

УДК 532.5

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-4-23-27

## Анализ моделей силового взаимодействия пара и жидкости в барботажном слое для двухскоростного описания пароводяной смеси

Д.А. Емельянов, В.И. Мелихов, О.И. Мелихов, А.А. Неровнов

Проанализировано влияние моделей силового взаимодействия пара и жидкости, разработанных для различных типов пузырьковых течений, на описание барботажного слоя. Работа выполнена в рамках стационарной одномерной двухскоростной математической модели течения пароводяной смеси, при этом скорость жидкой фазы полагалась равной нулю. На основании результатов исследований качественной картины течения в барботажном слое было сделано предположение, что для практически важных паровых нагрузок в нем реализуется эмульсионный режим течения. Полученные в результате расчетов величины сравнивали с характерными фактическими значениями для горизонтальных парогенераторов ВВЭР, при этом расчетное значение истинного объемного паросодержания в основной части барботажного слоя оказалось существенно выше экспериментального. Такая же картина получена и при других значениях приведенной скорости пара и объемного паросодержания из диапазонов, реализующихся в этих парогенераторах, причина чего заключается в моделировании силы взаимодействия пара и жидкости.

Показано, что использование указанных моделей приводит или к существенному завышению силы взаимодействия пара и жидкости и, соответственно, объемного паросодержания в барботажном слое, или к отсутствию решения при значениях параметров, характерных для работы горизонтальных парогенераторов атомных электростанций с ВВЭР. Вывод исследованных в настоящей работе корреляций основан на использовании зависимости от числа Рейнольдса коэффициента сопротивления одиночного пузырька и введении вязкости смеси, зависящей от объемной доли дисперсной фазы. При этом рассматривали установившееся течение двухфазной смеси. Существует возможность, что в парогенераторах такое установившееся течение не успевает сформироваться. Пар, входящий снизу из отверстий погруженного дырчатого листа в барботажный слой, сначала поднимается вверх в виде струи через слой жидкости. Поверхность раздела пар – жидкость, отделяющая струю пара от жидкости, может испытывать неустойчивость по механизму Кельвина – Гельмгольца. Оценки показывают, что время развития возмущений на поверхности струи существенно меньше характерного времени прохождения пара через барботажный слой, что делает возможным значительный рост возмущений вплоть до нелинейной стадии и образования сложных двухфазных структур.

*Ключевые слова:* межфазное сопротивление, барботажный слой, многофазные течения, математическое моделирование, парогенератор.

*Для цитирования:* Емельянов Д.А., Мелихов В.И., Мелихов О.И., Неровнов А.А. Анализ моделей силового взаимодействия пара и жидкости в барботажном слое для двухскоростного описания пароводяной смеси // Вестник МЭИ. 2017. № 4. С. 23—27. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-4-23-27.

## Analyzing the Interfacial Force Interaction Models in the Bubble Layer for the Two-Velocity Description of a Steam-Water Mixture

D.A. Emel'yanov, V.I. Melikhov, O.I. Melikhov, A.A. Nerovnov

The article analyzes the effect the interfacial force interaction models developed for different types of bubble flows have on the bubble layer description. The analysis is performed in the framework of a stationary 1D two-velocity mathematical model describing the flow of steam-water mixture with the liquid phase velocity assumed equal to zero. A conjecture was made based on the results from studying the qualitative flow pattern in the bubble layer that an emulsion flow mode takes place in it for practically important steam loads. The calculated values were compared with the typical actual values for horizontal steam generators used in nuclear steam supply systems built around VVER-type reactors. The calculated void fraction value in the bubble layer's main part was found to be significantly higher than the experimental values. The same picture was also obtained for other values of reduced steam velocity and void fraction in the ranges obtained in these steam generators, which is attributed to the way in which the interfacial interaction force is simulated.

