

УДК 532.529.5

Теплообмен в восходящем пузырьковом течении в вертикальной сборке стержней*

М.А. Воробьев

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: vorobyev@itp.nsc.ru

Известно, что введение газовой фазы в поток жидкости приводит к перестроению структуры течения и может существенно изменить ключевые теплогидравлические параметры течения, например, коэффициент теплообмена. В представленной работе приведены результаты экспериментального исследования восходящего пузырькового потока в вертикальной сборке стержней 3×3 . В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода. Эксперимент проводился при числах Рейнольдса от 4000 до 11000 и среднерасходных газосодержаниях от 3 до 10 %. В результате эксперимента были определены коэффициенты теплообмена от нагреваемого электрическим током центрального стержня к потоку и показано, что наибольшее влияние на теплообмен газовые включения оказывают при малых числах Рейнольдса и максимальном удалении от дистанцирующей решетки.

Ключевые слова: двухфазное течение, газосодержание, пузырек, теплообмен, сборка вертикальных стержней, дистанцирующая решетка.

Введение

Двухфазные газожидкостные течения относятся к одному из наиболее интенсивно развивающихся разделов механики и теплообмена многофазных систем. Наличие информации о структуре, осредненных и пульсационных характеристиках пузырьковых потоков необходимо при проектировании современных энергоустановок.

Исследования термогидравлических характеристик течений в моделях тепловыделяющих сборок проводятся во многих отечественных и зарубежных лабораториях. В работах [1, 2] проводилось экспериментальное исследование турбулентной структуры потока в сборке стержней, было показано влияние шага сборки на обмен массой и энергией между ячейками. В статье [3] анализировалось множество исследований, в которых изучалось падение давления в сборках стержней различной геометрии. Структура поля скорости детально исследовалась в работе [4] на крупномасштабном аэродинамическом стенде, имитирующем сборку квадратной геометрии, было продемонстрировано влияние различных дистанцирующих и перемешивающих решеток на параметры течения. В работе [5] так же при течении в сборке стержней было показано, что относительные значения осредненной и пульсационной скоростей зависят от расстояния до дистанцирующей решетки и не зависят от числа Рейнольдса. Работа [6] посвящалась исследованию теплообмена от стержня в сборке к потоку при течении однофазного теплоносителя. Было

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

показано существенное влияние свободной конвекции на теплообмен в области за дистанцирующей решеткой. В исследовании [7] демонстрировалось влияние решеток различных конфигураций на теплообмен, был предложен ряд корреляций для решеток специфической формы. Большое количество экспериментальных работ, посвященных исследованию течений однофазного теплоносителя в сборках, гарантирует надежную проверку результатов теоретических и численных исследований, как, например, работы [8, 9].

При определенных режимах работы ядерных энергетических установок, а также при аварийных ситуациях, связанных с падением расхода теплоносителя, может происходить интенсивное вскипание. В работах [10–12] было показано, что наличие пузырей в потоке жидкости приводит к изменению ключевых теплогидравлических характеристик течения, таких как гидравлическое сопротивление или коэффициенты теплообмена. Таким образом, актуальность исследований пузырьковых течений в каналах, имитирующих сборки стержней, диктуется вопросами безопасности. Количество публикаций, посвященных исследованию теплообмена в двухфазных пузырьковых течениях достаточно ограничено. К ним относятся работы [13, 14] по измерению гидродинамических и теплообменных параметров пузырькового течения в наклонном плоском канале. Следует отметить также ряд работ [15–18], направленных на исследование пузырьковых потоков в сборках стержней. Однако в них основное внимание уделялось определению локального газосодержания и скорости газовых включений, а также влиянию на эти параметры дистанцирующих и перемешивающих решеток. Информация об исследованиях, посвященных изучению непосредственно теплообмена между двухфазной пузырьковой средой и стержнем тепловыделяющей сборки, в литературе отсутствует.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния газосодержания на теплообмен в пузырьковом потоке в вертикальной сборке стержней 3×3 квадратной компоновки.

Экспериментальная установка и методика эксперимента

Принципиальная схема экспериментальной установки изображена на рис. 1. Установка представляет собой замкнутый по жидкости и разомкнутый по газу контур. Из насоса 1 рабочая жидкость подается в канал 2 — трубу квадратного сечения из оргстекла шириной 40 мм и длиной 1800 мм. В канале с помощью трех дистанцирующих решеток удерживаются 9 стержней диаметром 9,1 мм. Центральный стержень представляет собой тонкостенную трубку из нержавеющей стали, в которую вмонтирован датчик. Схема поперечного сечения рабочего канала приведена на рис. 2. Черным кружком здесь отмечено положение датчика, серым цветом окрашена дистанцирующая решетка, b — расстояние между центрами стержней в сборке, d — диаметр стержня.

