

УДК 621.039.524

Структурные характеристики двухфазных газожидкостных потоков в условиях действия периодических поперечных сил

Перевезенцев В. В.¹, Кузоро В. Б.^{2,*}

[*infi24ity@gmail.com](mailto:infi24ity@gmail.com)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

²АО Атомтехэнерго, Мытищи, Россия

Проведено экспериментальное исследование двухфазного газожидкостного потока в условиях естественной циркуляции и действия периодических поперечных сил. Проанализированы полученные оптическим методом векторные поля скоростей с целью выявить структуру двухфазных потоков при различных условиях естественной циркуляции, воздействии поперечных сил, вызванных различными угловыми амплитудами и периодами цикла движения канала. Полученные данные детально описывают структуру потока и могут быть использованы в качестве верификационной базы для применяемых в современных теплогидравлических кодах математических моделей, используемых в расчетах теплогидравлических характеристик двухфазных течений в контурах циркуляции ядерных реакторов.

Ключевые слова: двухфазные потоки, гидродинамика, структурные характеристики, верификация, одномерные и трехмерные CFD теплогидравлические коды, оптические методы PIV (Particle Image Visualization)

Введение

В ядерных энергетических установках двухфазные потоки в режиме естественной циркуляции (ЕЦ) в контуре теплоотвода имеют существенные преимущества, которые связаны с отсутствием циркуляционных насосов, снижающих надежность режимов циркуляции теплоносителя. В некоторых кипящих реакторах (БК-50, BWR) циркуляция двухфазного теплоносителя осуществляется в режиме ЕЦ [1, 2]. В реакторах с водой под давлением (PWR и ВВЭР) в аварийных режимах расхолаживание активной зоны также реализуется двухфазными потоками в режиме ЕЦ [3, 4, 5]. Совершенствование и развитие этих энергетических установок, обоснование теплогидравлических параметров контуров энергетических систем с двухфазными потоками в режиме ЕЦ требуют повышения точности применяющихся математических моделей гидродинамики и теплообмена, что делает актуальным получение новых экспериментальных данных, детально описывающих структуру двухфазного потока.

В настоящий момент проводится множество работ по тематике двухфазных потоков: это как построение математических моделей, используемых в различных расчетных кодах

(RELAP, КОРСАР и др.) [6, 7, 8], так и экспериментальные исследования для различных геометрий и условий с анализом характера межфазного взаимодействия [9, 10, 11]. Также многочисленны методики и способы получения экспериментальных данных: электрорезистивный, электроконтактный, оптический, емкостной, ультразвуковое сканирование (УЗК), видеосъемка, радиография, метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР), метод цифровой трассерной визуализации (PIV). Основная часть исследований выполнена для условий вынужденной циркуляции с большими значениями массовых скоростей в вертикальных каналах и с использованием датчиков, чувствительные элементы которых помещены непосредственно в поток.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование двухфазного потока с малыми массовыми скоростями, развивающегося в вертикальном канале (тяговом участке), совершающим маятниковые колебания относительно вертикальной оси, что приводит к периодическому изменению условий течения. Для измерения характеристик двухфазного течения использовался оптический не инвазивный PIV-метод.

1. Экспериментальная установка

Для проведения исследований разработана и создана экспериментальная установка (рис.1), представляющая адиабатический контур циркуляции, в состав которого входит экспериментальный канал (тяговый участок) 2 из оргстекла диаметром 50 мм и длиной 1500 мм, опускной 3 и подводящий 10 участки, бак-сепаратор 1.

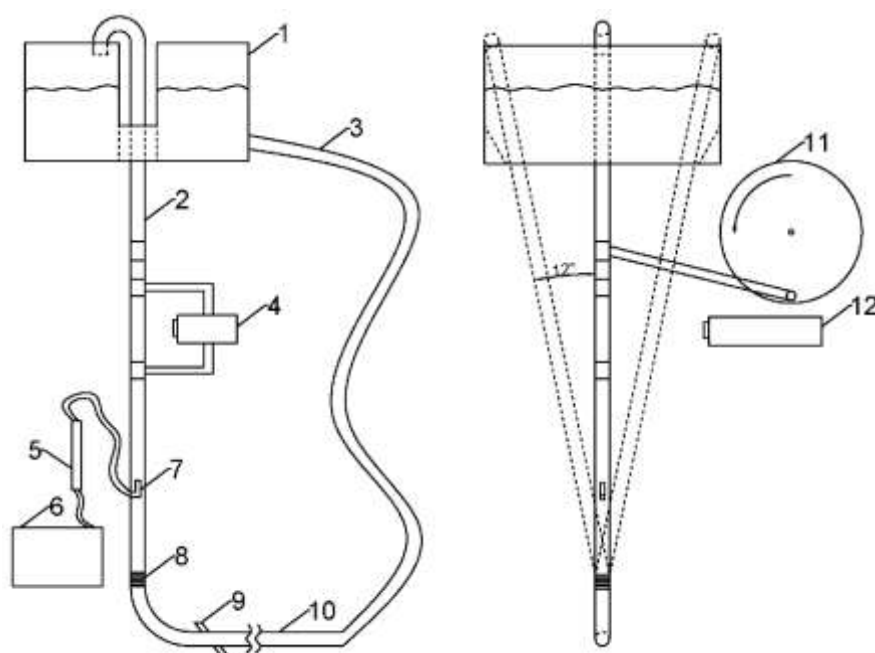


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1–бак-сепаратор, 2 – тяговый участок, 3 –опускной участок, 4 – высокоскоростная камера, 5 – ротаметр, 6 – компрессорная установка, 7 – устройство подачи воздуха в канал, 8 – сильфон, 9 – ультразвуковой расходомер, 10 – подводящий участок, 11 – кривошипно-шатунный механизм, 12 – импульсный лазер

Экспериментальная установка также содержит технологическое оборудование, обеспечивающее регулирование параметров двухфазного потока и характеристик установки. Воздух от компрессорной установки 6 с баллоном-ресивером подавался в заполненный водой экспериментальный канал через блок 7 подвода воздуха, конструкция которого показана на рис. 2. Основным технологическим оборудованием является компрессорная установка с баллоном-ресивером и устройство подачи воздуха в канал (рис. 2). Диапазон изменения объемных расходов воздуха в экспериментах составлял от 0,072 до 0,642 м³/ч. Объемный расход воздуха измерялся ротаметром 5. Воздух подавался в нижнюю часть тягового участка и сепарировался над баком-сепаратором. Содержание воздуха в тяговом участке определяло движущий напор и уровень естественной циркуляции в контуре экспериментальной установки. Расход воды в контуре измерялся ультразвуковым расходомером 9. С помощью механизма 11 (см. рис.1) создавались маятниковые колебания тягового участка относительно его вертикальной оси.