It is shown that the use of the considered models leads either to a significant overestimation of the interfacial interaction force and, consequently, the void fraction in the bubble layer, or to lack of solution for the values of parameters characteristic for the horizontal steam generators of nuclear power plants equipped with VVER-type reactors. The correlations investigated in this study were derived proceeding from the flow friction coefficient of a single bubble as a function of the Reynolds number and introduction of the mixture viscosity that depends on the volume fraction of the dispersed phase. A steady flow of the two-phase mixture was considered under such conditions. Possibly, such a steady flow does not have enough time to be formed in steam generators. The steam entering from the bottom into the bubble layer through the submerged perforated sheet (SPS) holes initially ascends as a jet through the liquid layer. The steam-liquid interface separating the steam jet from the liquid may experience instability according to the Kelvin-Helmholtz mechanism. Estimates show that the time for which disturbances develop on the jet surface is

essentially shorter than the time taken for the steam to pass through the bubble layer, a circumstance due to which perturbations may grow significantly up to reaching a nonlinear stage and appearance of complex two-phase structures.

*Key words:* interfacial resistance, bubble layer, multiphase flows, mathematical modeling, steam generator.

*For citation:* Emel'yanov D.A., Melikhov V.I., Melikhov O.I., Nerovnov A.A. Analyzing the Interfacial Force Interaction Models in the Bubble Layer for the Two-Velocity Description of a Steam-Water Mixture. MPEI Vestnik. 2017; 4: 23—27. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2017-4-23-27.

## Введение

При барботаже пара через слой жидкости реализуется динамический двухфазный слой, характеристики которого зависят от приведенной скорости подаваемого пара, термодинамических и теплофизических свойств жидкости и газа и некоторых других параметров [1, 2]. Высота барботажного слоя имеет важное практическое значение, в частности для работы парогенераторов атомных электростанций (АЭС) с ВВЭР, в которых она в существенной степени определяет влажность пара, подаваемого на турбину [3]. Высота барботажного слоя при заданном массовом уровне определяется объемным паросодержанием, зависящим от силы взаимодействия пара и жидкости.

Появление расчетных теплогидравлических кодов типа RELAP5 и TRAC сделало возможным численное моделирование двухфазного динамического слоя на базе двухскоростной модели, в которой одно поле скорости используется для описания движения пара, а другое — для жидкости. Качество численного моделирования такой системы в решающей степени определяется наборами корреляций для описания межфазного взаимодействия в различных режимах течения двухфазного потока.

Согласно [1, 2] объемное паросодержание по высоте барботажного слоя практически постоянно и только в его небольшой части, примыкающей к выходу в паровое пространство, возрастает до единицы. Для парогенераторов АЭС с ВВЭР в штатных режимах величина объемного паросодержания в основной части барботажного слоя, начинающегося над погруженным дырчатым листом и заканчивающегося на зеркале испарения, находится в районе 0,25 ... 0,4 [3].

В настоящей работе в рамках двухскоростной математической модели барботажного слоя проанализировано влияние моделей силы взаимодействия пара и жидкости на величину объемного паросодержания в основной части барботажного слоя. Поскольку объемное паросодержание в этой части слоя постоянно по высоте, то взят случай однородного распределения паросодержания.

## Двухскоростная модель барботажного слоя

Рассмотрена стационарная одномерная двухскоростная математическая модель барботажного слоя. Вертикальная координата  $z$  направлена вверх против силы тяжести. Скорость жидкой фазы полагается равной нулю.

В данной постановке уравнение сохранения массы пара имеет вид

$$d(\varphi w_2)/dz = 0. \quad (1)$$

Здесь  $\varphi$  — объемное паросодержание;  $w_2$  — скорость пара.

Из уравнения (1) следует

$$\varphi w_2 = \text{const} = w_{20}, \quad (2)$$

где  $w_{20}$  — приведенная скорость пара.

