

Структура двухфазного адиабатического потока в режиме барботажа воздуха в заполненном водой вертикальном цилиндрическом канале

06, июнь 2014

DOI: 10.7463/0614.0713566

Солонин В. И., профессор Перевезенцев В. В., Исаков Н. Ш., Кузеро В. Б.

УДК 621.039.524

Россия, МГТУ им.Баумана

en7@power.bmstu.ru

vpereves@power.bmstu.ru

ni.isakov@gmail.com

infi24ity@gmail.com

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 кипящих реакторах (BWR), как правило, циркуляция двухфазного теплоносителя осуществляется именно 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, KOPCAR и др.) [6 - 8], так и экспериментальные исследования для различных геометрий и условий с анализом характера межфазного взаимодействия [9 - 11]. Также многочисленны методики и способы получения экспериментальных данных: электрорезистивный, электроконтактный, оптический, емкостной, УЗК, видеосъемка, радиография, ЯМР, PIV. Основная часть работ выполнена для условий вынужденной циркуляции с

большими значениями массовых скоростей и с использованием датчиков, помещённых непосредственно в поток. В данной работе целью являлось экспериментальное исследование двухфазного потока в режиме барботажа для цилиндрического канала с помощью оптических методов. Сочетание отсутствия возмущающего влияния на двухфазный поток с его малыми значениями массовых скоростей представляют большой интерес как для нахождения особенностей поведения двухфазных потоков, так и для верификации расчетных кодов в данной области. Получены результаты по скоростям фаз, распределению фаз, выполнен анализ характера движения и сравнение с существующими данными.

1. Экспериментальная установка

Для проведения экспериментов в работе использовался вертикальный цилиндрический канал, заполненный водой и сообщающийся с атмосферой (рис. 1). Организация режима барботажа воздуха в вертикальном канале обеспечивалась подачей воздуха через устройство, расположенное на оси канала (рис. 2). Расход воздуха создавался компрессором с ресивером.

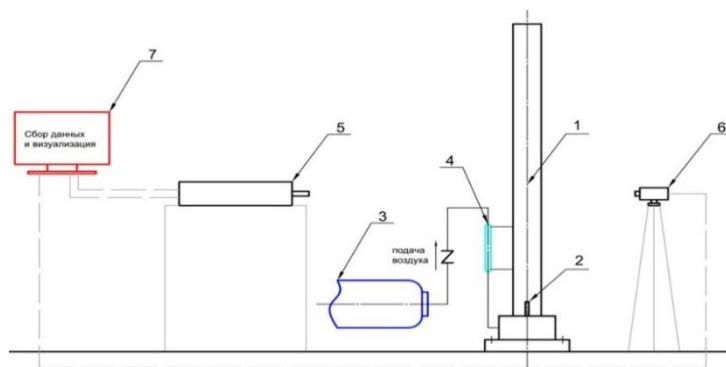


Рис.1. Принципиальная схема экспериментальной установки (1 - канал с водой, 2 – напускное устройство, 3 – компрессор, 4 – ротаметр, 5 – импульсный лазер, 6 – цифровая камера, 7 - ПК)

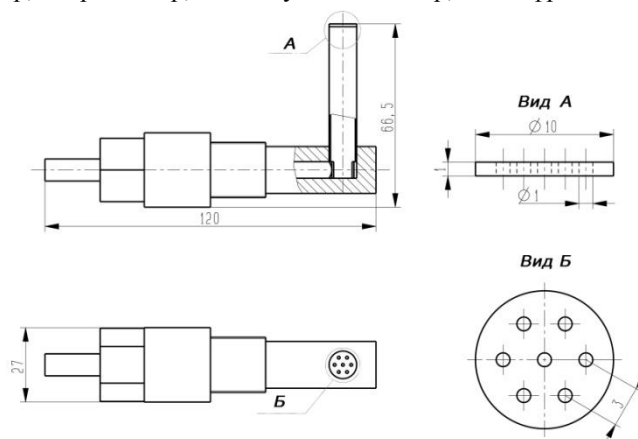


Рис.2. Принципиальная схема устройства подачи воздуха в канал

Объемный расход воздуха определялся с помощью ротаметра. Диапазон объемных расходов воздуха составлял от 0,023 до 0,12 м³/ч.

2. Задачи экспериментов

Барботаж в данной установке имеет два характерных участка – выход из устройства подачи (начальный участок) и установившийся участок (Рис. 3). Необходимо проанализировать движение газовых объемов и жидкости на каждом из участков, особенностей их коллективного движения, найти скорости фаз и геометрическую форму пузырей.

