

ДИАГНОСТИКА ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ КАНАЛАХ В РЕЖИМЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ПО ПРИСТЕНОЧНЫМ ПУЛЬСАЦИЯМ ДАВЛЕНИЯ

Н.Ш. Исаков, В.В. Перевезенцев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: ns.isakov@gmail.com; vpereves@power.bmstu.ru

В системах охлаждения активных зон ядерных реакторов особый интерес представляют режимы естественной циркуляции двухфазных теплоносителей. Для верификации расчетных теплогидравлических кодов, применяемых при проектировании и обосновании безопасности ядерных энергетических установок с использованием двухфазных течений, необходима информация о структурных и интегральных характеристиках таких потоков. Рассмотрены вопросы диагностирования двухфазных потоков и идентификации режимов течения при движении в вертикальных каналах в условиях естественной циркуляции на основе анализа измерений пристеночных пульсаций давления. Представлены результаты измерений пристеночных пульсаций давления двухфазных течений воздух–вода в вертикальных каналах круглого сечения при естественной циркуляции и относительно низких массовых скоростях циркуляции для различных режимов течения с приведенными скоростями воздуха от 1,95 до 9,18 м/с и объемным расходом газосодержанием до 0,4. Получены спектральные характеристики, продольные расстояния между газовыми включениями (пузырями), их размеры, скорости в двухфазном потоке на основе анализа спектров, статистических характеристик и автокорреляционных функций пристеночных пульсаций давления.

Ключевые слова: гидродинамика, двухфазные потоки, диагностика, естественная циркуляция, пристеночные пульсации давления, режимы течения, энергетические установки, ядерные реакторы.

DIAGNOSTICS OF TWO-PHASE FLOWS IN VERTICAL CHANNELS DURING THE NATURAL CIRCULATION BY NEAR-WALL PRESSURE PULSATIONS

N.Sh. Isakov, V.V. Perevezentsev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: ns.isakov@gmail.com; vpereves@power.bmstu.ru

The paper discusses natural circulation of two-phase fluids, which is of particular interest for cooling systems of the reactor cores. The information about structural and integral characteristics of two-phase flows is necessary for verification of the computed thermal-hydraulic codes used in designing and safety justification of the nuclear power plants with two-phase cooling systems. The paper considers diagnostics of two-phase flows as well as an identification of the flow motion regimes inside the vertical channels in the natural circulation. The offered diagnostics is based on the analysis of measuring the near-wall pulsed pressure. The paper presents the results of measuring the near-wall pressure pulsations of two-phase air-water flows in the vertical channels of a circular cross section in the mode of natural circulation. It occurs at relatively low mass velocities of circulation for various flow regimes considering a superficial air velocity in the range of 1.95 to 9.18 m/s and a consumption gas content up to 0.4. Based on the analysis of both spectral-response characteristics and autocorrelation functions of the near-wall pressure pulsations,

the spectral characteristics, the longitudinal distance between the occluded gas (bubbles), their sizes and speeds in two-phase flow were obtained.

Keywords: hydrodynamics, two-phase flows, diagnostics, natural circulation, near-wall pressure pulsations, flow regime, power plants, nuclear reactors.

Для верификации расчетных теплогидравлических кодов двухфазных течений в каналах энергетических установок, в частности кипящих ядерных реакторов, необходима информация о структурных и интегральных характеристиках таких течений. В кипящих ядерных реакторах малой и средней мощности можно обеспечить отвод теплоты в режиме естественной циркуляции двухфазного теплоносителя. Следует отметить, что при работе ядерного реактора в режиме естественной циркуляции и относительно низких массовых скоростях циркуляции двухфазной среды ($(\rho w)_{\text{см}} < 1000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) недостаточно информации о структуре таких течений (распределениях паровых или газовых включений по сечению канала, размерах и скоростях их движения и т.д.).

В двухфазных потоках наблюдаются значительные по сравнению с течением однофазной среды колебания всех гидродинамических параметров. Как следствие, двухфазные течения характеризуются более высокими уровнями пульсаций давления по сравнению с турбулентными течениями однофазных сред. Формирование импульсов давления на обтекаемой двухфазной средой поверхности (пристеночных пульсаций давления) зависит от внутренней структуры течения. В зависимости от режима течения (пузырьковый, снарядный и т.д.) размеры паровых (газовых) включений, их распределение по сечению области течения, относительные скорости паровых (газовых) пузырей существенно различаются [1, 2]. Как следствие, и амплитудно-частотные характеристики пульсаций давления также оказываются различными. В то же время авторам известна только одна работа [3], в которой статистические характеристики пристеночных пульсаций давления использовались для идентификации режимов вынужденного течения горизонтальных двухфазных потоков. При этом основная информация была получена на основе выявленных особенностей изменений спектров пристеночных пульсаций давления в разных диапазонах режимных параметров потока.