Уравнения импульсов фаз выглядят как

$$\rho_2 \frac{d(\varphi w_2^2)}{dz} + \varphi \frac{dP}{dz} = -\rho_2 \varphi g - F_{12}; \quad (3)$$

$$(1 - \varphi) \frac{dP}{dz} = -\rho_1 (1 - \varphi) g + F_{12}. \quad (4)$$

Здесь  $\rho_1, \rho_2$  — плотности жидкости и пара, которые полагаются постоянными;  $P$  — давление;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $F_{12}$  — сила взаимодействия пара и жидкости.

Из уравнений (2) — (4) выведем

$$\rho_2 w_{20} \frac{dw_2}{dz} + \frac{dP}{dz} = -[\rho_1 (1 - \varphi) + \rho_2 \varphi] g; \quad (5)$$

$$\rho_2 w_{20} \frac{dw_2}{dz} + \varphi \frac{dP}{dz} = -\rho_2 \varphi g - F_{12}. \quad (6)$$

Комбинируя уравнения (2), (5), (6), получим уравнение для объемного паросодержания

$$\frac{d\varphi}{dz} = \frac{\varphi^2 [\Delta\rho\varphi(1 - \varphi)g - F_{12}]}{\rho_2 w_{20}^2 (1 - \varphi)}. \quad (7)$$

Здесь  $\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2$ .

Запишем силу взаимодействия пара и жидкости в виде [4]:

$$F_{12} = \frac{3}{4} \frac{C_D}{d} \rho_1 \varphi w_2^2, \quad (8)$$

где  $C_D$  — коэффициент сопротивления;  $d$  — характерный размер пузырька пара.

## Межфазное взаимодействие

Барботаж пара через слой воды протекает в различных режимах в зависимости от паровой нагрузки, термодинамических и теплофизических свойств паровой и жидкой фаз, которые определяются давлением в системе. В [5] показано несколько режимов относительного течения дисперсной фазы (пара) в жидкой фазе:

- вязкий режим (движение системы сферических пузырьков в жидкости);

- режим течения системы деформированных пузырьков;
- эмульсионный режим.

Последний характеризуется активным взаимодействием всплывающих пузырьков, при котором возможны захваты одних пузырьков следами других. Эмульсионный режим работает в широком диапазоне объемного паросодержания. Так, в [6] этот диапазон определен как 0,3 ... 0,8; в [5] значение его нижней границы принимается около 0,3, а верхней — вплоть до  $\varphi = 1$ .

На основании результатов исследований качественной картины течения в барботажном слое [1, 2] можно предположить, что для практически важных паровых нагрузок в нем реализуется эмульсионный режим течения. Для него в [5] получено следующее выражение для коэффициента сопротивления:

$$C_D = \frac{8}{3}(1-\varphi)^2. \quad (9)$$

В [5] характерный размер паровых образований  $d$  определяется критерием по числу Вебера, основанным на скорости дрейфа  $V_{dj}$ :

$$d = \frac{(\rho_1 V_{dj}^2 d)}{\sigma} = 8. \quad (10)$$

Для скорости дрейфа в этом режиме в [5] предложена формула

$$V_{dj} = \sqrt{2} \left( \frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_1^2} \right)^{1/4}. \quad (11)$$

Из соотношений (10), (11) следует

$$d = 4 \left( \frac{\sigma}{g \Delta \rho} \right)^{1/2}, \quad (12)$$

т. е. характерный размер пузыря в эмульсионном режиме равен четырем капиллярным постоянным.

Из соотношений (9), (12) можно получить следующие соотношения:

$$\frac{C_D}{d} = \frac{2(1-\varphi)^2}{3b}; \quad (13)$$

$$b = \left( \frac{\sigma}{g \Delta \rho} \right)^{1/2}, \quad (14)$$

где  $b$  — капиллярная постоянная.

