фильтрации через засыпку, в котором в качестве массовых скоростей фильтрации используются скорости фильтрации  $(1-x)(\rho w)_{\text{г}}$  – для жидкой и  $x(\rho w)_{\text{г}}$  – для газовой фаз:

$$(\Delta p/H)_{\text{в}} = \alpha_{\mu}(\rho w)_{\text{г}}(1-x)\mu'/\rho' + \beta_{\rho}[(\rho w)_{\text{г}}(1-x)]^2/\rho', \quad (3)$$

$$(\Delta p/H)_{\text{г}} = \alpha_{\mu}(\rho w)_{\text{г}} x \mu''/\rho'' + \beta_{\rho}[(\rho w)_{\text{г}} x]^2/\rho''. \quad (4)$$

Здесь  $\mu$  – вязкость,  $\rho$  – плотность (штрих – жидкость, двойной штрих – газ),  $\alpha_{\mu}$ ,  $\beta_{\rho}$  – коэффициенты уравнения фильтрации, а  $\Phi_{\text{в}}$ ,  $\Phi_{\text{г}}$  – являются функцией параметра

$$X = [(\Delta p/H)_{\text{в}}/(\Delta p/H)_{\text{г}}]^{1/2}. \quad (5)$$

Связь параметра  $X$  с  $\Phi_{\text{в}}$  и  $\Phi_{\text{г}}$  определяется выражениями

$$\Phi_{\text{в}}^2 = 1 + C/X + 1/X^2, \quad (6)$$

$$\Phi_{\text{г}}^2 = 1 + CX + X^2, \quad (7)$$

$$C = [(\rho' \sigma \beta_{\rho})/(\alpha_{\mu} \mu' (\rho w)_{\text{г}} d)]^{0,3}, \quad (8)$$

$\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Данные расчета перепада давления  $\Delta p$  (индекс «дф» опускаем) на засыпке шаров диаметром  $d = 2,123$  мм, пористостью  $\varepsilon = 0,392$  по формулам (1)–(8) на рис. 1 (линия 1) сопоставлены с данными экспериментов [5],  $\alpha_{\mu} = 180(1-\varepsilon)^2/\varepsilon^3 d^2$ ,  $\beta_{\rho} = 1,5(1-\varepsilon)/\varepsilon^3 d$ . Совпадение расчетных и экспериментальных данных удовлетворительное. Такое же совпадение было получено для остальных точек [5]. Следовательно зависимости (1)–(8) пригодны для использования и в диапазоне больших абсолютных давлений водопаровой смеси. Используем их для исследования водопарового течения в шаровой засыпке.

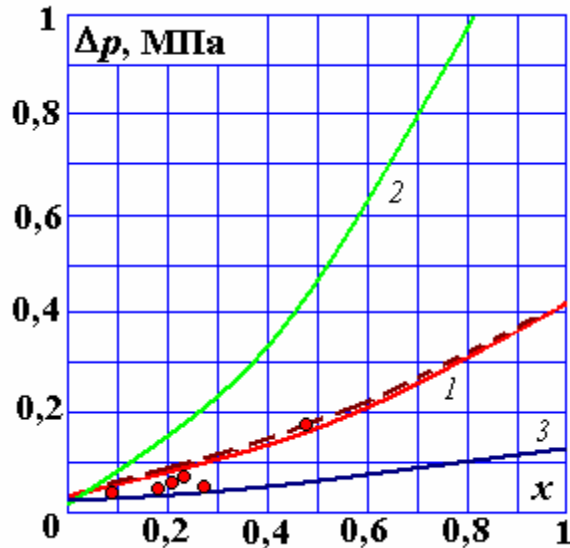


Рис. 1. Зависимость перепада давления на засыпке от расходного паросодержания:  
 1 –  $p = 9$  МПа,  $(\rho w)_f = 120$  кг/м<sup>2</sup>с; 2 –  $p = 2$  МПа,  $(\rho w)_f = 100$  кг/м<sup>2</sup>с,  $\varepsilon = 0,4$   $d = 2$  мм;  
 3 – 16 МПа; длина засыпки  $H = 0,2$  м, точки – эксперименты [5].

Из рис. 1 видно, что перепад давления монотонно увеличивается с ростом паросодержания, влияние двухфазности наиболее выражено при низких абсолютных давлениях.