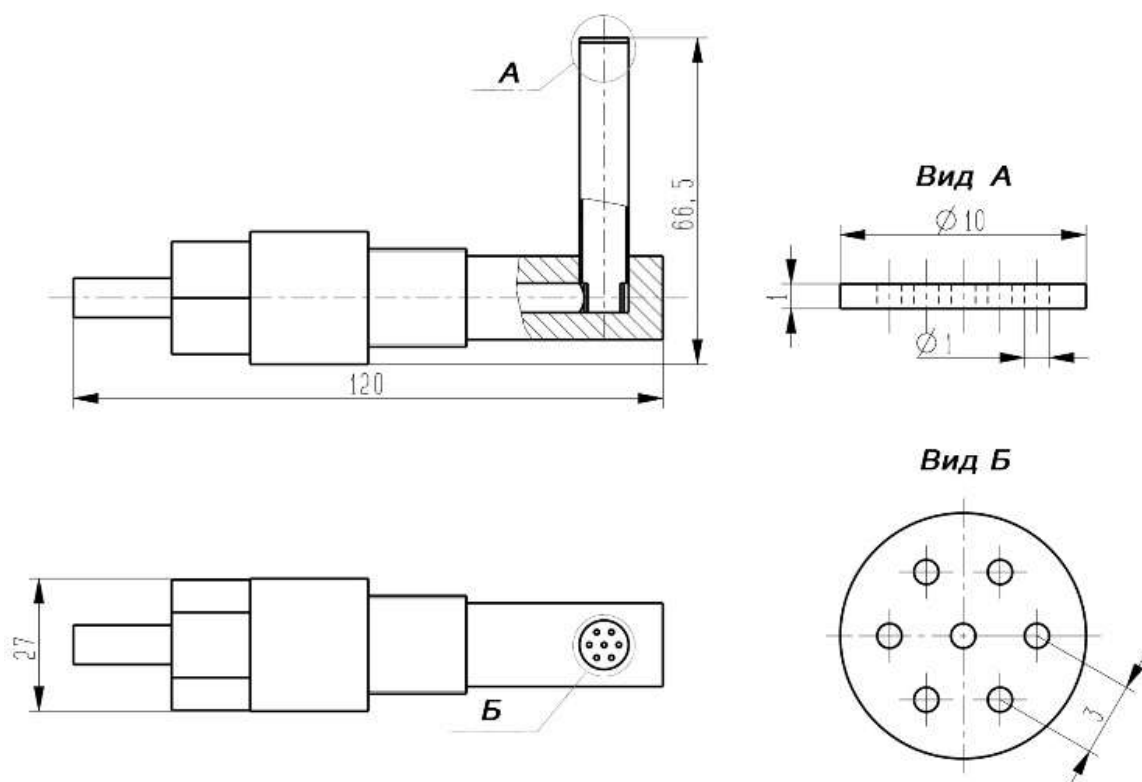


Рис.2. Принципиальная схема устройства подачи воздуха в экспериментальный канал

2. Программа экспериментов

Эксперименты выполнялись для различных стационарных положений тягового участка и в условиях его маятниковых колебаний. Значения периодов (10, 6 и 4 с) и угловых амплитуд (от 0 до 12⁰) маятниковых колебаний тягового участка выбраны с учетом рекомендаций [13, 14]. Используя технологии измерений PIV– методом [12] определялись структурные характеристики двухфазного газожидкостного потока: значения скоростей жидкости, их распределения по сечению канала.

3. Результаты экспериментов

3.1. Влияние угла наклона неподвижного тягового участка

Изменение расхода жидкости в контуре циркуляции при различных углах наклона неподвижного тягового участка представлено на рис.3. Скорость изменения расхода жидкости при увеличении расхода воздуха уменьшается, что отражает изменение условий течения при изменении газосодержания в потоке. Максимальный угол наклона тягового участка 12° увеличивает расход жидкости в режиме естественной циркуляции примерно на 20%. Для определения структурных характеристик потока использовался метод PIV измерений – фиксации перемещения подмешанных к жидкости частиц-трассеров [12]. Обработка полученных для серии снимков данных позволяет получить статистические векторные поля для каждого положения канала, приведенные на рис. 4.