В результате из (8) и (13) получается следующее выражение для силы взаимодействия пара и жидкости:

$$F_{12} = \frac{\varphi(1-\varphi)^2 \rho_1 w_2^2}{b \cdot 2}. \quad (15)$$

### Определение объемного паросодержания

Подставим выражение (15) в (7):

$$\frac{d\varphi}{dz} = \frac{\varphi^2 \left[ \Delta \rho \varphi (1-\varphi) g - \rho_1 \varphi (1-\varphi)^2 w_2^2 / (2b) \right]}{\rho_2 w_{20}^2 (1-\varphi)}. \quad (16)$$

Заменяя в (16) скорость пара с помощью выражения (2), получим замкнутое уравнение для объемного паросодержания

$$\frac{d\varphi}{dz} = \frac{\varphi^2 \left[ \Delta \rho \varphi (1-\varphi) g - \rho_1 \varphi (1-\varphi)^2 w_2^2 / (2b) \right]}{\rho_2 w_{20}^2 (1-\varphi)}. \quad (17)$$

Рассмотрим случай однородного по высоте барботажного слоя, характерного для основной части реального слоя. Предварительно введем следующие безразмерные комплексы:

$$A = \frac{\rho_2 w_{20}^2}{2g \Delta \rho b}; \quad (18)$$

$$B = \rho_1 / \rho_2. \quad (19)$$

Безразмерный комплекс  $A$  выражает отношение кинетической энергии пара на зеркале испарения к избыточной потенциальной энергии воды на перепаде высот, равном капиллярной постоянной. Безразмерный комплекс  $B$  равен отношению плотностей фаз.

Введя безразмерный параметр  $C = AB$ , получим из (17) следующее уравнение для однородного барботажного слоя:

$$\varphi^2 + C\varphi - C = 0, \quad (20)$$

решение которого имеет вид

$$\varphi = \frac{\sqrt{C^2 + 4C} - C}{2}. \quad (21)$$

Несложно показать, что найденное значение объемного паросодержания в барботажном слое меньше единицы при любом значении  $C$ .

Для типичных значений давления 7 МПа и приведенной скорости пара 0,26 м/с в парогенераторах АЭС с ВВЭР величина параметра  $C = 2,27$  и объемное паросодержание  $\varphi = 0,75$ . Полученное значение объемного паросодержания в основной части барботажного слоя существенно выше экспериментального значения  $\varphi \approx 0,3$  [2, 7]. Подобная картина наблюдается и при других значениях приведенной скорости пара и объемного паросодержания из диапазонов, реализуемых в этих парогенераторах.

Единственная причина такого большого расхождения заключается в моделировании силы взаимодействия пара и жидкости. Введем коэффициент  $k$  в формулу (15) для силы взаимодействия пара и жидкости:

$$F_{12} = \frac{\varphi(1-\varphi)^2 \rho_1 w_2^2}{kb \cdot 2}. \quad (22)$$

Тогда уравнение (20) примет вид

$$\varphi^2 + \frac{C}{k} \varphi - \frac{C}{k} = 0. \quad (23)$$

Уравнение (23) имеет следующее решение:

$$\varphi = \frac{\sqrt{C^2 + 4kC} - C}{2k}. \quad (24)$$

Из (24) следует, что при значении коэффициента  $k = 17,6$  величина объемного паросодержания в барботажном слое при рассматриваемых условиях ( $P = 7$  МПа;  $w_{20} = 0,26$  м/с) примет экспериментальное значение  $\varphi = 0,3$ . Таким образом, следует уменьшить силу взаимодействия пара и жидкости в 17,6 раза, чтобы расчетное значение объемного паросодержания в барботажном слое стало равно экспериментальному. Такая же качественная картина наблюдается и при других типичных значениях рабочих параметров парогенераторов АЭС с ВВЭР.

При использовании для описания межфазного взаимодействия других зависимостей из [5], разработанных для течения сферических пузырьков в жидкости или для течения деформированных пузырьков в жидкости, решение уравнения (7) с нулевой левой частью (случай однородного барботажного слоя) возможно только при малых паровых нагрузках ( $w_{20} < 0,26$  м/с). Это означает, что возникающая при больших паровых нагрузках сила взаимодействия пара и жидкости в этих режимах становится настолько большой, что пар уносит с собой жидкость и делает невозможным существование стационарного барботажного слоя в этих условиях.