В настоящей работе предпринята попытка определения ряда структурных характеристик двухфазных течений “воздух–вода” в вертикальных круглых каналах в режиме естественной циркуляции на основе измерений пристеночных пульсаций давления.

Экспериментальный стенд (рис. 1) представляет собой адиабатический контур циркуляции, в состав которого входят экспериментальный участок 1 — цилиндрический канал из оргстекла с внутренним диаметром 30 мм, подводящий 6 и опускной 3 участки. Воздух от

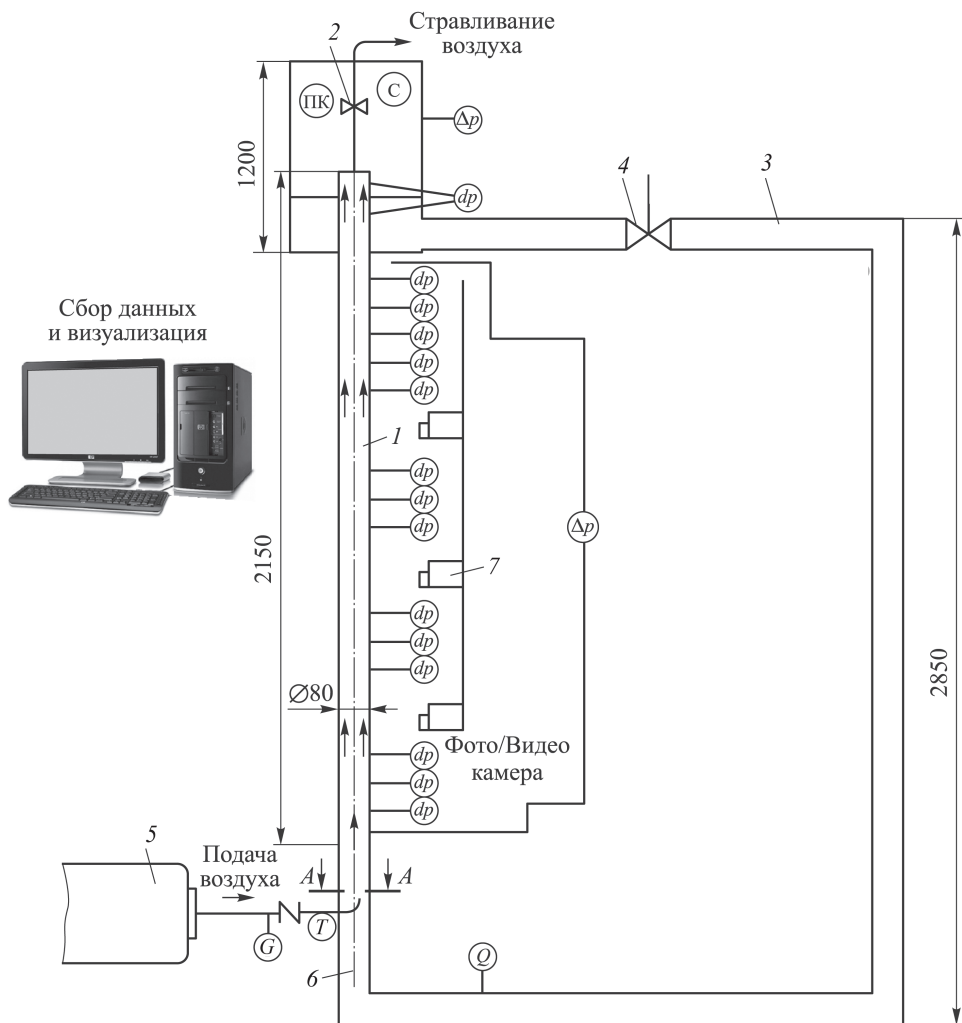


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для исследования гидродинамики адиабатных двухфазных течений вода–воздух в режиме естественной циркуляции в вертикальных каналах:

1 — экспериментальный участок; 2 — клапан травления; 3 — опускной участок; 4 — вентиль опускного участка; 5 — баллон-ресивер компрессорной станции; 6 — подводящий участок; 7 — скоростная фото/видеокамера; Q , T , G , dp и Δp — датчики измерения расхода воды, температуры, расхода газа, пульсаций давления и давления соответственно; С — сепаратор; ПК — перепускной клапан

компрессорной установки с баллоном-ресивером 5 подается в заполненный водой экспериментальный участок через расположенную по оси канала вставку с семью расположенными по треугольной решетке отверстиями диаметром 0,15 мм. Внешний диаметр вставки составлял 10 мм. На рис. 2 показаны характерные картины истечения воздушных струй из устройства подачи (вставки) в объем воды для различных расходов воздуха. Истекающая из устройства подачи воздушная струя имеет характерную форму конуса с углом раскрытия, увеличиваю-