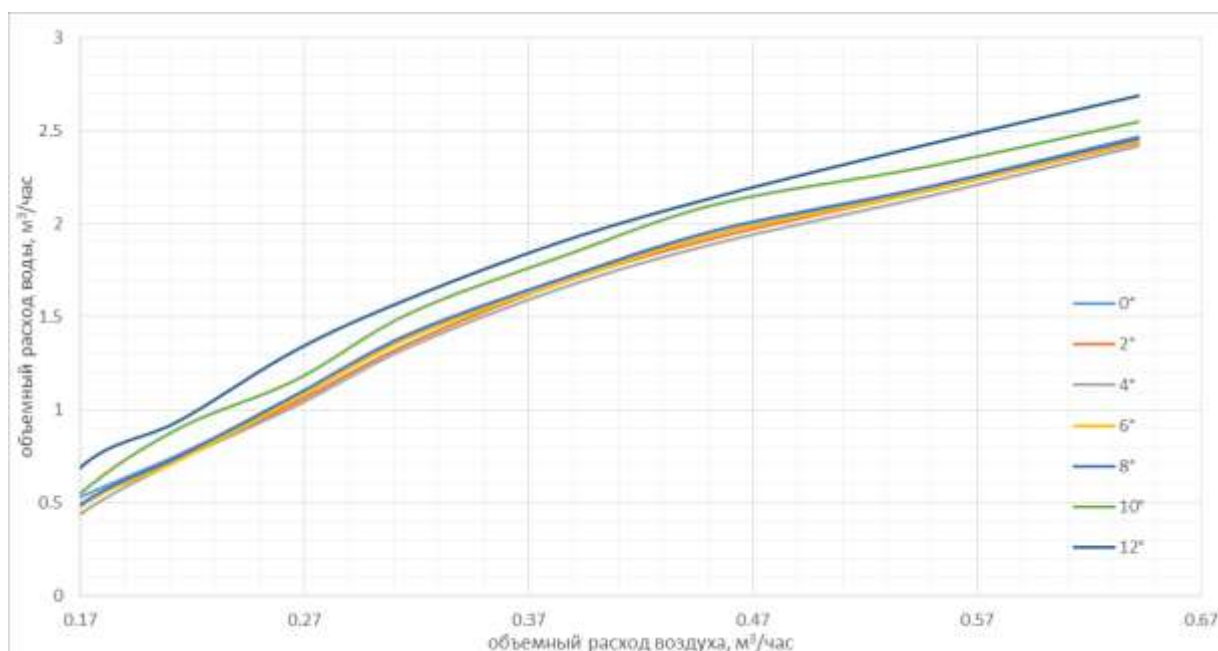


Рис.3. Изменение объемного расхода жидкости в контуре циркуляции при различных объемных расходах воздуха и углах наклона тягового участка

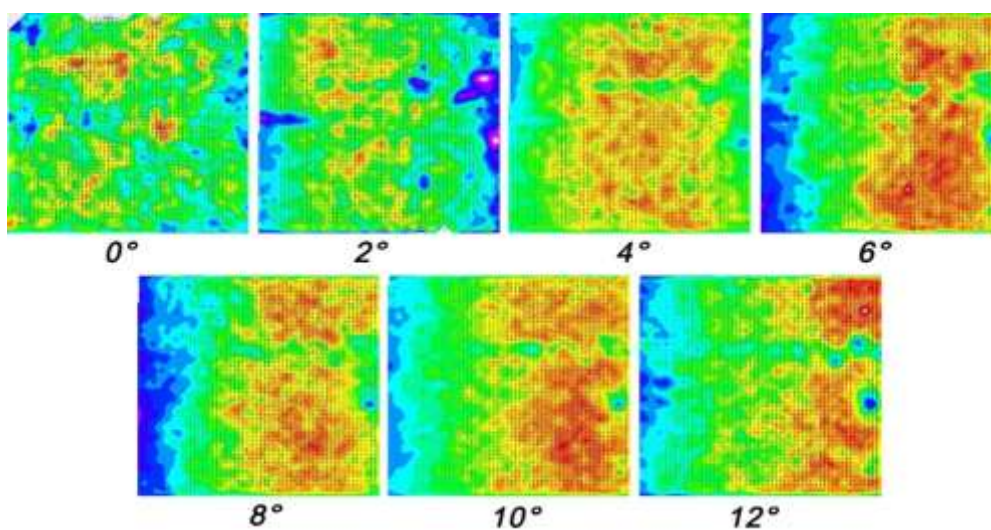


Рис.4. Статистические векторные поля скоростей для различных углов наклона тягового участка (расход воздуха $0.214 \text{ м}^3/\text{час}$)

Анализ векторных полей скоростей показывает, что при малых углах наклона тягового участка до 6° средняя скорость жидкости равномерно распределена по его вертикальному сечению. При больших наклонах заметно увеличение средней скорости жидкости у стороны канала, противоположной направлению наклона, составляющее до 25%. Этот эффект связан с движением газовой фазы под воздействием силы Архимеда вдоль верхней образующей канала. При увеличении расхода воздуха отмеченный эффект выражен слабо вследствие значительного увеличения объема газовой фазы, заполнения ею всего сечения тягового участка (рис.5).

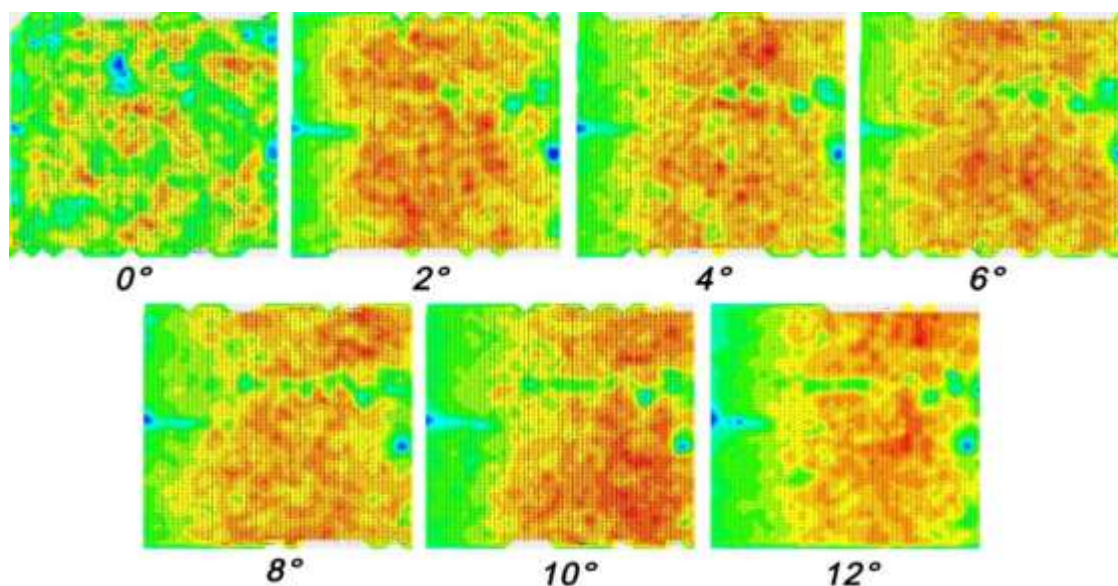


Рис.5. Статистические векторные поля скоростей для различных углов наклона тягового участка (расход воздуха $0.642 \text{ м}^3/\text{час}$)