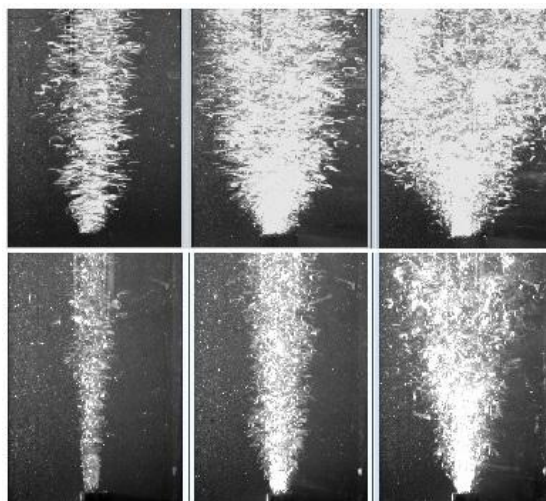


Рис.3. Характерные картины истечения воздуха из устройства подачи в объем воды различных расходов воздуха

3. Технология сбора данных

В работе использован PIV-метод цифровой трассерной визуализации, являющихся частным случаем метода лазерной спеклометрии LSV (Laser Speckle Velocimetry). В основе лежит оптическое преобразование Фурье яркостных картин. Этот метод выбран ввиду его неинвазивности а, следовательно, и отсутствия возмущающего влияния на поток. Это преимущество особенно важно при изучении потоков, содержащих крупномасштабные вихревые структуры, информация о которых частично теряется при применении локальных методов диагностики. Измерения мгновенных скоростей потока PIV-методом основано на измерениях перемещений частиц примеси (трассеров) за фиксированный интервал времени. Измерительной областью потока является плоскость, «вырезаемая» световым «ножом» лазерного излучения, толщиной 2-3 мм (рис. 4). Частицы примеси в измерительной плоскости потока освещаются импульсами лазерного излучения дважды. Образы частиц регистрируются на электронной матрице камеры, что позволяет построить двухкомпонентное поле скорости. Для измерения трех компонент скорости используют, как правило, два регистрирующих модуля, оптические оси которых ориентированы под определенным углом относительно друг друга.

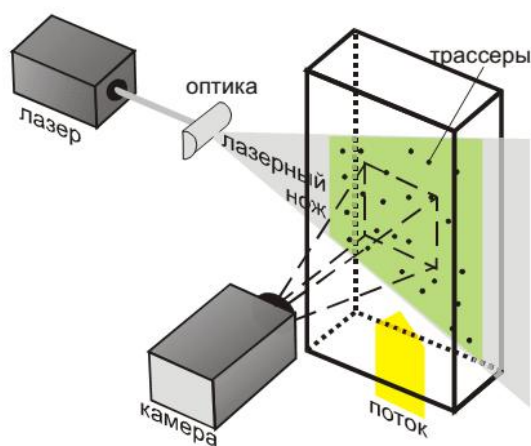


Рис.4. Принципиальная схема регистрации перемещений частиц-трассеров при реализации PIV-метода для определения распределений мгновенных скоростей потока

Для обработки образов частиц (трассерных изображений) применяется кросскорреляционный алгоритм [12]. Максимум корреляционной функции для интенсивности отраженного от частиц света из двух последовательных кадров соответствует наиболее вероятному сдвигу частиц в данной области. Для расчета корреляционной функции используется стандартный алгоритм быстрого преобразования Фурье с применением корреляционной теоремы [13]. По временной задержке между вспышками лазера Δt (в случае использования непрерывного лазера за время Δt принимается время между последовательными кадрами камеры) и значению наиболее вероятного перемещения частиц в элементарной области определяется скорость трассера. Подобная операция, произведенная для каждой элементарной области, на которые разбито все поле течения, позволяет рассчитать мгновенное распределение скорости и представить их в виде векторных полей скоростей. Обычно используется регулярное разбиение, с определенной степенью перекрытия ячеек. Мгновенное распределение скорости усредняется за время между вспышками лазерного излучения, которое должно быть на два или три порядка ниже минимальных характерных временных масштабов, соответствующих наиболее высокочастотным турбулентным пульсациям.

Вышеописанный алгоритм сведен в программный пакет Dynamic Studio [14], который является неотъемлемой частью системы PIV со следующей аппаратурой: импульсный лазер (Dual Power 135-15); цифровая камер (Speed Sense M110); оптическая система для формирования «лазерного ножа»; синхронизирующее устройство (TimerBox). Структурная схема аппаратуры, реализующей метод PIV представлена на рис. 5.