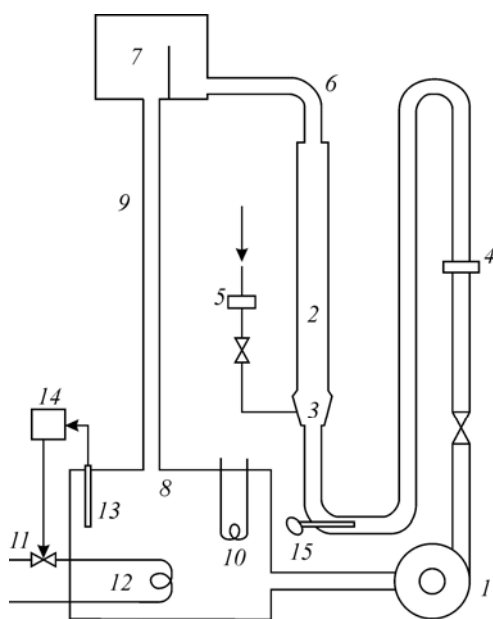
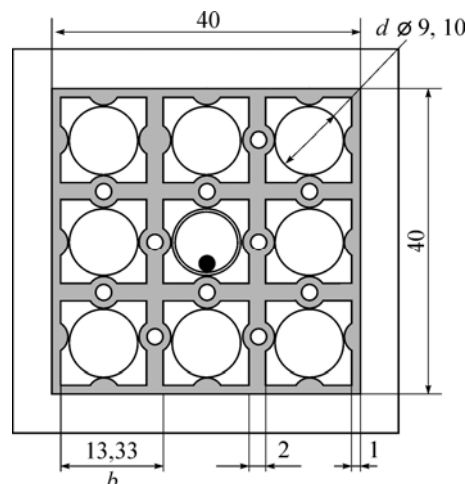


Рис. 1. Схема установки.

- 1 — насос, 2 — рабочий канал, 3 — газовый дистрибьютер, 4 — расходомерная диафрагма, 5 — газовая расходомерная шайба, 6 — пластиковая трубка, 7 — бак-сепаратор, 8 — основной бак, 9 — возвратная труба, 10 — нагреватель, 11 — клапан, 12 — змеевик, 13 — термопара, 14 — измеритель-регулятор 2TRM1, 15 — термометр сопротивления.

Рис. 2. Схема сечения канала.
Размеры указаны в миллиметрах.



В нижней части канала установлен газовый инжектор 3, генерирующий пузыри. Газо-жидкостный смеситель представляет собой форкамеру внутренним диаметром 150 мм, в которую через 17 капилляров внутренним диаметром 0,2 мм подавался газ. Можно считать, что происходит свободный отрыв пузырей от капилляров, так как скорость жидкости в смесителе мала. Расход жидкости определялся по перепаду давления на расходомерной диафрагме 4. Перепад давления измерялся дифференциальным преобразователем давления Метран 100 ДД. Предварительная калибровка расходомерной диафрагмы осуществлялась весовым методом. Расход газа также определяется по перепаду давления на газовой расходомерной шайбе 5, перепад давления измерялся преобразователем давления Метран 100 ДД. Калибровка расходомерной диафрагмы проводилась при помощи барабанного счетчика газа с водяным затвором (ГСБ-400). Газо-жидкостная смесь с выхода рабочего канала через гибкую пластиковую трубу 6 подавалась в бак-сепаратор 7, где происходило разделение фаз. Далее жидкость сливалась в основной бак 8 по возвратной трубе 9. При помощи системы термостабилизации, состоящей из нагревателя 10, клапана 11, змеевика 12, термопары 13 и измерителя-регулятора 2ТРМ1 14, температура жидкости в баке поддерживалась постоянной и была равна $22 \pm 0,1$ °С. Для контроля за температурой жидкости на входе в рабочий канал в трубу был вмонтирован термометр сопротивления (ДТС105ЭД6-50М.В3.80) 15. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода.

Эксперимент проводился при приведенных скоростях жидкости V_L в диапазоне от 0,4 до 1 м/с, что соответствует числам Рейнольдса $Re = 4000 - 11000$ ($Re = \rho V_L D_r / \eta$).