3.2. Влияние угловой амплитуды маятниковых колебаний тягового участка

Изменения расхода жидкости в контуре циркуляции для двухфазного газожидкостного потока для периодов маятниковых колебаний 10, 6 и 4 с и угловых амплитудах 4° , 8° и 12° приведены на рис. 6, 7, 8. Сравнение представленных результатов с данными для неподвижного тягового участка (см. рис. 3) показывает, что маятниковые колебания практически не влияют на интенсивность естественной циркуляции в контуре. Различия не превышают 10%, т.е. находятся в пределах погрешностей измерений. С уменьшением периода (с ростом частоты) маятниковых колебаний влияние угловой амплитуды уменьшается. Это можно объяснить интенсивным перемешиванием двухфазной среды, способствующим формированию более равномерного распределения газовой фазы по сечению тягового участка.

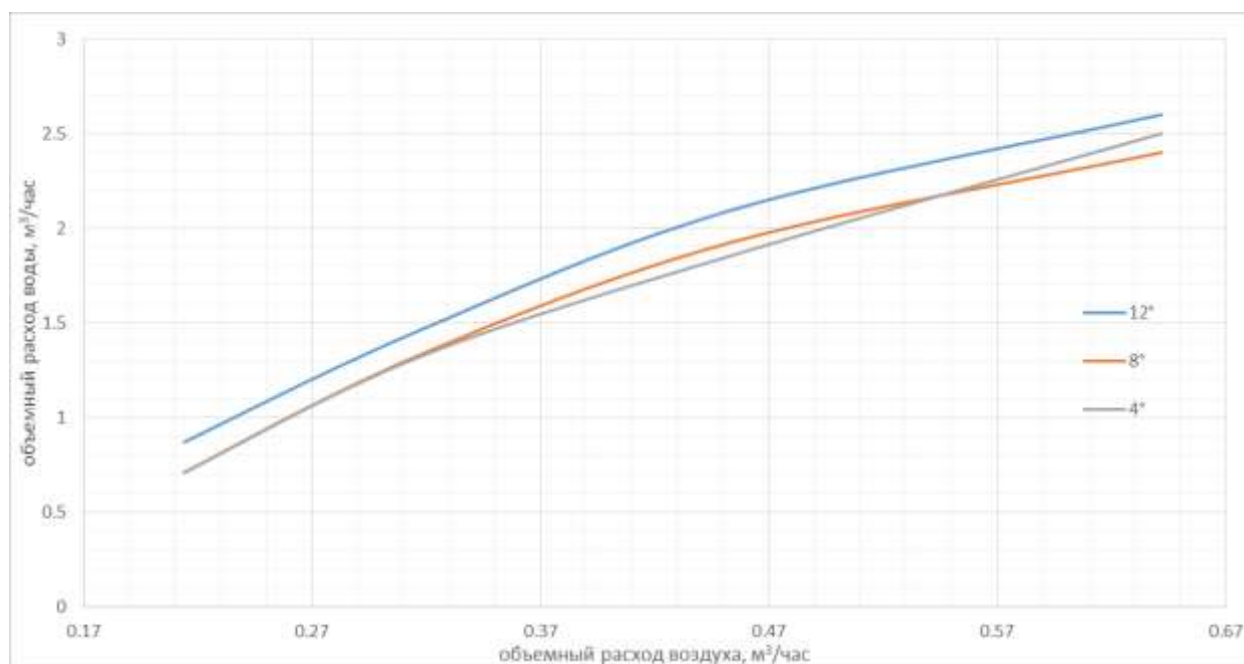


Рис.6. Изменение объемного расхода жидкости в контуре циркуляции в зависимости от объемного расхода воздуха при различных угловых амплитудах маятниковых колебаний угловых амплитудах качки (период колебаний 10 с)