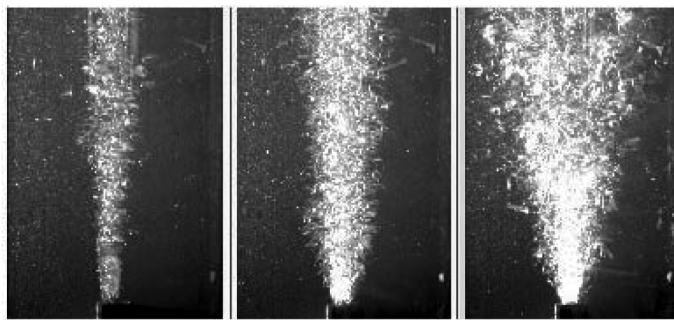


Рис. 2. Характерные картины истечения воздушных струй в неподвижный объем воды с увеличением расхода воздуха ($0,079 \text{ м}^3/\text{с}$, $0,125 \text{ м}^3/\text{с}$, $0,372 \text{ м}^3/\text{с}$)

щимся с ростом расхода воздуха. При достижении воздушной струей диаметра канала формируется двухфазное течение, заполняющее сечение канала полностью.

Расход воздуха в экспериментах изменялся в диапазоне от $0,86$ до $3,6 \text{ м}^3/\text{ч}$, что соответствовало приведенным скоростям от $1,95$ до $9,18 \text{ м/с}$. Приведенная скорость воды определялась по измеренным объемным расходам воды из соотношения $V_{\text{пр}}^{\text{в}} = Q'/f_{\text{к}}$ (где Q' — объемный расход воды в контуре циркуляции; $f_{\text{к}}$ — площадь проходного сечения канала). В условиях превышения движущего напора, возникающего из-за разности плотностей однофазной (перед устройством подачи воздуха) и двухфазной сред (в верхней части канала перед сепарацией воздуха), гидравлического сопротивления контура в последнем развивается циркуляция. В пределах канала от сечения вдува воздуха до его сепарации наблюдается движение двухфазной среды. Для измерения пульсаций в нескольких сечениях по длине канала выполнены отборы давления, соединенные с пьезорезистивными датчиками пульсаций давления короткими (менее 50 мм) импульсными линиями. Пьезорезистивные датчики пульсаций давления имеют чувствительный элемент в виде плоской мембраны из монокристаллического кремния [4].

На внешней стороне плоской мембраны (по отношению к воздействию на нее двухфазному потоку) в поверхностном слое методом диффузии сформирован тензорезистивный мост и схема компенсации температурной погрешности его чувствительности. Мембрана воспринимает нестационарное гидродинамическое воздействие (пульсации давления) двухфазного потока, деформируется, а пьезорезистивный мост формирует соответствующий сигнал по напряжению.

Воздушные пузыри перемещаются вместе с водой и формируют импульсы давления, которые и регистрируются датчиками пульсаций давления. В зависимости от режима течения (пузырьковый, снарядный и т.д.) размеры газовых включений (пузырей), их распределение по сечению области течения, относительные скорости газовых

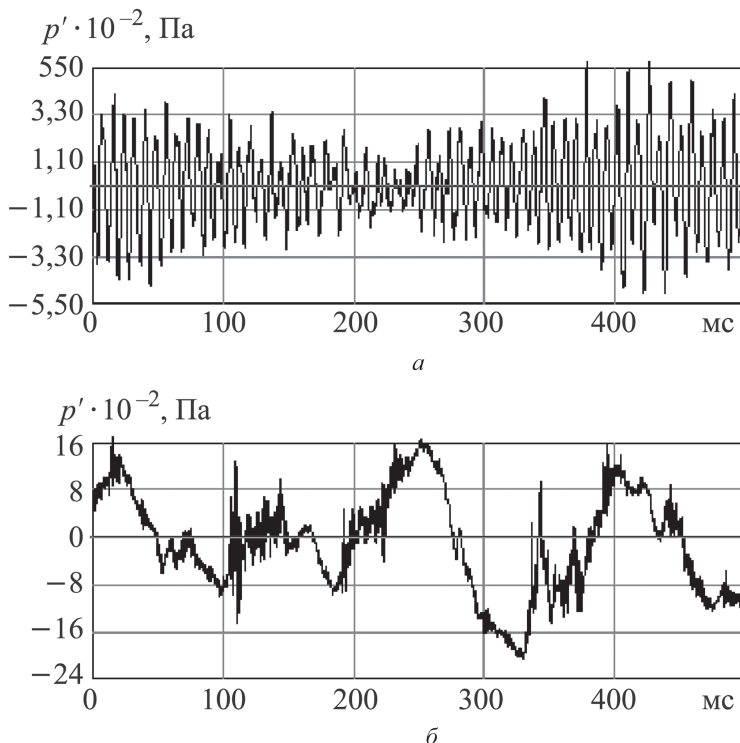


Рис. 3. Характерные реализации пристеночных пульсаций давления на расстоянии $z = 1192$ мм от устройства подачи воздуха в канал:

$a - V_{\text{пр}}^{\text{B}} = 0,43$ м/с; $\beta = 0,033$; $b - V_{\text{пр}}^{\text{B}} = 1,31$ м/с; $\beta = 0,32$

пузырей существенно различаются [5]. Как следствие, и амплитудно-частотные характеристики пульсаций давления также будут разными. Таким образом, диагностика двухфазных потоков может быть построена на основе анализа статистических характеристик пристеночных пульсаций давления. На рис. 3 приведены характерные реализации пристеночных пульсаций давления в сечении $z = 1192$ мм от устройства подачи воздуха. Видно, что в области низких расходных объемных газосодержаний $\beta = \frac{Q''}{Q' + Q''}$ (где Q'' – объемный расход воздуха в канале) при $\beta = 0,033$, когда по данным наблюдения реализуется пузырьковый режим течения, ширина импульсов, обусловленных проходящими мимо приемника давления воздушными пузырями, мала и составляет 4,6 мс. Оценка размеров воздушных пузырей как произведения приведенной скорости воды $V_{\text{пр}}^{\text{B}}$ на ширину указанного импульса дает значение ~ 2 мм. В то же время при высоких расходных объемных газосодержаниях ($\beta = 0,32$) в условиях снарядного режима течения продольный размер воздушного включения достигает 90 мм.

Спектры пристеночных пульсаций давления с выраженными резонансами на различных частотах отражают наличие в двухфазном потоке газовых включений (пузырей) разных размеров (рис. 4). При этом

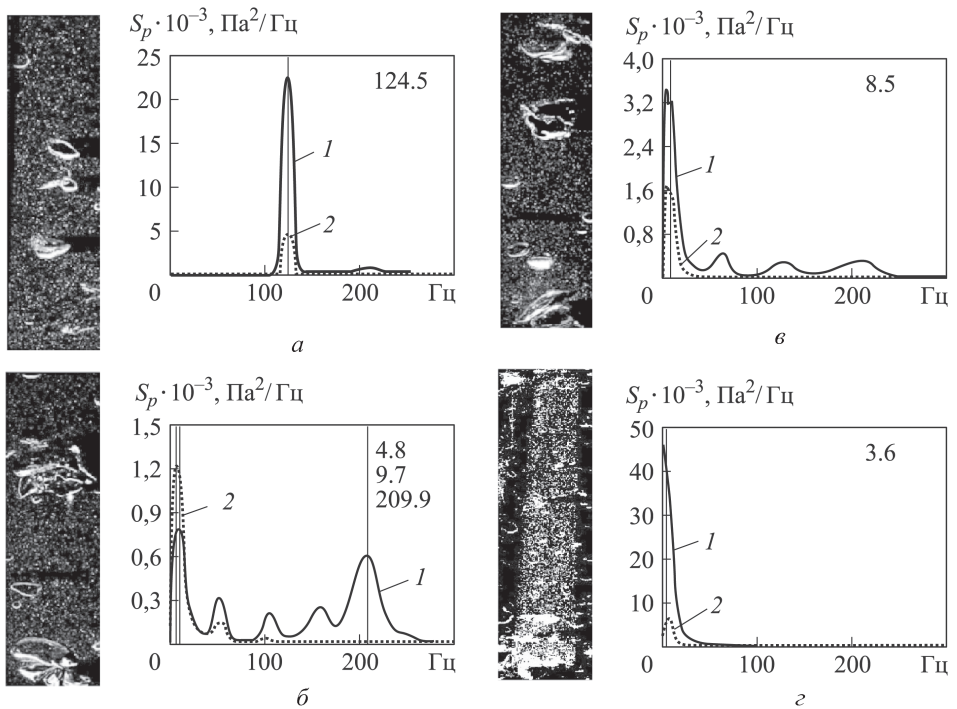


Рис. 4. Спектральные плотности пульсаций давления в сечениях на расстояниях $z = 430$ мм (1) и $z = 1192$ мм (2) от устройства подачи воздуха:

$a - \beta = 0,058$, $V_{\text{пр}}^{\text{B}} = 0,50$ м/с; $б - \beta = 0,093$, $V_{\text{пр}}^{\text{B}} = 0,82$ м/с; $в - \beta = 0,13$, $V_{\text{пр}}^{\text{B}} = 1,00$ м/с; $г - \beta = 0,32$, $V_{\text{пр}}^{\text{B}} = 1,31$ м/с

основной резонанс в спектрах определяется характерным расстоянием между пузырями и скоростью их перемещения $f_d = v/\Delta d$ (где v — скорость продольного перемещения пузырей или модуль результирующей скорости с учетом поперечного перемещения пузырей; Δd — расстояние между центрами газовых пузырей). На рис. 4 приведены значения частот характерных резонансов в спектрах пристеночных пульсаций давления. При низких значениях расходных объемных газосодержаний реализуется пузырьковый режим течения с относительно небольшими размерами газовых включений (2...3 мм). При этом характерные резонансы в спектрах пульсаций давления проявляются на достаточно высоких частотах. С дальнейшим увеличением газосодержания отдельные газовые пузыри сливаются и при определенных значениях концентрации пузырей в двухфазном потоке образуются заполняющие все сечение канала пузыри в форме “снарядов”. При этом происходит изменение пузырькового режима течения на снарядный режим с резким снижением частоты резонансов в спектрах пульсаций давления. Таким образом, спектры пристеночных пульсаций давления позволяют судить о режимах течения двухфазных потоков.