Гидравлический диаметр определялся как отношение четырех площадей сечения канала к его периметру $D_r = 4S/P = 9,7$ мм. Газосодержание β определялось как $\beta = V_G / (V_G + V_L)$, где V_G — приведенная скорость газа. В процессе эксперимента газосодержание варьировалось в диапазоне от 3–10 %

Теплообмен исследовался на участке, представляющем собой тонкостенную трубку внешним диаметром 9 мм с толщиной стенки 0,5 мм, изготовленную из нержавеющей стали (рис. 3). К внутренней поверхности трубки плотно прижат миниатюрный ($2 \times 2 \times 1$ мм) платиновый резистивный датчик температуры (700-102ВАА-В00) с сопротивлением 1 кОм при температуре 0 °С.

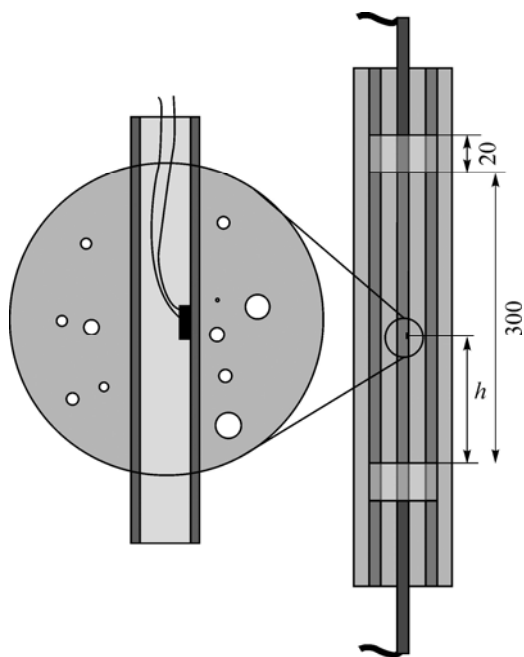


Рис. 3. Схема рабочего участка.
Размеры указаны в миллиметрах.

Трубка может смещаться вверх и вниз, что позволяет изменять расстояние от датчика до дистанцирующей решетки, лежащей ниже по потоку. Датчик ориентирован в соответствии с рис. 2. С помощью медных трубок к участку подводится электрический ток (до 200А), который измерялся с помощью лабораторного трансформатора тока (Т-0.66) и амперметра. Во время эксперимента ток поддерживался постоянным, и таким образом реализовывалось граничное условие постоянного теплового потока на стенке ($q = \text{const}$). Зная подводимую к рабочему участку мощность и температуру стенки, можно найти коэффициент теплообмена $\alpha = q/\Delta T$, где $\Delta T = T_{c1} - T_{ж}$ — температурный напор (разность температур внешней стенки нагреваемой трубки и натекающего потока жидкости). Все измерения проводились при температурном напоре $\Delta T \approx 10^\circ\text{C}$. Плотность теплового потока вычислялось как $q = I^2 R/s$, где R — сопротивление трубки из нержавеющей стали, s — площадь трубки, I — пропускаемый через рабочий участок ток. Число Нуссельта определялось как $Nu = \alpha D_r/\lambda$, где λ — теплопроводность воды. Описанная выше методика применялась в работах [19, 20].

Так как датчик температуры был прижат к внутренней стенке измерительного участка и измерял ее температуру T_{c2} , а теплообмен определяется температурой внешней стенки T_{c1} измерительного участка, то, следовательно, необходимо учесть систематическую погрешность измерений. Разницу температур можно оценить, решив задачу теплопроводности для цилиндрической стенки с равномерно распределенными в ней источниками тепла и тепловыделением через внешнюю стенку [21]

$$T_{c1} - T_{c2} = \frac{qr_1}{2\lambda_c} \left(1 - \frac{2r_2^2}{r_1^2 - r_2^2} \ln \frac{r_1}{r_2} \right), \quad (1)$$

где λ_c — теплопроводность трубки из нержавеющей стали, r_1 и r_2 — внешний и внутренний радиусы трубки соответственно. Поправка учитывалась при вычислении коэффициентов теплообмена.

Результаты экспериментов

Для проверки методики и измерительной системы были проведены измерения в однофазном потоке на большом удалении датчика от дистанцирующей решетки. Результаты показали соответствие (рис. 4) интенсивности теплообмена с корреляцией Вейсмана для потока в сборке стержней [22]:

$$Nu_0 = (0,042 \cdot b/d - 0,024) Re^{0,8} Pr^{0,33}. \quad (2)$$

Отклонение экспериментальных данных от теоретической кривой не превышает 5 %.