Равномерное распределение пара по сечению засыпки будет устойчиво, если линия  $p(x)$  проходит ниже прямой, проведенной через точки  $p(0)$  и  $p(1)$ . Тогда любая локальная разность паросодержаний в соседних порах будет приводить к возрастанию местного сопротивления и появлению сил, стремящихся ее устранить. Режимы 1–3 приведенные на рис. 1 являются устойчивыми. Такое течение наблюдали экспериментально [6]. Пример неустойчивого режима отражен на рис. 2. Неустойчивость существует в области больших и малых расходных паросодержаний, она уменьшается с увеличением массового расхода, размера частиц и со снижением абсолютного давления. Влияние пористости оказывается малым. Визуализация неустойчивого течения демонстрирует разделение жидкой и паровой фаз в засыпке на зоны линейный размер которых превосходит величину  $d$  [7].

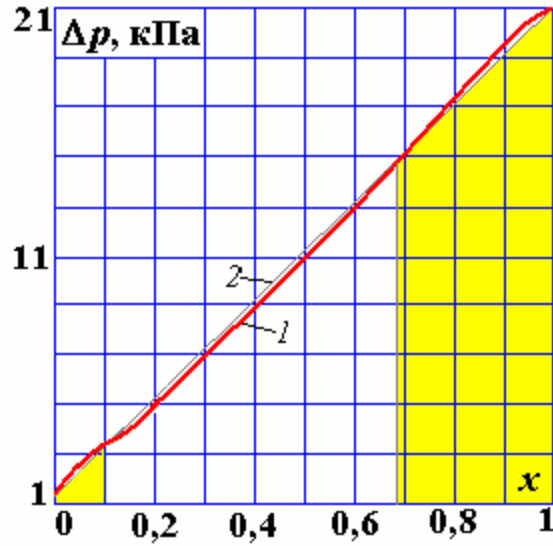


Рис. 2. Зависимость перепада давления на засыпке от расходного паросодержания:

1 –  $p = 8$  МПа,  $(\rho w)_f = 25$  кг/м<sup>2</sup>с,  $\varepsilon = 0,4$   $d = 2$  мм; 2 – прямая ( $p(0); p(1)$ );

длина засыпки 0,2 м, диапазоны  $x$ , отвечающие неустойчивому течению, выделены цветом.

Неустойчивость течения при  $x \sim 1$  должна приводить к появлению пор, заполненных только паром, и пор с водопаровой фазой при паросодержании, меньшем среднего по сечению. Эффект действительно наблюдался в экспериментах [8]. Коэффициенты теплоотдачи, измеренные при  $x = 1$ , оказались существенно выше величин, соответствующих течению насыщенного пара. Это свидетельствует о неравновесности потока, в котором присутствует небольшое количество жидкой фазы, что обуславливает рост коэффициента теплоотдачи по сравнению с равновесным течением при  $x = 1$ .

С использованием формул (1)–(8) можно представить зависимости для перепада давлений при течении через засыпку через коэффициенты негомогенности  $\psi^*$  или скольжения фаз  $s$  ( $\Delta p_{df}/\Delta p_v = 1 + \psi^* x(\rho'/\rho'' - 1)$  и  $\psi^* = (x + s(1 - x))^{-1}$  [4], где  $\Delta p_v$  вычисляются по полной величине  $(\rho w)_f$ ). Коэффициенты оказываются сложными функциями расходной скорости, паросодержания и абсолютного давления, поэтому описание течения при помощи данных коэффициентов не дает дополнительных преимуществ с точки зрения расчетной практики.

**Распределение фаз в засыпке.** Анализ, проведенный в работе [3] показал, что из ряда зависимостей [7], [9] рекомендованных для расчета перепада давления на засыпке с использованием параметра истинного объемного паросодержания  $\varphi$  двухфазного потока, наиболее адекватной является предложенная в [9]:

$$\Delta p/H = 1/k_b \{ \mu' \alpha_{\mu} u_D' + \rho' \beta_{\rho} (u_D')^2 \}, \quad (9)$$

$$\Delta p/H = 1/k_r \{ \mu'' \alpha_{\mu} u_D'' + \rho'' \beta_{\rho} (u_D'')^2 \}, \quad (10)$$