Моделирование гидродинамических процессов в двухфазных потоках предполагает описание межфазового взаимодействия. В связи с

этим особый интерес представляет информация о размерах газовых включений (пузырей) в зависимости от режимных параметров потока. Формируемые в двухфазном потоке импульсы давления во многом зависят и от размеров пузырей. Продольный пространственный масштаб газовых включений может быть оценен по автокорреляционным функциям пульсаций давления. Автокорреляционная функция стационарного случайного процесса пульсаций давления $p'(\tau)$ определяется как среднее (математическое ожидание) за интервал времени T значение произведения значений пульсаций давления в моменты времени τ и $\tau + \delta\tau$ [4]:

$$R_{pp}(\Delta\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T p'(\tau) p'(\tau + \delta\tau) d\tau, \quad (1)$$

где $\delta\tau$ — временной сдвиг или время задержки между моментами фиксации $p'(\tau)$ стационарного случайного процесса пульсаций давления.

Обычно автокорреляционную функцию нормируют путем деления на средний квадрат значений пульсаций давления $\langle p'^2 \rangle$. В этом случае получаем коэффициент автокорреляции

$$\rho_{pp}(\tau) = \frac{R_{pp}(\Delta\tau)}{\langle p'^2 \rangle}, \quad (2)$$

значения которого заключены в диапазоне от -1 до $+1$. На рис. 5 приведены коэффициенты автокорреляций пристеночных пульсаций давления в сечении $z = 1192$ мм для разных режимов течения двухфазной среды и отмечены временные сдвиги, при которых кривые коэффициентов автокорреляций принимают нулевые значения. Среднее время движения газовой структуры (пузырей) в области приемника давления определяется либо временной координатой τ_0 , при которой коэффициент автокорреляционной функции принимает нулевое значение, либо значением интеграла коэффициента автокорреляции в пределах интервала времени от 0 до τ_0 [6]:

$$T \sim \int_0^{\tau_0} \rho_{pp}(\tau) d\tau. \quad (3)$$

В настоящей работе для оценки размеров газовых включений (пузырей) использовался параметр τ_0 . Результаты оценки характерных продольных расстояний между газовыми включениями (пузырями) Δd и размеров газовых включений (пузырей) d в зависимости от объемного расходного газосодержания β приведены на рис. 6. Продольные расстояния между газовыми включениями (пузырями) определялись как отношение приведенной скорости воды в канале $V_{пр}^B$ к частоте

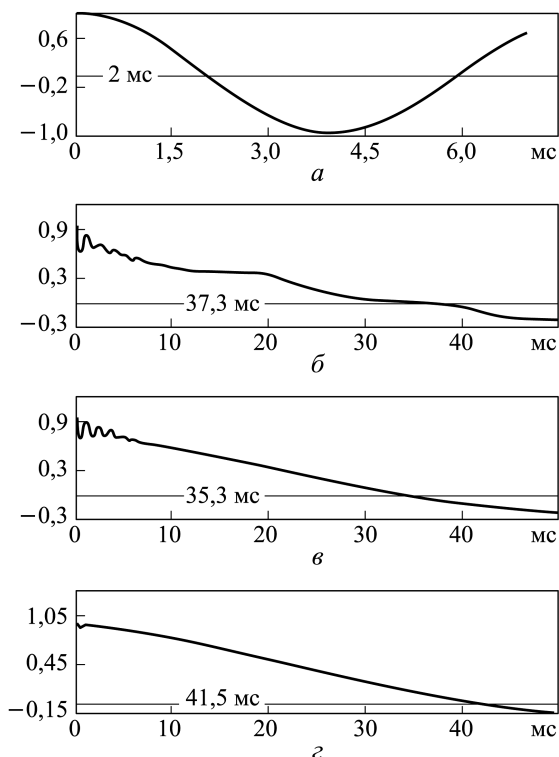


Рис. 5. Коэффициенты автокорреляции пульсаций давления в сечении $z = 1192$ мм для различных режимных параметров двухфазного потока:
 a - $г$ — обозначения см. рис. 4