На рис. 5 представлены результаты измерений теплообмена в зависимости от числа Рейнольдса для различных расходных газосодержаний. Датчик температуры находился на 250 мм ($h/D_r = 25,77$, здесь h — расстояние от дистанцирующей решетки, D_r — гидравлический диаметр рабочего канала) выше дистанцирующей решетки. По оси

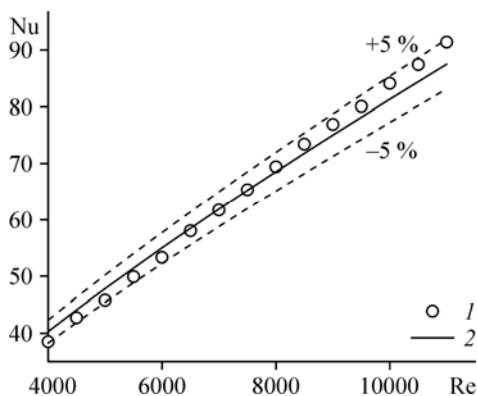


Рис. 4. Сравнение теплообмена в однофазном потоке с корреляцией Вейсмана (2).
1 — данные эксперимента при $h = 250$ мм,
2 — корреляция Вейсмана (2).

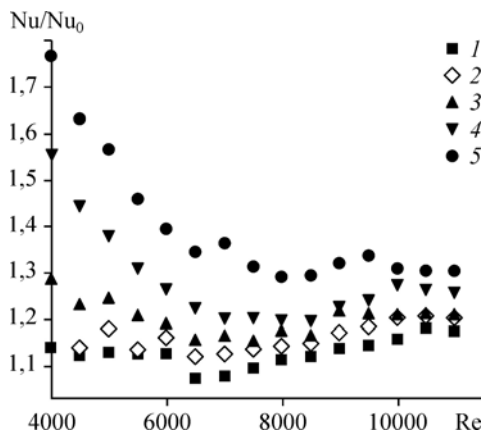


Рис. 5. Зависимости отношения Nu/Nu_0 от числа Рейнольдса при различных газосодержаниях.

$h = 250$ мм; 1–5 — данные измерений при $\beta = 3, 4, 5, 7, 10$ % соответственно.

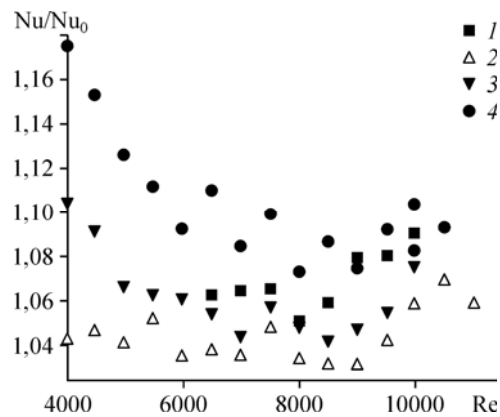


Рис. 6. Зависимости отношения Nu/Nu_0 от числа Рейнольдса при различных газосодержаниях.

$h = 60$ мм; 1–4 — данные измерений при $\beta = 3, 5, 7, 10$ % соответственно.

ординат отложено отношение Nu/Nu_0 , где Nu_0 — число Нуссельта в однофазном потоке в соответствующем режиме. Видно, что наибольшее влияние на теплообмен газовая фаза оказывает при малых числах Рейнольдса, и это влияние существенно возрастает с увеличением газосодержания. Примечательно, что при больших числах Рейнольдса величина интенсивности теплообмена не стремится к её значению в однофазном потоке, а получается больше на 20–30 %.

На рис. 6 приведен аналогичный график, но для случая, когда датчик находился на 60 мм ($h/D_r = 6,19$) выше дистанцирующей решетки. Видно, что влияние решетки на интенсификацию теплообмена является подавляющим по сравнению с влиянием дисперсной фазы.