В [5] в явном виде не приведены условия, при которых справедливы разработанные корреляции, представлены лишь результаты их верификации на экспериментальных данных. При этом для подробно рассмотренного в настоящей статье эмульсионного режима использованы данные [8], полученные для барботажа воздуха в водном растворе  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  в барботажных колонках диаметром от 7,7 до 60 см при атмосферном давлении. Результаты этой верификации показаны на фигуре 16 работы [5] в виде зависимости объемного паросодержания от приведенной скорости воздуха. Диапазон приведенной скорости воздуха в данных экспериментах составлял 0,5 ... 22 см/с. Наблюдалось систематическое превышение на 20 ... 40 % расчетных значений объемного паросодержания относительно экспериментальных величин. Для условий барботажа пара в парогенераторах АЭС с ВВЭР это расхождение становится еще больше.

## Заключение

Таким образом, использование корреляций для силы межфазного взаимодействия, разработанных для различных типов пузырьковых течений в [5], при расчетах барботажного слоя на основе двухскоростной модели двухфазной среды приводит или к существенному завышению значения объемного паросодержания, или к отсутствию решения при значениях параметров, характерных для работы парогенераторов АЭС с ВВЭР.

Вывод корреляций в [5] основан на использовании зависимости от числа Рейнольдса коэффициента со-

противления одиночного пузырька и введении вязкости смеси, зависящей от объемной доли дисперсной фазы. При этом рассматривается установившееся течение двухфазной смеси. Возможно, в парогенераторах такое установившееся течение не успевает сформироваться. Пар, входящий снизу из отверстий погруженного дырчатого листа в барботажный слой, сначала поднимается вверх в виде струи через слой жидкости. Поверхность раздела пар – жидкость, отделяющая струю пара от жидкости, может испытывать неустойчивость по механизму Кельвина – Гельмгольца. Оценки показывают, что время развития возмущений на поверхности струи существенно меньше характерного времени прохождения пара через барботажный слой, что делает возможным значительный рост возмущений вплоть до нелинейной стадии и образования сложных двухфазных структур.

Кратко затронем вопрос применения системных теплогидравлических кодов типа TRAC, RELAP5 для расчета барботажного слоя. Сила межфазного взаимодействия в этих кодах определяется в зависимости от режима течения, который, в свою очередь, выбирается по значениям объемного паросодержания и массовой скорости двухфазной среды. Объемное паросодержание в барботажном слое парогенератора ВВЭР около 0,3 ... 0,4. Для расчетов такими кодами силы межфазного взаимодействия в этом интервале используется интерполяция различного вида с использованием формул для малых (пузырьковый режим) и больших паросодержаний (дисперсно-кольцевой режим), что оставляет открытым вопрос механистического описания межфазного взаимодействия. Кроме того, такими кодами выполняются расчеты теплогидравлики всей реакторной установки, включая первый и второй контуры. При этом на барботажный слой приходится всего 2 ... 3 расчетные ячейки, что, безусловно, недостаточно для численного воспроизведения его структуры и высоты. Также следует отметить, что разностным схемам первого порядка, применяемым в таких кодах, присуще свойство численной диффузии, которая может «размазывать» при численном решении структуру слоя. Все эти обстоятельства говорят о том, что данный вопрос заслуживает отдельного исследования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (научные проекты № 16-38-00283 мол\_а, № 14-08-00388) и Министерства образования и науки РФ (гос. задание № 13.1544.2014/К).

## Литература

1. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. М.: Энергия, 1976.
2. Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. М.: Высшая школа, 1986.
3. Трунов Н.Б., Логвинов С.А., Драгунов Ю.Г. Гидродинамические и теплохимические процессы в

парогенераторах АЭС с ВВЭР. М.: Энергоатомиздат, 2001.