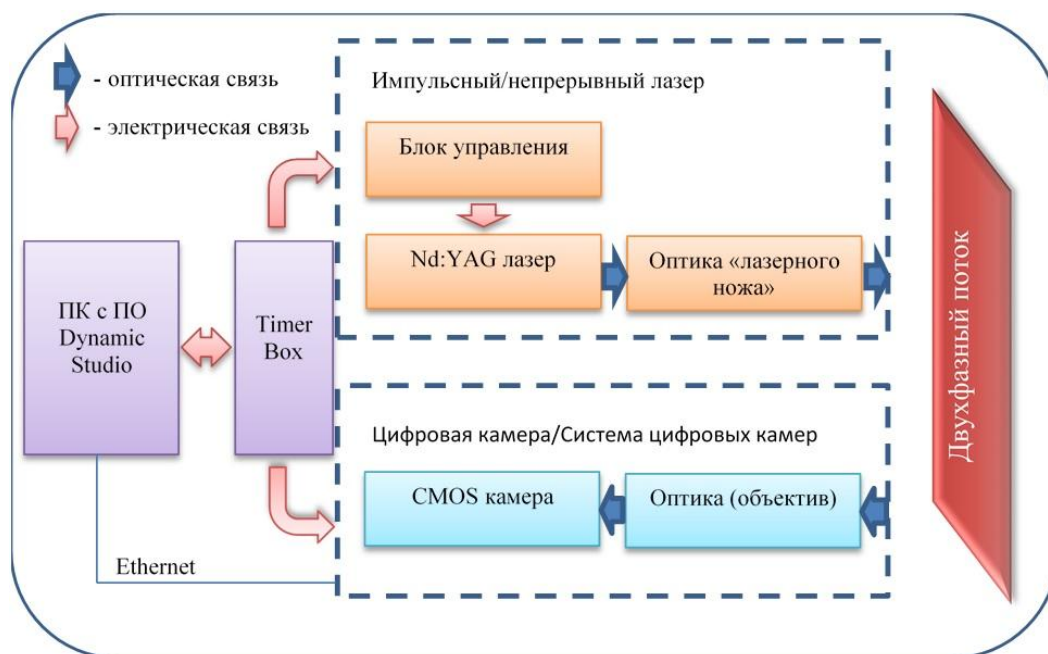


Рис.5. Структурная схема аппаратуры для исследования распределений скоростей в потоке методом PIV

Для повышения эффективности регистрации воздушных пузырей использовались флюоресцирующие частицы (20% раствор Rhodamine B-Particles), растворенные в объемной концентрации 0,0005 %. После освещения потока лазерным "ножом", флюоресцирующие частицы переизлучают поглощенные лазерные лучи с длиной волны $\lambda = 532$ нм в виде флюоресцирующего света с длиной волны $\lambda = 550$ нм. Установленный на цифровую камеру оптический фильтр позволяет фиксировать только флюоресцирующий свет (флюоресцентная визуализация LIF (Laser Induced Fluorescence)). Находящиеся в непосредственной близости от плоскости «лазерного ножа» газовые пузыри отражают и преломляют излученный флюоресцирующими частицами свет, формируя яркое кольцо на изображении.

4. Результаты экспериментов

4.1 Анализ векторных полей скоростей на установившемся участке

Информацию о скорости газовых объемов можно получить из векторного поля скоростей. Для его построения изображение делится на определенное количество элементарных ячеек. Выбор их количества (и соответственно размера) зависят от структуры и скорости потока и определяется из условия не превышения перемещения трассеров в пределах элементарной площадки четверти ее размера. В пузырях воздуха трассерных частиц нет, но за счет применения флюоресцирующих частиц пузыри имеют четкий контур – перемещение части этого контура внутри элементарной площадки также, как и в случае с отдельными трассерами, позволяет найти корреляционную функцию для данной элементарной площадки, максимум которой соответствует наиболее вероятному смещению пикселей в ней. По фиксированному интервалу между вспышками импульсного лазера опре-

деляется наиболее вероятная скорость перемещения пикселей в данной элементарной площадке. Эта обработка проводилась методом Adaptive Correlation (метод, использующий кросскорреляционный алгоритм) [14] с размерами элементарной площадки 32×32 пикселя и 50% перекрытием по вертикали и горизонтали. Ее результатом являются электронные таблицы, где количество строк равно количеству элементарных площадок, на которые разбивается изображение. Информация по каждой площадке представляется в виде: ее положение в пикселях и миллиметрах, проекций скоростей в пикселях и м/с, а также результирующей скорости в м/с. Построенное по этой таблице векторное поле скоростей отражает картину движения двухфазного потока в сечении «лазерного ножа». Для привязки результатов расчета в элементарной площадке к жидкости или газу рассчитанные векторные поля скоростей совмещаются с фиксированными исходными изображениями. В этом случае визуально можно сопоставить вектор скорости в элементарной площадке либо жидкости, либо контуру воздушного пузыря (рис.6).