$$k_b = (1 - \varphi)^{3\Theta}, \quad (11)$$

$$k_r = a\varphi^{3\Theta}, \quad 0,6 \leq 1 - \varphi \leq 1; \quad k_r = a\varphi^2, \quad 0 \leq 1 - \varphi \leq 0,26, \quad (12)$$

$$a = ((1 - \varepsilon)/(1 - \varepsilon\varphi^{\Xi}))^{2/3}, \quad (13)$$

$$\Xi = 1, \quad \Theta = 1. \quad (14)$$

Здесь  $u_D$  – скорость, равная отношению объемного расхода фазы к площади сечения аппарата;  $k_b$ ,  $k_r$  – функции истинного объемного паросодержания  $\varphi$  и параметров засыпки. В интервале  $0,26 \leq 1 - \varphi \leq 0,6$  используется линейная интерполяция функции  $k_r(\varphi)$  формулами (11).

Расчет по уравнениям (9)–(14) для случая высоких абсолютных давлений существенно отклоняется от результатов экспериментов [5], поэтому данные выражения следует модифицировать. Поскольку при  $p/p^* \rightarrow 1$ , где  $p^*$  – критическое давление,  $\rho' \rightarrow \rho''$ , то из выражений (9), (10) должно следовать при высоких скоростях фильтрации  $k_b \rightarrow (1 - \varphi)^2$ ,  $k_r \rightarrow \varphi^2$ . Такой предел достигается, если  $\Xi \rightarrow 0$ ,  $\Theta \rightarrow 2/3$ . С учетом асимптотик, данных рис. 1 и формулы  $x = \rho'' u_D'' / (\rho'' u_D'' + \rho' u_D')$  может быть предложена следующая модификация выражения (14)

$$\Xi = 1, \quad \Theta = 1 \text{ при } p \leq 0,6 \text{ МПа}, \quad (15)$$

$$\Xi = 1 - (p/p^*)^{0,11}, \quad \Theta = (2/3)(p^*/p)^{0,11} \text{ при } p > 0,6 \text{ МПа}.$$

Совпадение пунктирной линии, построенной по уравнениям (9)–(13), (15), на рис. 1 с линией 1 иллюстрирует удовлетворительную точность выражения (15).

Используя выражения (9)–(13), (15), построим функции  $\varphi(x)$  на рис. 3. Уже при небольших величинах расходного паросодержания ( $x \sim 0,1-0,3$ ) доля свободного объема засыпки ( $1 - \varphi$ ) занимаемого водой мала. Более низким значениям абсолютного давления при постоянном массовом расходе и расходном паросодержании соответствуют большие величины истинного объемного паросодержания, влияние пористости, расходной скорости и диаметра шаров невелико.

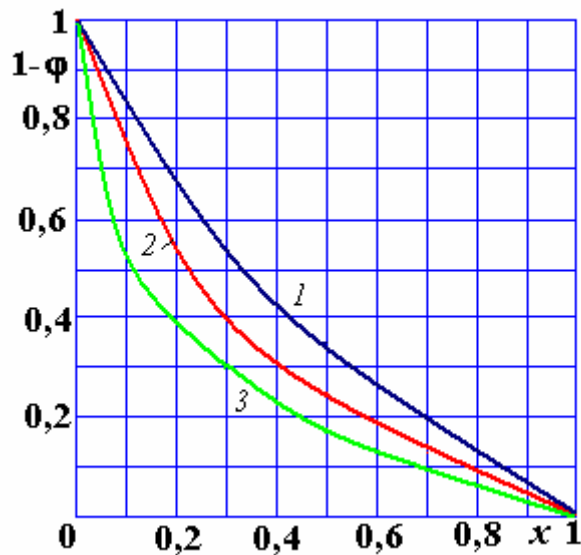


Рис. 3. Зависимость перепада давления на засыпке от расходного паросодержания: 1 –  $p = 16$  МПа,  $(\rho w)_f = 100$  кг/м<sup>2</sup>с,  $\varepsilon = 0,4$   $d = 2$  мм,  $H = 0,2$  м; 2 – 8 МПа; 3 – 2 МПа.