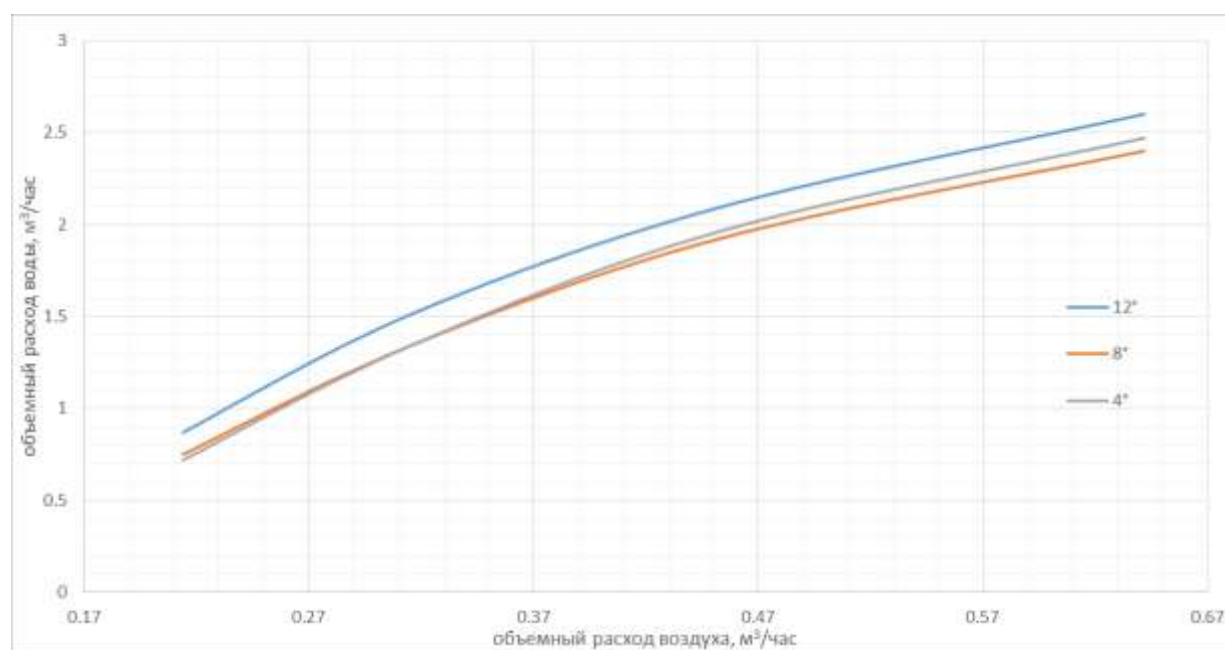


Рис.7. Изменение объемного расхода жидкости в контуре циркуляции в зависимости от объемного расхода воздуха при различных угловых амплитудах маятниковых колебаний угловых амплитудах качки (период колебаний 6 с)

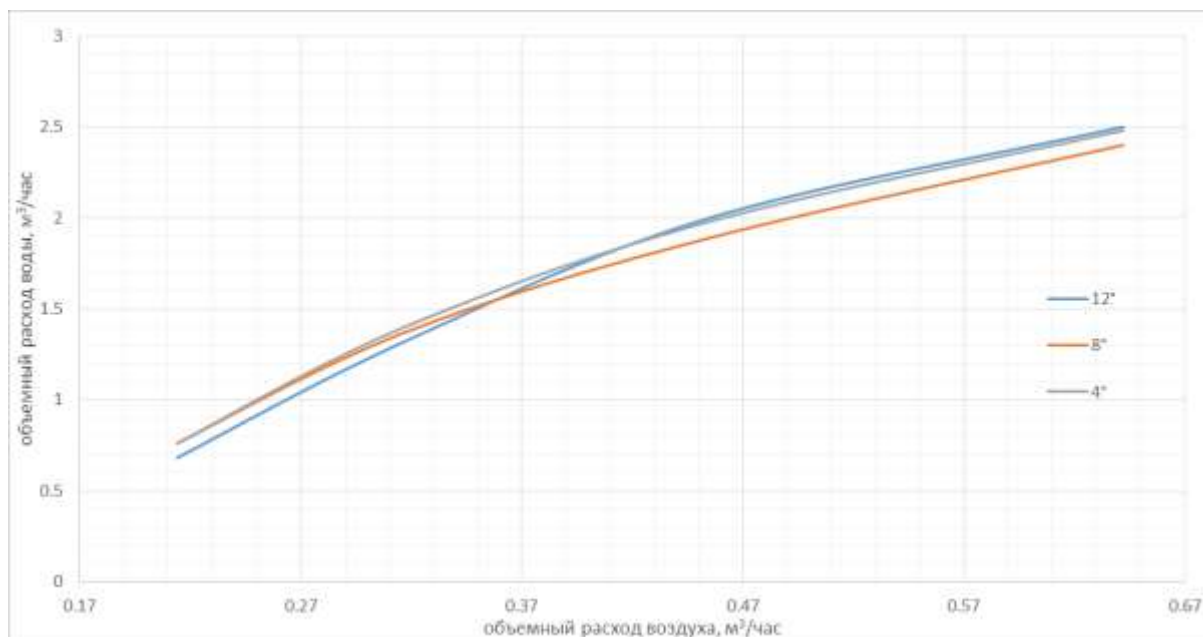


Рис.8. Изменение объемного расхода жидкости в контуре циркуляции в зависимости от объемного расхода воздуха при различных угловых амплитудах маятниковых колебаний угловых амплитудах качки (период колебаний 4 с)

На рис. 9, 10, 11 приведены данные по распределениям скорости жидкости по сечению канала (тягового участка) для различных угловых амплитуд и периодов маятниковых колебаний. Увеличение объемного расхода воздуха и уменьшение периода маятниковых колебаний способствует выравниванию распределения скорости по сечению канала. В то же время увеличение угловых амплитуд маятниковых колебаний приводит к росту неравномерности распределения газовой фазы по сечению канала.