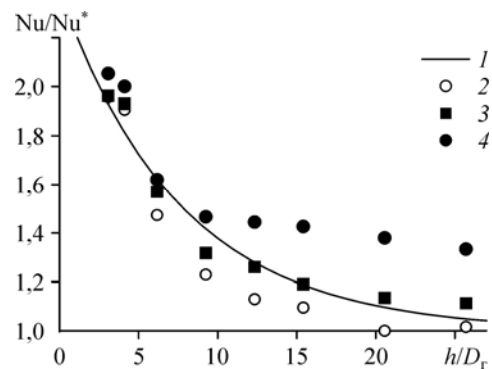
Зависимость безразмерного коэффициента теплоотдачи от расстояния до дистанцирующей решетки представлена на рис. 7. Сплошная линия соответствует корреляции [23]

$$Nu/Nu^* = 1 + 5,55 \cdot \varepsilon^2 e^{-0,13(h/D_r)}, \quad (3)$$

где Nu^* — значение числа Нуссельта в однофазном потоке без влияния дистанцирующей решетки (в работе [5] показано, что на расстоянии $h/D_r > 22$ от дистанцирующей решетки ее влияние на теплообмен пренебрежимо мало), а ε — отношение площади, затеняемой решеткой, к площади сечения канала. Видно, что при удалении от решетки вклад газовой фазы в интенсификацию теплообмена возрастает.

Рис. 7. Зависимость коэффициента теплообмена от приведенного расстояния до решетки при различных газосодержаниях.

$Re = 7500$; 1 — корреляция (3), 2–4 — данные измерений при $\beta = 0, 3, 10$ % соответственно.



Заключение

В работе представлены экспериментальные данные по исследованию теплообмена в восходящем пузырьковом потоке в сборке вертикально расположенных стержней 3×3 . В экспериментах наблюдалось существенное влияние газовой фазы на теплообмен. Показано увеличение влияния газовой фазы на теплообмен при уменьшении числа Рейнольдса, удалении исследуемого участка от дистанцирующей решетки и увеличении доли газовой фазы. Приведенные экспериментальные данные могут быть использованы для валидации расчетных кодов.

Обозначения

b — расстояние между центрами стержней в сборке, м,	T_{c1} — температура внешней стенки рабочего участка, °C,
V_L — приведенная скорость жидкости, м/с,	T_{c2} — температура внутренней стенки рабочего участка, °C,
V_G — приведенная скорость газа, м/с,	$\Delta T = T_{c1} - T_{ж}$ — разница температур стенки нагреваемой трубки и натекающей жидкости, °C,
ρ — плотность жидкости, кг/м ³ ,	I — ток, пропускаемый через рабочий участок, А,
s — площадь трубки из нержавеющей стали, м ² ,	R — электрическое сопротивление рабочего участка, Ом,
S — площадь поперечного сечения рабочего канала, м ² ,	q — плотность теплового потока, Вт/м ² ,
P — периметр сечения рабочего канала, м,	Re — число Рейнольдса,
D_r — гидравлический диаметр рабочего канала, м,	Nu — число Нуссельта в для двухфазного потока,
d — диаметр стержня, м,	Nu_0 — число Нуссельта в однофазном потоке,
η — динамическая вязкость жидкости, Па·с,	Nu^* — число Нуссельта в однофазном потоке без влияния дистанцирующей решетки,
λ — теплопроводность жидкости, Вт/(м·°C),	β — среднерасходное газосодержание,
λ_c — теплопроводность рабочего участка, Вт/(м·°C),	h — расстояние от дистанцирующей решетки до датчика, м,
α — коэффициент теплообмена, Вт/(м ² ·°C),	ε — отношение площади, затеняемой решеткой, к площади сечения канала.
r_1 — внешний радиус, нагреваемой трубки, м,	
r_2 — внутренний радиус, нагреваемой трубки, м,	
$T_{ж}$ — температура жидкости на входе в рабочий канал, °C,	