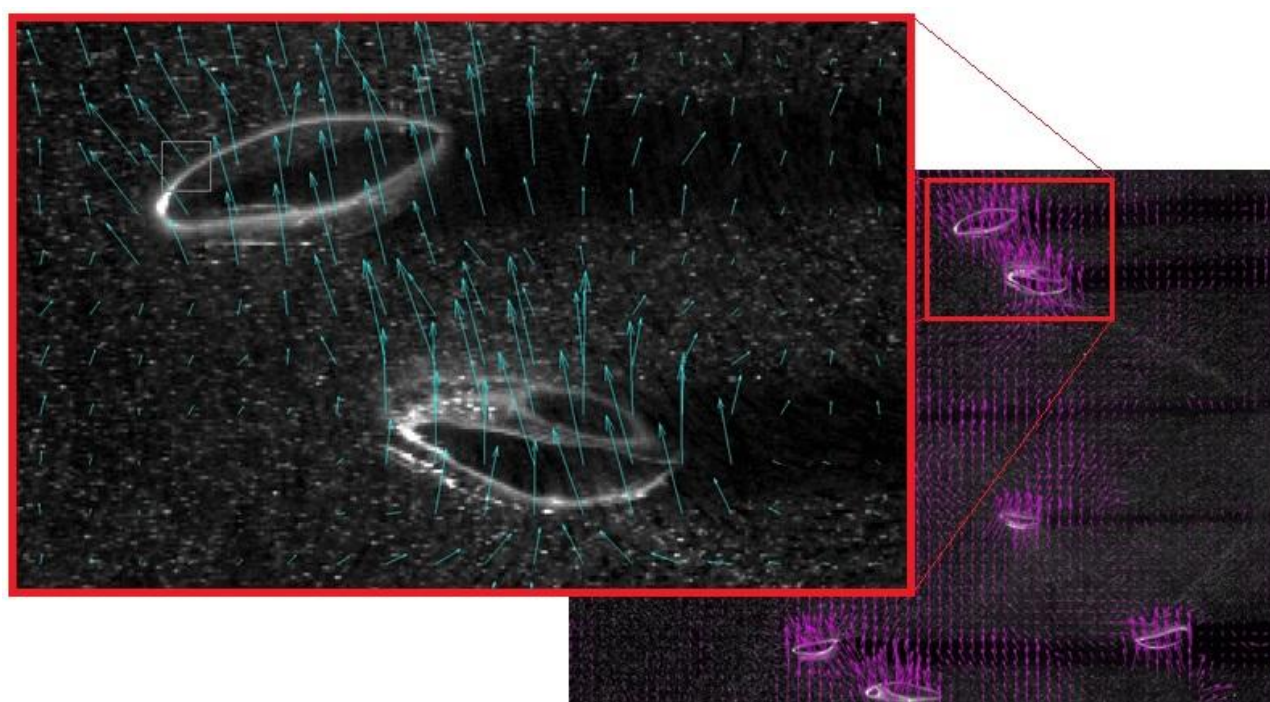


Рис. 6. Изображение всплывающих газовых пузырей канале ($D=80$ мм) с наложением результатов расчета (расход воздуха $0,023 \text{ м}^3/\text{ч}$, приведенная скорость $1,27 \text{ мм/с}$) в области установившегося движения пузырей

Рассмотрим два верхних пузыря (рис. 6), где квадратом обозначена одна из элементарных площадок. Из центра элементарных площадок строятся векторы скорости, соответствующие наиболее вероятному смещению пикселей в области элементарной площадки за время между кадрами. Соответственно, в области с частью контура пузыря – это вектор скорости для данной части контура, поскольку видно, что вклад интенсивности отраженного от пузыря света в корреляционную функцию выше, чем от остальной области элементарной площадки. Таким образом, если компоненты скоростей для векторов из элементарных площадок, в которых присутствует контур пузыря, алгебраически сложить и поделить на число этих площадок, то мы получим компоненты скоростей для целого пу-

зыря. Это справедливо, поскольку форма пузыря ввиду вращения и колебаний на его поверхности за время между кадрами меняется незначительно. Например, для верхнего левого пузыря можем получить следующую информацию (табл. 1). Таким образом определяется вектор скорости для пузыря. Аналогичные процедуры выполняются и для других пузырей на серии кадров для одного и того же расхода воздуха. Затем вычисляется средний вектор скорости для газовой фазы при данном расходе воздуха. Для выборки воздушных пузырей для расхода воздуха ($0,023 \text{ м}^3/\text{ч}$) были найдены аналогичные параметры и вычислены средние характеристики для газовой фазы (табл. 2, рис. 7).