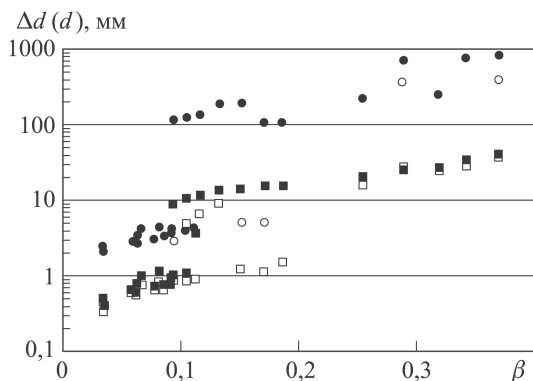


Рис. 6. Зависимость характерных продольных расстояний между газовыми включениями (пузырями) Δd и размеров газовых включений (пузырей) d в двухфазном потоке от расходного объемного газосодержания β :

1 — на расстоянии $z = 430$ мм от устройства подачи воздуха; 2 — $z = 1192$ мм; \circ и \bullet — продольное расстояние между газовыми включениями (1 и 2); \square и \blacksquare — размер газовых включений (1 и 2)

выраженного резонанса в спектрах пульсаций давления. Из рис. 6 следует, что в области малых газосодержаний ($\beta < 0,1$) на всем протяжении двухфазного потока сохраняются относительно небольшие размеры газовых включений, не превышающие 6...8 мм и в несколько раз

меньшие размеров канала. В области расходных объемных газосодержаний $0,1 < \beta < 0,12$ наблюдается переходная область от пузырькового режима течения к снарядному. Далее при $\beta > 0,16$ устанавливается снарядный режим течения.

Характерный продольный размер газовых включений (пузырей), оцененный как произведение приведенной скорости воды $V_{\text{пр}}^{\text{в}}$ на временную координату τ ($d \sim V_{\text{пр}}^{\text{в}} \tau_0$) изменяется в диапазоне от 0,4 до 1,0 мм для пузырькового режима течения, в диапазоне от 14,0 до 41,0 мм — для снарядного режима течения. При пузырьковом режиме течения продольные расстояния между газовыми включениями (пузырями) превышают размеры газовых включений (пузырей) в 7–8 раз, а при снарядном — в 10–18 раз. Исходя из приведенных на рис. 6 данных, можно утверждать, что пузырьковый режим течения наблюдается в диапазоне расходных объемных газосодержаний до 0,1. Область $0,1 < \beta < 0,16$ характеризуется неустойчивостью режима течения двухфазной среды: здесь могут реализовываться пузырьковый и снарядный режимы течения.

Скорость движения газовых включений (пузырей) может быть оценена по одновременным измерениям пристеночных пульсаций давления в двух сечениях канала, отстоящих друг от друга на известное расстояние Δz . Очевидно, при времени запаздывания одного случайного сигнала (пульсаций давления) относительно другого τ_z абсолютная скорость движения пузырей будет определяться как $V_{\text{п}} = \Delta z / \tau_z$. Обычно τ_z определяется по взаимной корреляционной функции сигналов в двух точках, удаленных друг от друга на известное расстояние. В работе [7] показано, что при определении τ_z как глобального максимума во временной области взаимной корреляционной функции двух сигналов точность его определения зависит от степени разрешения этого максимума во времени. Если случайный сигнал по пульсациям давления узкополосный и низкочастотный, то глобальный максимум будет пологим и плохо определяемым во временной области. В то же время указанные трудности отсутствуют при определении τ_z в частотной области по наклону фазовой характеристики взаимной спектральной плотности мощности двух сигналов $\Phi_{xy}(f)$:

$$\tau_z = -\frac{1}{2\pi f} \Phi_{xy}(f). \quad (4)$$

На рис. 7 приведены результаты оценки абсолютной скорости движения пузырей воздуха при одновременных измерениях пульсаций давления в сечениях $z = 430$ мм и 1192 мм (пространственная база $\Delta z = 762$ мм). Полученные данные представлены на рис. 7 в виде отношения скоростей движения пузырей к соответствующим значениям приведенных скоростей воды. В области сравнительно малых уровней

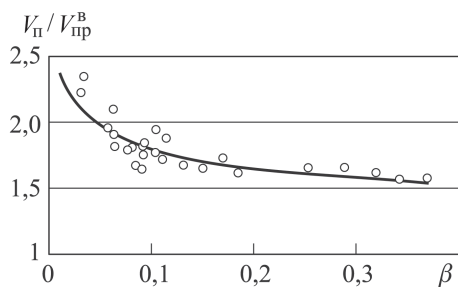


Рис. 7. Зависимость отношения скоростей продольного движения пузырей воздуха к соответствующим приведенным скоростям воды от расходного объемного газосодержания

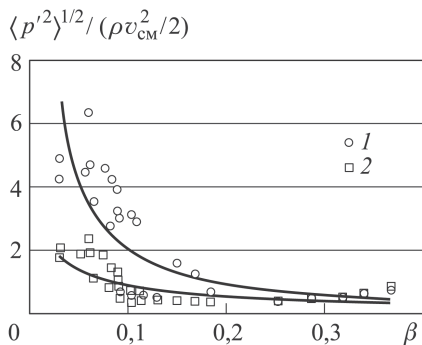


Рис. 8. Зависимость среднеквадратических нормированных на динамический напор двухфазного потока пристеночных пульсаций давления от объемного расходного газосодержания: 1 – сечение $z = 430$ мм от устройства подачи воздуха; 2 – сечение $z = 1192$ мм

газосодержаний ($\beta < 0,1$), когда отдельные газовые пузыри движутся по существу в нестесненных условиях, скорости их вертикального движения достаточно высоки и превышают в 1,5–2,5 раза уровни приведенной скорости воды.