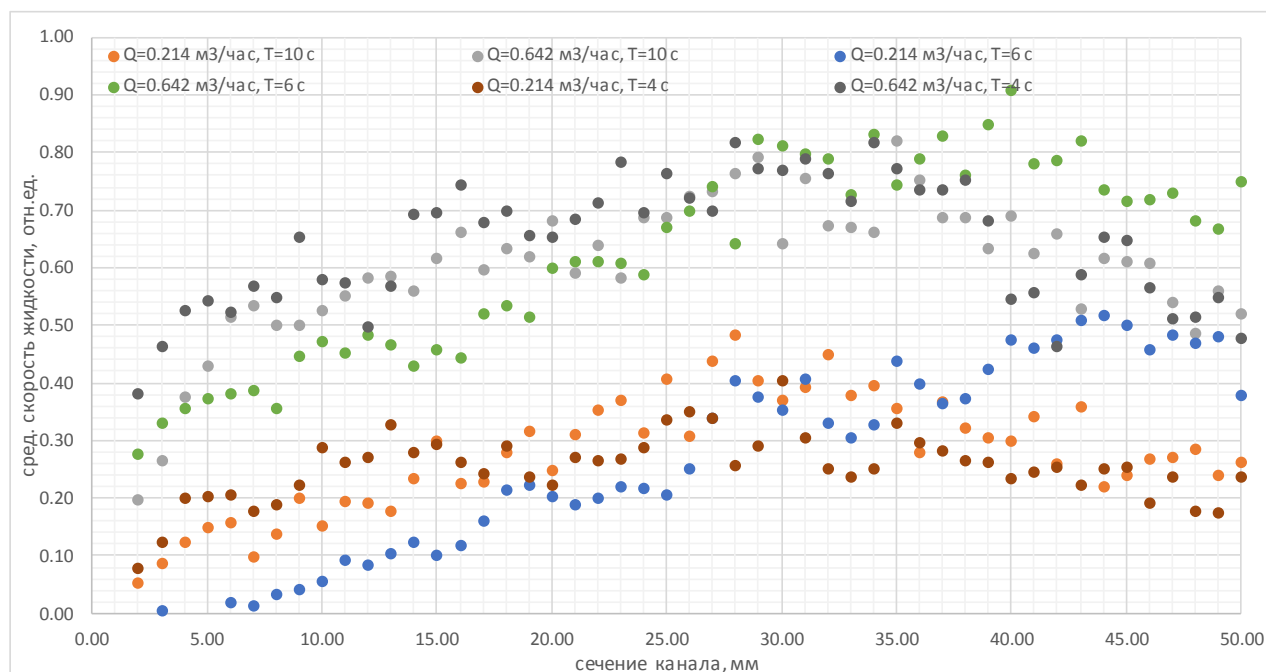


Рис.9. Распределение средней скорости жидкости по сечению канала при различных объемных расходах воздуха и периодах маятниковых колебаний (угловая амплитуда 12°)

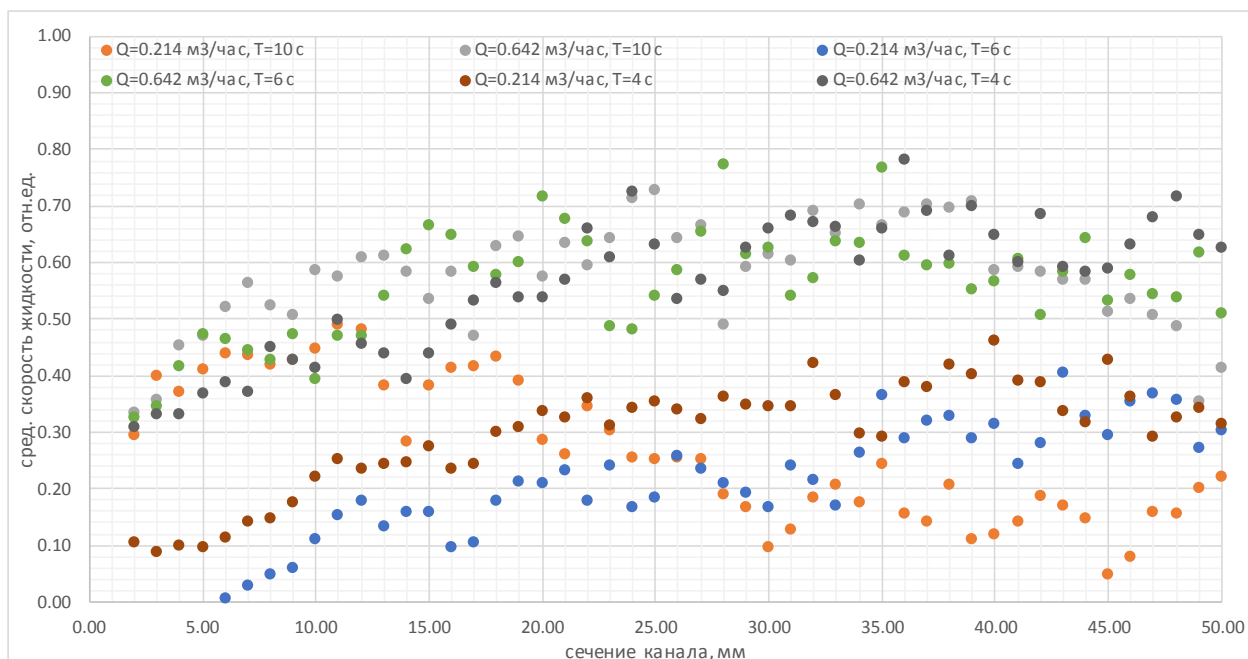


Рис.10. Распределение средней скорости жидкости по сечению канала при различных объемных расходах воздуха и периодах маятниковых колебаний (угловая амплитуда 8°)

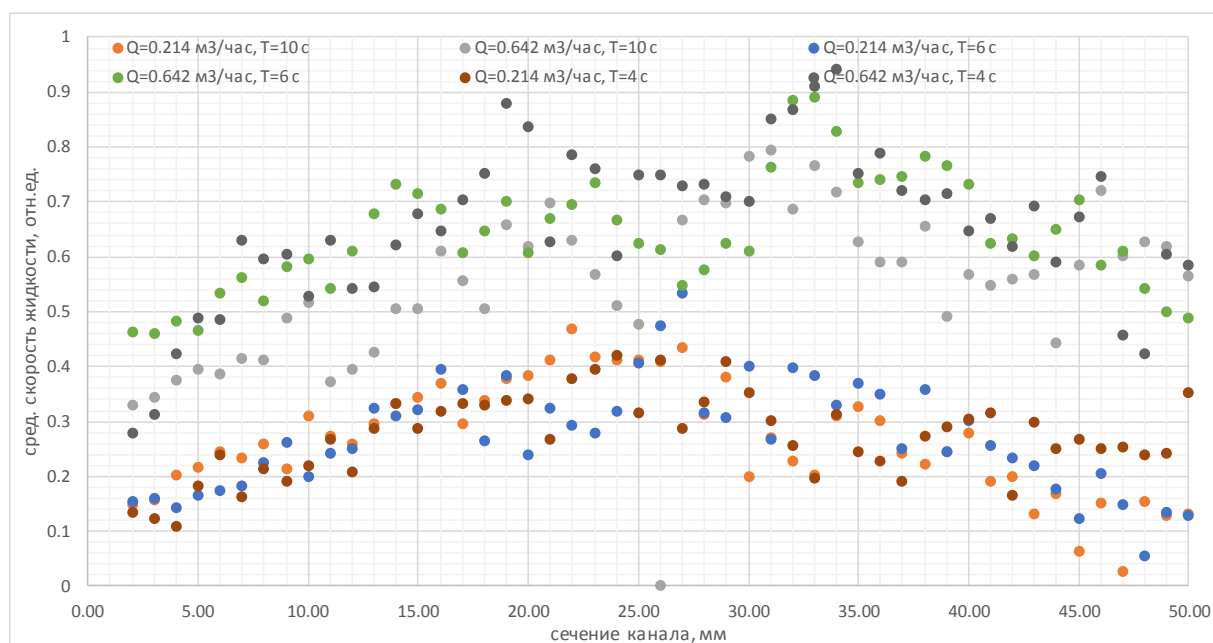


Рис.11. Распределение средней скорости жидкости по сечению канала при различных объемных расходах воздуха и периодах маятниковых колебаний (угловая амплитуда 4°)