Список литературы

1. Krauss. T., Meyer L. Experimental investigation of turbulent transport of momentum and energy in a heated rod bundle // Nuclear Engng and Design. 1998. Vol. 180, No. 3. P. 185–206.
2. Moller S.V. On phenomena of turbulent flow through rod bundles // Experimental Thermal and Fluid Sci. 1991. Vol. 4, No. 1. P. 25–35.
3. Rehme K. Pressure drop performance of rod bundles in hexagonal arrangements // Int. J. Heat and Mass Transfer. 1972. Vol. 15, No. 12. P. 2499–2517.
4. Дмитриев С.М., Добров А.А., Доронков Д.В., Пронин А.Н., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е. Изучение гидродинамических процессов течения теплоносителя в ТВС-Квадрат реактора PWR с различными перемешивающими дистанционирующими решетками // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 5. С. 725–734.
5. Кашинский О.Н., Куликов Д.В., Лобанов П.Д., Прибатурин Н.А., Светоносов А.И. Распределение скорости жидкости в экспериментальной модели тепловыделяющей сборки с дистанционирующей решеткой // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 2. С. 227–231.
6. Liu D., Gu H. Study on heat transfer behavior in rod bundles with spacer grid // Int. J. of Heat and Mass Transfer. 2018. Vol. 120. P. 1065–1075.
7. Holloway M.V., McClusky H.L., Beasley D.E., Conner M.E. The effect of support grid features on local, single-phase heat transfer measurements in rod bundles // J. Heat Transfer. 2004. Vol. 126, No. 1. P. 43–53.
8. Cheng X., Kuang B., Yang Y.H. Numerical analysis of heat transfer in supercritical water cooled flow channels // Nuclear Engineering and Design. 2007. Vol. 237, No. 3. P. 240–252.
9. Cheng S.K., Todreas N.E. Hydrodynamic models and correlations for bare and wire-wrapped hexagonal rod bundles – bundle friction factors, subchannel friction factors and mixing parameters // Nuclear Engng and Design. 1986. Vol. 92, No. 2. P. 227–251.
10. Кашинский О.Н., Рандин В.В., Лобанов П.Д., Богословцев Г.В. Влияние дисперсности газовой фазы на характеристики опускного пузырькового течения // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12, № 4. С. 637–643.

11. Voutsinas A., Shakouchi T., Tsujimoto K., Ando T. Investigation of bubble size effect on vertical upward bubbly two-phase pipe flow consisted with an abrupt expansion. // J. Fluid Sci. and Technology. 2009. Vol. 4, No. 2. P. 442–453.
12. Lu J., Tryggvason G. Effect of bubble deformability in turbulent bubbly upflow in a vertical channel // Physics Fluids. 2008. Vol. 20, No. 4. P. 040701-1–040701-6.
13. Кашинский О.Н., Рандин В.В., Чинак А.В. Влияние ориентации канала на теплообмен и трение в пузырьковом течении // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 4. P. 401–408.
14. Kashinsky O.N., Randin V.V., Chinak A.V. Heat transfer and shear stress in gas-liquid flow in inclined channel // J. Engineering Thermophysics. 2014. Vol. 23. P. 39–46.
15. Hosokawa Sh., Hayashi K., Tomiyama A. Void distribution and bubble motion in bubbly flows in a 4×4 rod bundle. Part I: Experiments // J. Nuclear Sci. and Technology. 2014. Vol. 51. P. 220–230.
16. Goodheart K., Ylonen A., Cacqueray V.D., Prasser H.M. CFD validation of void distribution in a rod bundle with spacer // Proceedings of the 2014 22nd Intern. Conf. on Nuclear Engineering. Paper No. ICONE22-30741. P. V004T10A033 (9).
17. Yang X., Schlegel J.P., Liu Y., Paranjape S., Hibiki T., Ishii M. Measurement and modeling of two-phase flow parameters in scaled 8x8 BWR rod bundle // Int. J. Heat and Fluid Flow. 2012. Vol. 34. P. 85–97.
18. Кашинский О.Н., Лобанов П.Д., Курдюмов А.С., Прибатурин Н.А., Волков С.Е. Динамика газовой фазы в имитаторе тепловыделяющей сборки с дистанционирующей решеткой // Письма в Журнал технической физики. 2013. Т. 39, № 14. С. 62–68.
19. Chinak A.V., Gorelikova A.E., Kashinsky O.N., Randin V.V., Pakhomov M.A., Terekhov V.I. Hydrodynamics and heat transfer in an inclined bubbly flow // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2018. Т. 118. С. 785–801.
20. Гореликова А.Е., Кашинский О.Н., Пахомов М.А., Рандин В.В., Терехов В.И., Чинак А.В. Турбулентная структура течения и теплоперенос в наклонном пузырьковом потоке. Экспериментальное и численное исследование // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2017. № 1. С. 117–129.
21. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е. М.: Энергия, 1977. 344 с.
22. Liu D., Gu H. Mixed convection heat transfer in a 5x5 rod bundles // Int. J. of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 113. P. 914–921.
23. Yao S.C., Hochreiter L.E., Leech W.J. Heat-transfer augmentation in rod bundles near grid spacers // J. Heat Transfer. 1982. Vol. 104, No. 1. P. 76–81.

*Статья поступила в редакцию 29 мая 2018 г.,
после доработки — 7 октября 2018 г.,
принята к публикации 11 октября 2018 г.*