4. **Ishii M., Hibiki T.** Thermo-fluid Dynamics of Two-Phase Flow. N.-Y.: Springer, 2006.

5. **Ishii M., Zuber N.** Drag Coefficient and Relative Velocity in Bubbly, Droplet or Particulate Flows // *AIChE J.* 1979. V. 25. No. 5. Pp. 843—855.

6. **Лабунцов Д.А., Ягов В.В.** Механика двухфазных систем. М.: Изд-во МЭИ, 2000.

7. **Блинков В.Н. и др.** Влияние объемного паросодержания на гидравлическое сопротивление погруженного дырчатого листа // *Теплоэнергетика.* 2015. № 7. С. 24—29.

8. **Yoshida F., Akita K.** Performance of Gas Bubble Columns: Volumetric Liquid-Phase Mass Transfer Coefficient and Gas Holdup // *AIChE J.* 1965. V. 11. No. 9. Pp. 938—949.

## References

1. **Kutateladze S.S., Styrikovich M.A.** *Gidrodinamika Gazozhidkostnyh Sistem.* М.: Energija, 1976. (in Russian).

2. **Kutepov A.M., Sterman L.S., Stjushin N.G.** *Gidrodinamika i Teploobmen pri Paroobrazovanii.* М.: Vysshaja Shkola, 1986. (in Russian).

3. **Trunov N.B., Logvinov S.A., Dragunov Ju.G.** *Gidrodinamicheskie i Teplohimicheskie Processy v Parogeneratorah AES s VVER.* М.: Energoatomizdat, 2001. (in Russian).

4. **Ishii M., Hibiki T.** Thermo-fluid Dynamics of Two-Phase Flow. N.-Y.: Springer, 2006.

5. **Ishii M., Zuber N.** Drag Coefficient and Relative Velocity in Bubbly, Droplet or Particulate Flows. *AIChE J.* 1979;25;5:843—855.

6. **Labuncov D.A., Jagov V.V.** *Mehanika Dvuhfaznyh Sistem.* М.: Изд-во МЭИ, 2000. (in Russian).

7. **Blinkov V.N. i dr.** Vlijanie Obemnogo Parosoderzhaniya na Gidravlichesкое Soprotivlenie Pogruzhennogo Dyrchatogo Lista. *Teploenergetika.* 2015;7:24—29. (in Russian).

8. **Yoshida F., Akita K.** Performance of Gas Bubble Columns: Volumetric Liquid-Phase Mass Transfer Coefficient and Gas Holdup. *AIChE J.* 1965;11;9:938—949. (in Russian).

## Сведения об авторах

**Емельянов Дмитрий Алексеевич** — инженер кафедры атомных электрических станций НИУ «МЭИ»

**Мелихов Владимир Игорьевич** — доктор технических наук, профессор кафедры атомных электрических станций НИУ «МЭИ»

**Мелихов Олег Игорьевич** — доктор физико-математических наук, зам. директора по научной работе АО «Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций», профессор кафедры атомных электрических станций НИУ «МЭИ», e-mail: oleg.melikhov@erec.ru

**Неровнов Алексей Александрович** — кандидат технических наук, ведущий инженер кафедры атомных электрических станций НИУ «МЭИ», e-mail: nerovnov\_alexey@mail.ru

## Information about authors

**Emel'yanov Dmitriy A.** — Engineer of Nuclear Power Plants Dept., NRU MPEI

**Melikhov Vladimir I.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Nuclear Power Plants Dept., NRU MPEI

**Melikhov Oleg I.** — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Deputy Director of Scientific Work of Electrogorsk Research Centre for the Safety of Nuclear Power Plants, Professor of Nuclear Power Plants Dept., NRU MPEI, e-mail: oleg.melikhov@erec.ru

**Nerovnov Aleksey A.** — Ph.D. (Techn.), Leading Engineer of Nuclear Power Plants Dept., NRU MPEI, e-mail: nerovnov\_alexey@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 19.05.2016*