Заключение

В работе получены результаты исследования гидродинамических характеристик двухфазного потока в режиме естественной циркуляции в адиабатическом контуре. Установлено влияние объемного расхода воздуха в диапазоне от 0,072 до 0,642 м³/ч, подаваемого на вход тягового участка на объемный расход жидкости при углах наклона неподвижного тягового участка (в диапазоне углов $0 \dots 12^\circ$) и его маятниковых колебаниях с уг-

ловыми амплитудами 4° , 8° и 12° и периодами 10, 6 и 4 с. Показано, что отклонение оси тягового участка от его вертикальной оси в статическом положении и при маятниковых колебаниях оказывает влияние на структуру двухфазного потока, в частности, на распределение скорости жидкости по сечению. Это может привести к неравномерному распределению коэффициентов теплоотдачи по периметру канала, пульсациям гидродинамических характеристик потока, колебаниям мощности ядерного реактора из-за влияния плотностного эффекта реактивности. Установлено, что с увеличением расхода воздуха и интенсификацией естественной циркуляции распределение газовой фазы по сечению канала в условиях отклонения его оси от вертикального положения выравнивается. Это приводит не только к повышению интенсивности теплоотвода, но и к более равномерному распределению теплоотдачи по периметру тягового участка.

Список литературы

1. Антонов С.Н., Ещеркин В.М., Туртаев Н.П., Шмелев В.Е., Якшин Е.К. Опыт эксплуатации РУ ВК-50 для проектирования АТЭЦ с корпусным кипящим реактором // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2005. № 1. С. 46-57.
2. Goswami N., Paruya S. Advances on research on nonlinear phenomena in boiling circulation loop // Progress in Nuclear Energy. 2009. Vol. 53, iss. 6. P. 673-697. DOI: [10.1016/j.pnucene.2011.04.009](https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2011.04.009)
3. Ильченко А.Г., Зуев А.Н., Харитонин И.Е. Исследование работы энергоблока ВВЭР-1000 в режиме естественной циркуляции теплоносителя // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2008. № 2. С. 49-52.
4. Zejun Xiao, Chuan Xu, Wenbin Zhuo, Chen B. Steady characteristic investigation on passive residual heat removal system of Chinese advanced PWR // Nuclear Science and Techniques. 2008. Vol. 19, iss. 1. P. 58-64. DOI: [10.1016/S1001-8042\(08\)60023-8](https://doi.org/10.1016/S1001-8042(08)60023-8)
5. Jian Deng, Xuewu Cao. Analysis of hot leg natural circulation under station blackout severe accident // Nuclear Science and Techniques. 2007. Vol. 18, iss. 2. P. 123-128. DOI: [10.1016/S1001-8042\(07\)60032-3](https://doi.org/10.1016/S1001-8042(07)60032-3)
6. Миронов Ю.В., Радкевич В.Е., Журавлева Ю.В., Кузин А.В., Мокроусов К.А., Яшников Д.А. Верификация теплогидравлических моделей кодов улучшенной оценки на примере модели двухфазного потока кодов RELAP5 и КОРСАР // Атомная энергия. 2004. Т. 97, № 6. С. 446-450.
7. Драгунов Ю.Г., Быков М.А., Василенко В.А., Мигров Ю.А. Опыт применения и развитие расчетного кода корсар для обоснования безопасности АЭС с ВВЭР // Теплоэнергетика. 2006. № 1. С. 43-47.
8. Zhao Guozhi, Cao Xinrong, Shi Xingwei. A study using RELAP5 on capability and instability of two-phase natural circulation flow under passive external reactor vessel cooling // Annals of Nuclear Energy. 2013. Vol. 60. P. 115-126. DOI: [10.1016/j.anucene.2013.04.034](https://doi.org/10.1016/j.anucene.2013.04.034)

9. Smith T.R., Schlegel J.P., Hibiki T., Ishii M. Two-phase flow structure in large diameter pipes // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2012. Vol. 33, iss. 1. P. 156-167. DOI: [10.1016/j.ijheatfluidflow.2011.10.008](https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2011.10.008)
10. Vyas H.P., Venkrat Raj V., Nayak A.K. Experimental investigation on steady state natural circulation behavior of multiple parallel boiling channel system // Nuclear Engineering and Design. 2010. Vol. 240, iss. 11. P. 3862-3867. DOI: [10.1016/j.nucengdes.2010.09.002](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.09.002)
11. Гизадулин Р.А. Закономерности распределения газовой фазы в жидкости при продувке снизу // Вестник ЮУрГУ. Сер. Metallургия. 2006. Вып. 7, № 10. С. 63-68.
12. Солонин В.И., Перевезенцев В.В., Исаков Н.Ш. Структура двухфазного адиабатического потока в режиме барботажа воздуха в заполненном водой вертикальном цилиндрическом канале // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 6. С. 375-391. DOI: [10.7463/0614.0713566](https://doi.org/10.7463/0614.0713566)
13. Хлопкин Н.С. Морская атомная энергетика: учеб. пособие. М.: МИФИ, 2007. 244 с.
14. Игнатъев К.Ф. Теория подводных лодок. М.: Воениздат МВС СССР, 1947. 187 с.