Для засыпок доля занимаемого жидкостью свободного объема и доля площади сечения, приходящаяся на жидкую фазу равны. Рассмотрим модельную пору  $ABC$ , образованную тремя соприкасающимися шарами, лежащими в одной плоскости (рис. 4). Жидкость локализована вблизи стенок, а пар занимает центральную часть поры [7]. Из геометрических вычислений следует, что вписанная в пору окружность 2 с центром на оси поры будет касаться поверхности шаров 1 при  $(1 - \varphi) \approx 0,56$ . Краевой угол смачивания водой материала микротвэла больше нуля, поэтому при  $(1 - \varphi) = 0,56$  пленка воды на

поверхности частицы, по крайней мере в точках касания окружностью, уже не может быть сплошной. Следовательно, при  $x > 0,1-0,3$  на поверхности частиц возникнет система сухих пятен и линий тройного контакта фаз: вода – пар – твердое тело.

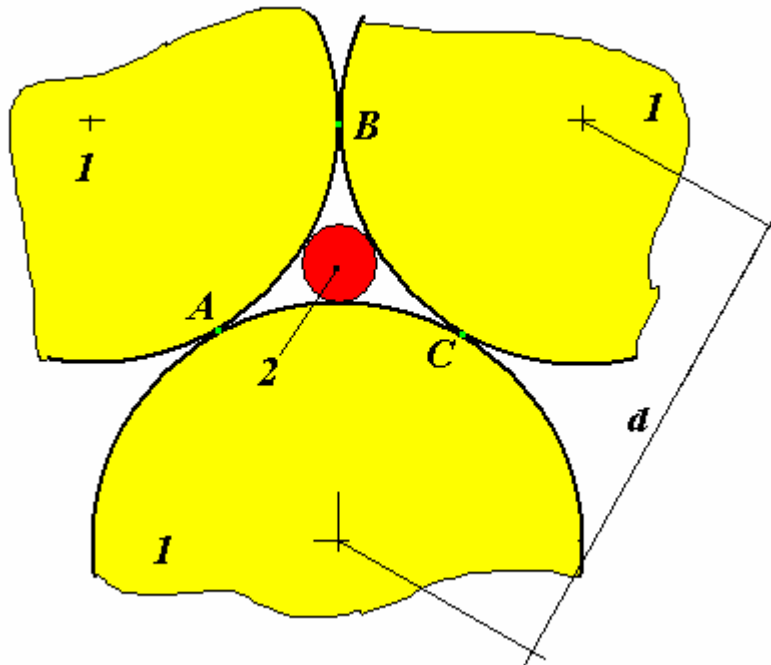


Рис. 4. Схема наиболее узкой части порового канала в засыпке:  
1 – проекции шаров; 2 – вписанный круг

**Заключение.** Предложенные уравнения позволяют рассчитывать водопаровые адиабатические течения в шаровых засыпках при абсолютных давлениях до 15,6 МПа. Равномерное по сечению засыпки распределение фаз может быть устойчивым и неустойчивым. При расходном массовом паросодержании большем  $0,1-0,3$  на поверхности частиц засыпки возникнет система линий тройного контакта фаз: вода – пар – твердое тело.

## Литература

1. Филиппов Г. А., Богоявленский Р. Г., Авдеев А. А. // Тяжелое машиностроение. 2002. № 1. С. 7–9.
2. Пономарев - Степной Н. Н., Кухаркин Н. Е., Хрулев А. А. и др.// Атомная энергия. 1999. Т. 86. Вып. 6. С. 443–449.
3. Сорокин В. В. // ТВТ. 2007. № 2. С. 261–266.
4. Авдеев А. А., Балуннов Б. Ф., Рыбин Р. А. и др. // ТВТ. 2003. Т. 41. № 3. С. 432–438.
5. Авдеев А. А., Балуннов Б. Ф., Рыбин Р. А. и др. // ТВТ. 2006. Т. 44. № 2. С. 259–267.
6. Филиппов Г. А., Меламед Л. Э., Мастюкин В. П. и др.// ТВТ. 2004. Т. 42. № 6. С. 954–960.
7. K a v i a n y M. Principles of Heat Transfer in Porous Media. N.Y., 1991. 626 p.
8. К а л м ы к о в И. В. Теплообмен и гидродинамика при движении пароводяного потока в пористых средах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ИВТ, 1987. 21 с.
9. T u n g V. X., D h i r V. K. // Int. J. Multiph. Flows. 1988. V. 14. № 1. P. 47–65.