С ростом расходного объемного газосодержания скорости движения газовых включений (пузырей) падают и при $\beta > 0,1$ становятся близки значениям приведенной скорости воды в канале. Экспериментальные данные по скоростям вертикального перемещения газовых пузырей обобщаются эмпирической зависимостью $V_{п}/V_{пр}^B = 1,4\beta^{-0,13}$.

В целом, двухфазные потоки различаются сложной пространственной структурой, проявляющейся в распределениях паро- (газо-) содержания по сечению и длине каналов, объединении паровых или газовых пузырей с образованием более крупных структур, пространственных осцилляциях пузырей, скачкообразном изменении режимов течения, и многими другими особенностями [8]. В двухфазных потоках наблюдаются существенно более высокие по сравнению с турбулентными течениями однофазной жидкости пульсации давления [9]. Пульсации давления формируют действующие на обтекаемые поверхности гидродинамические нагрузки, которые, в свою очередь, вызывают вибрации соответствующих элементов конструкций. На рис. 8 приведены результаты обобщения среднеквадратических значений пульсаций давления, нормированных на динамический напор двухфазного потока.

На начальном участке истекающей в объем воды газовой струи после заполнения всего сечения канала газовыми пузырями интенсивность их поперечного перемещения заметно выше (см. рис. 8) по сравнению с областью стабилизированного течения. Естественно, поперечные перемещения газовых пузырей формируют импульсы давления на

внутренней поверхности стенки, которые и регистрируются датчиками пульсаций давления. Таким образом, по мере развития двухфазного течения и стабилизации его внутренней структуры интенсивность поперечных перемещений газовых пузырей снижается, что и приводит к уменьшению пристеночных пульсаций давления. Следует отметить, что и в зависимости среднеквадратических значений пристеночных пульсаций давления от расходного объемного газосодержания наблюдается область неустойчивости ($0,1 < \beta < 0,16$), где пузырьковый режим течения может переходить в снарядный режим. Полученные экспериментальные данные по относительным среднеквадратическим значениям пристеночных пульсаций давления обобщаются следующими эмпирическими соотношениями:

$$\langle p'^2 \rangle^{1/2} / (\rho V_{\text{см}}^2 / 2) = 0,18\beta^{-1,0}$$

— в области формирования структуры потока (сечение $z = 430$ мм);

$$\langle p'^2 \rangle^{1/2} / (\rho V_{\text{см}}^2 / 2) = 0,25\beta^{-0,6}$$

— в области развитого установившегося течения (сечение $z = 1192$ мм).

В условиях естественной циркуляции двухфазной среды вода–воздух с отношением плотностей $\rho_{\text{ж}}/\rho_{\text{в}} \approx 10^3$ получены:

- характерные резонансы в спектрах пульсаций давления, которые отражают изменения в режимах течения двухфазного потока. Высокие частоты соответствуют пузырьковому режиму течения, а низкочастотные резонансы – снарядному режиму течения;

- размеры газовых включений в широком диапазоне расходных объемных газосодержаний. Размеры газовых пузырей составляют от 0,4 до 1,0 мм – для пузырькового режима, от 14,0 до 41,0 мм – для снарядного режима;

- абсолютные значения скоростей вертикального перемещения газовых пузырей. Скорость вертикального перемещения увеличивается от 0,8 до 1,3 м/с при пузырьковом режиме и от 1,5 до 2,3 м/с при снарядном режиме;

- среднеквадратические значения пристеночных пульсаций давления установившегося течения в широком диапазоне объемных расходных газосодержаний. Среднеквадратические значения пристеночных пульсаций давления уменьшаются от 2,2 и до 0,9 по отношению к скоростному напору двухфазной смеси при пузырьковом режиме и от 0,8 до 0,5 при снарядном режиме.