Two-Phase Gas-Liquid Flow Structure Characteristics under Periodic Cross Forces Action

V.V. Perevezentsev¹, V.B. Kuzero^{2,*}

[*infi24ity@gmail.com](mailto:infi24ity@gmail.com)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

²JSC Atomtechenergo, Mytishchi, Russia

Keywords: two-phase flow, hydrodynamic characteristics of structure, one-dimensional and three-dimensional CFD thermohydraulic codes, PIV-method

The article presents a study of two-phase gas-liquid flow under the action of periodic cross forces. The work objective is to obtain experimental data for further analysis and have structure characteristics of the two-phase flow movement. For research, to obtain data without disturbing effect on the flow were used optic PIV (Particle Image Visualization) methods because of their noninvasiveness. The cross forces influence was provided by an experimental stand design to change the angular amplitudes and the periods of channel movement cycle with two-phase flow. In the range of volume gas rates was shown a water flow rate versus the inclination angle of immovable riser section and the characteristic angular amplitudes and periods of riser section inclination cycle under periodic cross forces. Data on distribution of average water velocity in two-phase flow in abovementioned cases were also obtained. These data allowed us to draw a conclusion that a velocity distribution depends on the angular amplitude and on the period of the riser section roll cycle. This article belongs to publications, which study two-phase flows with no disturbing effect on them. Obtained data give an insight into understanding a pattern of two-phase gas-liquid flow under the action of periodic cross forces and can be used to verify the mathematical models of the CFD thermo-hydraulic codes. In the future, the work development expects taking measurements with more frequent interval in the ranges of angular amplitudes and periods of the channel movement cycle and create a mathematical model to show the action of periodic cross forces on two-phase gas-liquid flow.

References

1. Antonov S.N., Eshcherkin V.M., Turtaev N.P., Shmelev V.E., Yakshin E.K. VK-50 operation experience for nuclear cogeneration plant development with vessel-type boiling water reactor. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Fizika yadernykh reaktorov*, 2005, no. 1, pp. 46-57. (in Russian).

2. Goswami N., Paruya S. Advances on research on nonlinear phenomena in boiling circulation loop. *Progress in Nuclear Energy*, 2009, vol. 53, iss. 6, pp. 673-697. DOI: [10.1016/j.pnucene.2011.04.009](https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2011.04.009)
3. Il'chenko A.G., Zuev A.N., Kharitonin I.E. Analysis of power unit operation (VVER-1000) with natural heat transfer circulation. *Vestnik IGEU = Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2008, no. 2, pp. 49-52. (in Russian).
4. Zejun Xiao, Chuan Xu, Wenbin Zhuo, Chen B. Steady characteristic investigation on passive residual heat removal system of Chinese advanced PWR. *Nuclear Science and Techniques*, 2008, vol. 19, iss. 1, pp. 58-64. DOI: [10.1016/S1001-8042\(08\)60023-8](https://doi.org/10.1016/S1001-8042(08)60023-8)
5. Jian Deng, Xuewu Cao. Analysis of hot leg natural circulation under station blackout severe accident. *Nuclear Science and Techniques*, 2007, vol. 18, iss. 2, pp. 123-128. DOI: [10.1016/S1001-8042\(07\)60032-3](https://doi.org/10.1016/S1001-8042(07)60032-3)
6. Mironov Yu.V., Radkevich V.E., Zhuravleva Yu.V., Kuzin A.V., Mokrousov K.A., Yashnikov D.A. Verification of the thermohydraulic models used in improved-assessment codes for the RELAP5 and KORSAR two-phase flow models. *Atomnaya energiya*, 2004, vol. 97, no. 6, pp. 446-450. (English version of journal: *Atomic Energy*, 2004, vol. 97, iss. 6, pp. 841-844. DOI: [10.1007/s10512-005-0070-4](https://doi.org/10.1007/s10512-005-0070-4)).
7. Dragunov Yu.G., Bykov M.A., Vasilenko V.A., Migrov Yu.A. Experience with introduction and development of the KORSAR computer code for substantiating the safety of NPSs with type VVER reactors. *Teploenergetika*, 2006, no. 1, pp. 43-47. (English version of journal: *Thermal Engineering*, 2006, vol. 53, iss. 1, pp. 43-47. DOI: [10.1134/S0040601506010071](https://doi.org/10.1134/S0040601506010071)).
8. Zhao Guozhi, Cao Xinrong, Shi Xingwei. A study using RELAP5 on capability and instability of two-phase natural circulation flow under passive external reactor vessel cooling. *Annals of Nuclear Energy*, 2013, vol. 60, pp. 115-126. DOI: [10.1016/j.anucene.2013.04.034](https://doi.org/10.1016/j.anucene.2013.04.034)
9. Smith T.R., Schlegel J.P., Hibiki T., Ishii M. Two-phase flow structure in large diameter pipes. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2012, vol. 33, iss. 1, pp. 156-167. DOI: [10.1016/j.ijheatfluidflow.2011.10.008](https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2011.10.008)
10. Vyas H.P., Venkrat Raj V., Nayak A.K. Experimental investigation on steady state natural circulation behavior of multiple parallel boiling channel system. *Nuclear Engineering and Design*, 2010, vol. 240, iss. 11, pp. 3862-3867. DOI: [10.1016/j.nucengdes.2010.09.002](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.09.002)
11. Gizadulin R.A. The patterns of distribution of the gas phase in a fluid at the bottom blow-down. *Vestnik YuUrGU. Ser. Metallurgiya*, 2006, iss. 7, no. 10, pp. 63-68. (in Russian).
12. Solonin V.I., Perevezentsev V.V., Isakov N.Sh. Structure of two-phase adiabatic flow in air sparging regime in vertical cylindrical channel with water // *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 6, pp. 375-391. DOI: [10.7463/0614.0713566](https://doi.org/10.7463/0614.0713566) (in Russian).
13. Khlopin N.S. *Morskaya atomnaya energetika* [Marine nuclear energy]. Moscow, MIFI Publ., 2007. 244 p. (in Russian).
14. Ignat'ev K.F. *Teoriya podvodnykh lodok* [The theory of submarines]. Moscow, Voenizdat Publ., 1947. 187 p. (in Russian).