Таблица 1. Параметры движения пузыря

i	V_{xi} , мм/с	V_{yi} , мм/с	V_x пузыря, мм/с	V_y пузыря, мм/с	$ \overline{V} $ пузыря, мм/с	$\text{tg } \alpha$	α , °
1	-198,2	262,0	-106,3	313,5	331,0	2,94	71,3
2	-190,7	282,1					
3	-96,6	327,3					
4	-46,8	314,2					
5	-63,4	336,4					
6	-90,9	355,9					
7	-83,7	397,3					
8	-79,4	380,6					
9	-203,0	343,3					
10	-81,7	288,3					
11	-80,2	237,2					
12	-61,3	237,3					

Таблица 2. Параметры движения пузырей при расходе воздуха $0.023 \text{ м}^3/\text{ч}$

V_x средняя, мм/с	V_y средняя, мм/с	$ \overline{V} $ средняя, мм/с	tga средний	α ° средний
-14,2	307,6	318,2	10,3	78,8

Помимо этого, из векторных полей скоростей можно получить и другую важную информацию. По векторам скоростей (рис.6) видно, что жидкость перед пузырем движется в направлении пузыря и ее скорость убывает по мере увеличения расстояния до его поверхности. Жидкость по сторонам от пузырей увлекается пузырем, но преимущественно направлена в сторону от него. Область, оставляемую позади пузыря, занимает близлежащая жидкость. Все это напоминает силовые линии магнитного поля для постоянного магнита. Также можно предположить, что следование второго пузыря за первым связано с тем, что ему энергетически выгодно занять оставляемую первым пузырем область.

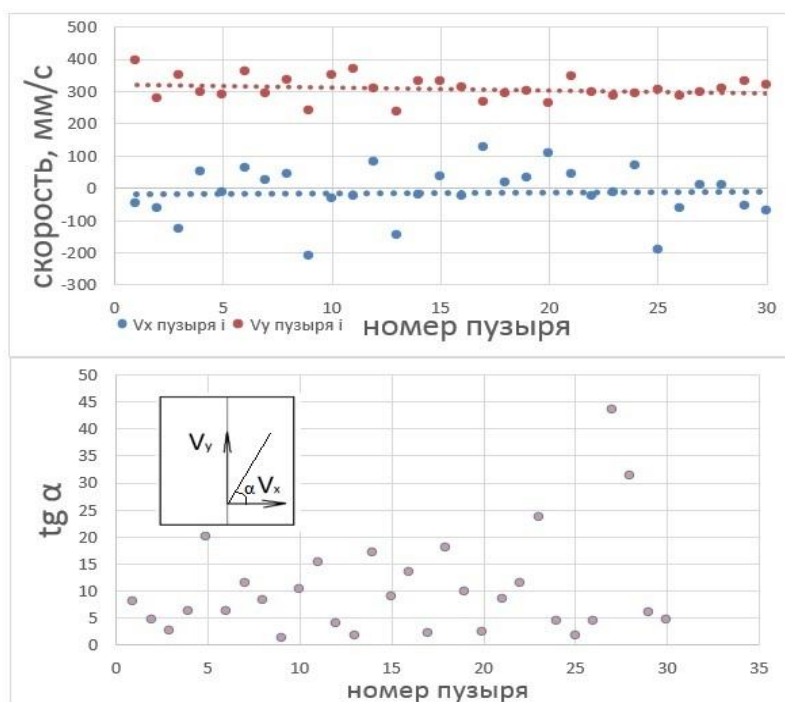


Рис. 7. Компоненты скоростей всплывающих газовых пузырей и отношение V_y/V_x всплывающих газовых пузырей в канале $D=80$ мм

4.2 Анализ скалярных полей скоростей на установившемся участке

Преобразовав векторное поле в скалярное для вертикальных компонент скорости, можно увидеть направленность движения по длине канала. Из рис. 8а хорошо видно, что всплытие пузырей задает преимущественно вертикальное перемещение жидкости вверх в центре канала. На периферии жидкость преимущественно движется вниз. Более наглядно это подтверждает изображение статистики направленности векторов для серии снимков (рис. 8б).