Таким образом, существует возможность создания системы диагностики гидродинамики в двухфазных потоках (в частности, в режиме их естественной циркуляции) с различной реализацией структуры течения (пузырьковый, переходной, снарядный режимы) на основе

информации о пристеночных пульсациях давления и их соответствующей статистической обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кутателадзе С.С., Стырикович М.А.* Гидродинамика газожидкостных систем. М.: Энергия, 1976. 296 с.
2. *Чисхолм Д.* Двухфазные течения в трубопроводах и теплообменниках. М.: Недра, 1986. 204 с.
3. *Хаббард М.А., Даклер А.Э.* Характеристики режимов течения горизонтального двухфазного потока // Достижения в области теплообмена. М.: Мир, 1970. С. 7–29.
4. *Перевезенцев В.В., Солонин В.И., Сорокин Ф.Д.* Нестационарные гидродинамические нагрузки и вибрации пучка твэлов в ТВС ВВЭР-440 // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2008. № 4. С. 23–29.
5. *Уоллис Г.* Одномерные двухфазные течения. М.: Мир, 1970. 436 с.
6. *Аркадов Г.В., Павелко В.И., Усанов А.И.* Виброшумовая диагностика ВВЭР. М.: Энергоатомиздат, 2004. 344 с.
7. *Бендат Дж., Пирсол А.* Применение корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир, 1983. 312 с.
8. *Гусев В.Д., Калинин Р.И., Благовещенский А.Я.* Гидродинамические аспекты надежности современных энергетических установок. Л.: Энергоатомиздат, 1989. 216 с.
9. *Федорович, Е.Д., Фокин В.С., Аксельрод А.Ф., Гольдберг Е.Н.* Вибрации элементов оборудования ЯЭУ. М.: Энергоатомиздат, 1989. 168 с.

REFERENCES

- [1] Kutateladze S.S., Styrikovich M.A. *Gidrodinamika gazozhidkostnyh system* [Hydrodynamic of gas-liquid systems], Moscow, Energiya Publ., 1972, 296 p.
- [2] Chisholm D. Russ. ed.: *Dvuhfaznye techeniya v truboprovodah i teploobmennikah* [Two-phase flow in pipelines and heat-exchangers]. Moscow, Nedra Publ., 1986, 204 p.
- [3] Hubbard M.A., Dakler A.E. Characteristics of flow regimes of horizontal two-phase flow. *Advances in Heat Transfer*, 1970, pp. 7–29.
- [4] Perevezentsev V.V., Solonin V.I., Sorokin F.D. Unsteady hydrodynamic loads and vibration of fuel elements in VVER-440. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Yadern. energetika* [Proc. Univ. Nuclear Energy], 2008, no. 4, pp. 23–29 (in Russ.).
- [5] Wallis G. Russ. ed.: *Odnomernye dvuhfaznye techeniya* [One-dimensional two-phase flow], Moscow, Mir Publ., 1972, 436 p.
- [6] Arkadov G.V., Pavelko V.I., Usanov A.I. *Vibroshumovaya diagnostika VVER* [Vibration and noise diagnostics VVER]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2004, 344 p.
- [7] Bendat J., Pirsol A. Russ. ed.: *Primenenie korrelyatsionnogo i spektralnogo analiza* [The use of correlation and spectral analysis]. Moscow, Mir Publ., 1983, 312 p.
- [8] Gusev V.D., Kalinin R.I., Blagoveshenskiy A.Ya. *Gidrodinamicheskie aspekty nadezhnosti sovremennyh energeticheskikh ustanovok* [Hydrodynamic aspects of reliability of modern power plants]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1989, 216 p.
- [9] Fedorovich E.D., Fokin V.S., Akselrod A.F., Goldberg E.N. *Vibratsii elementov oborudovaniya yadernykh energeticheskikh ustanovok* [Vibration equipment components NPP]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, 168 p.

Статья поступила в редакцию 30.12.2014

Исаков Ниджат Шаддых оглы — ассистент кафедры “Ядерные реакторы и установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор девяти научных работ в области ядерных технологий, физического и математического моделирования теплогидравлических процессов в ядерных реакторах с двухфазными теплоносителями.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Isakov N.Sh. — assistant lecturer of the “Nuclear Reactors and Facilities” Department of Bauman Moscow State Technical University. Author of 9 publications in the fields of nuclear technology, physical and mathematical modeling thermohydraulic processes in nuclear reactors with biphasic heat-transfer fluids.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Перевезенцев Владимир Васильевич — д-р техн. наук, профессор кафедры “Ядерные реакторы и установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 85 научных работ в области ядерных технологий, гидродинамики и теплофизических процессов в ядерных энергетических установках.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Perevezentsev V.V. — Dr. Sci. (Eng.), professor of the “Nuclear Reactors and Facilities” Department of Bauman Moscow State Technical University. Author of 85 publications in the fields of nuclear technology, hydrodynamic and thermophysical processes in nuclear power plants.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Исаков Н.Ш., Перевезенцев В.В. Диагностика двухфазных течений в вертикальных каналах в режиме естественной циркуляции по пристеночным пульсациям давления // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 3. С. 17–29.

Please cite this article in English as:

Isakov N.S h., Perevezentsev V.V. Diagnostics of Two-Phase Flows in Vertical Channels During the Natural Circulation by Near-Wall Pressure Pulsations. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2015, no. 3, pp. 17–29.