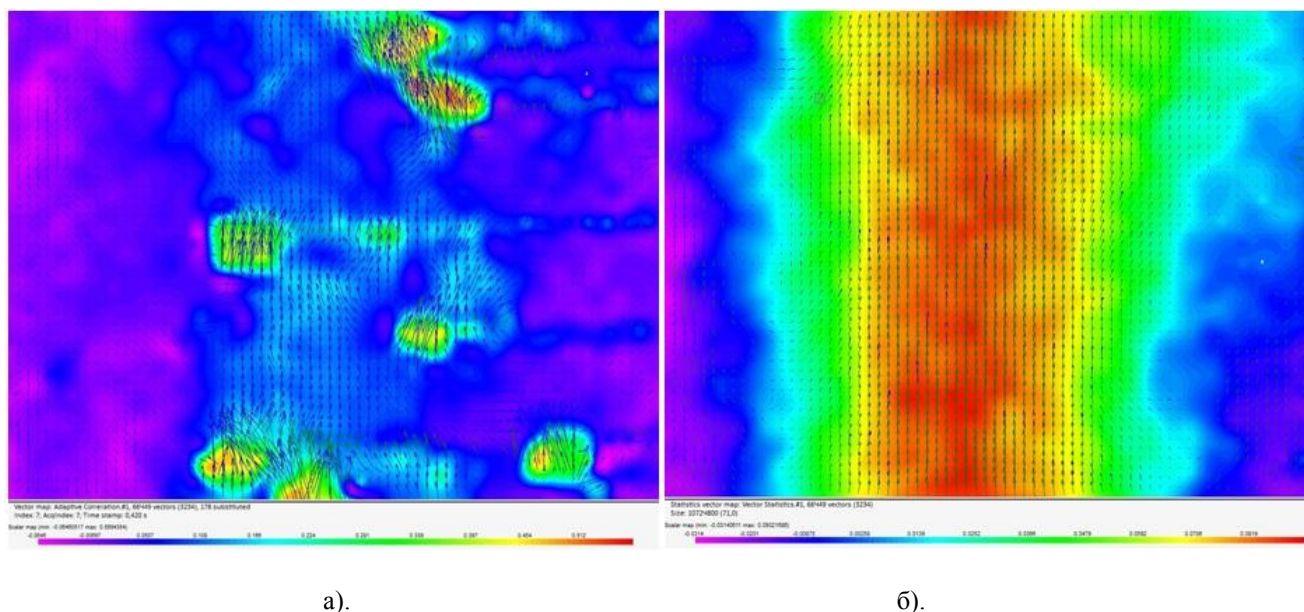


Рис. 8. Скалярное поле вертикальных компонент скорости (а - слева); статистическое скалярное поле вертикальных компонент скорости для серии снимков (б - справа) для канала $D = 80$ мм

4.3 Анализ характера движения фаз на начальном участке

Рассмотрим движение пузырей на выходе из пузырькообразователя. Для нахождения закономерности были получены серии снимков для разных сечений каналов и объемных расходах воздуха (от 0,023 до 0,12 м³/час). С помощью средств обработки изображений, каждая серия снимков для определенных параметров была объединена в один снимок (рис 9 а, б).

После анализа изображений можно разделить движение пузырей на два участка – на первом происходит их поперечное смещение от центра канала на определенное расстояние в сторону периферии; на втором, преимущественно вертикальное движение пузырей вверх. Причем угол под которым движутся на первом участке практически не изменяется и равен примерно 60°. Вероятность смещения пузырей от центра к периферии на первом участке увеличивается с возрастанием объемного расхода воздуха. При определенном расходе видно, что смещение пузырей равно половине диаметра канала (примерно на расстоянии $\frac{\sqrt{3}D}{2}$ от устройства подачи воздуха). Далее разлет ограничен стенками канала. На рис. 10 изображен график зависимости смещения пузырей от центра к периферии в зависимости от объемных расходов воздуха (L – смещение относительно центра канала границы перехода от первого участка ко второму). При $Re = \frac{vD}{\nu}$ (v – характерная скорость пузырей, D – диаметр канала, ν – кинематическая вязкость воды) [17] можно сделать вывод, что чем больше число Рейнольдса, тем требуются большие объемные расходы воздуха для разлета пузырей от источника в центре канала по всему сечению.

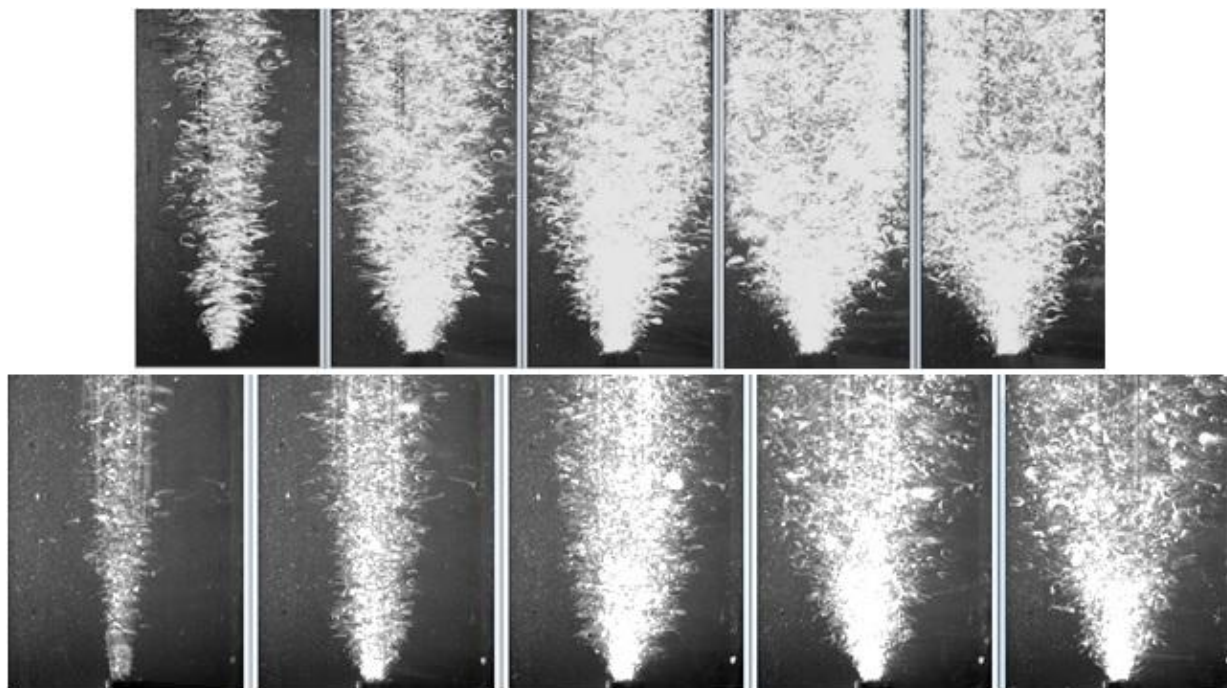


Рис. 9. Объединенные снимки для объемных расходов воздуха (слева направо) – 0,023, 0,03, 0,037, 0,079, 0,12 м³/час: (а - сверху) для канала $D = 50$ мм (приведенные скорости воздуха соответственно 5,09, 6,64, 8,18, 17,47, 26,54 мм/с); (б - снизу) для канала $D = 80$ мм (приведенные скорости воздуха соответственно 1,27, 1,66, 2,05, 4,37, 6,63 мм/с)

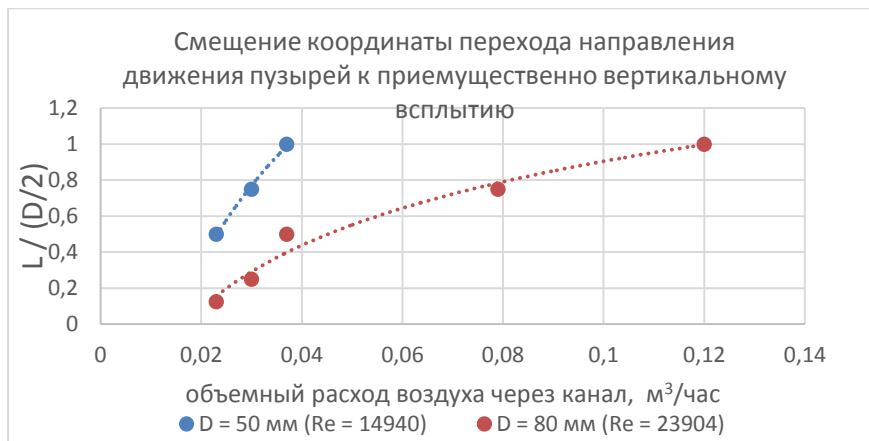


Рис. 10. Наиболее вероятное смещение пузырей от центра при различных диаметрах канала и объемных расходах воздуха

Из среднестатистического поля скоростей можно увидеть, что движение жидкости в нижней части канала направлено вниз (фиолетовый цвет на рис. 11 а, б). Анализируя графики (рис. 12), пришли к логически очевидному выводу, что её скорость возрастает с увеличением расхода воздуха или приведенной скорости воздуха в канале.

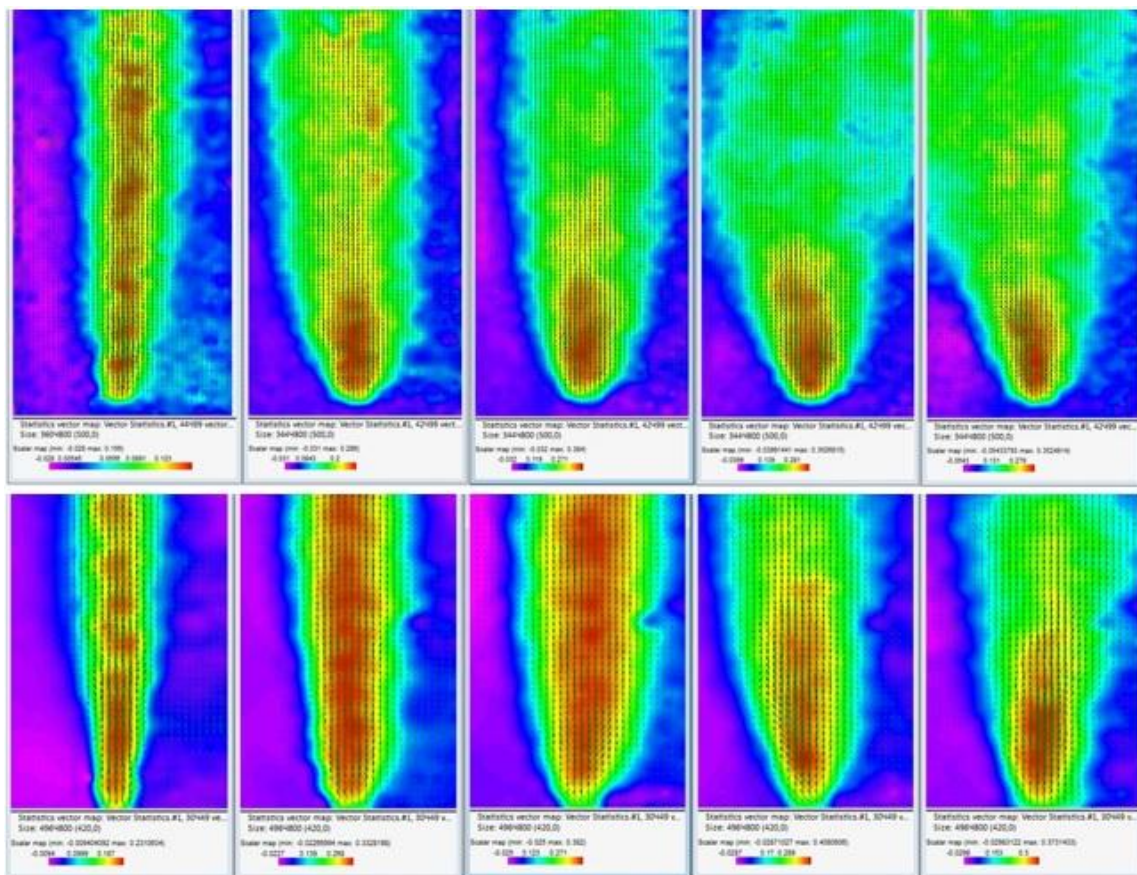


Рис. 11. Скалярное поле среднестатистических вертикальных компонент скоростей для объемных расходов воздуха (слева направо) – 0,023, 0,03, 0,037, 0,079, 0,12 м³/час для канала: (а - сверху) D=50 мм (приведенные скорости воздуха соответственно 5,09, 6,64, 8,18, 17,47, 26,54 мм/с); (б - снизу) D=80 мм (приведенные скорости воздуха соответственно 1,27, 1,66, 2,05, 4,37, 6,63 мм/с)

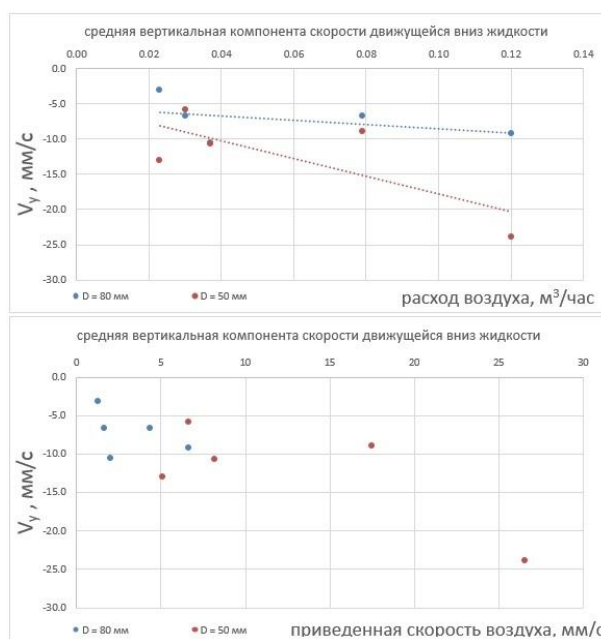


Рис. 12. Средняя вертикальная компонента скорости жидкости в нижней части канала

4.4 Получение истинного газосодержания в канале

С помощью найденных скоростей всплытия газовых пузырей для различных объемных расходов воздуха, оценим газосодержание:

$$\varphi = \frac{V_{\text{возд}}}{V_{\text{общий}}} = \frac{G_{\text{возд}} \cdot t_{\text{пр}}}{\pi \cdot R^2 \cdot h_{\text{воды}}} = \frac{G_{\text{возд}} \cdot \frac{h_{\text{общ}}}{\langle U_G \rangle}}{\pi \cdot R^2 \cdot h_{\text{общ}}} = \frac{G_{\text{возд}}}{\pi \cdot R^2 \cdot \langle U_G \rangle}, \quad (1)$$

где $V_{\text{возд}}$ – объем, занимаемый воздухом, $V_{\text{общий}}$ – общий объем слоя воды с воздухом в канале, $G_{\text{возд}}$ – расход воздуха, $t_{\text{пр}}$ – время пребывания воздуха в слое воды от входа до выхода из объема воды в атмосферу, $h_{\text{общ}}$ – высота столба воды с воздухом в канале, $\langle U_G \rangle$ – средняя скорость воздуха, определяемая PIV методом, R – радиус канала

Таблица 3. Средняя скорость газовой фазы для различных расходов воздуха и соответствующие газосодержания

$G_{\text{возд}}$ м³/час	0,023	0,0265	0,03	0,0335	0,037	0,058	0,079	0,12	0,145	0,17	0,19	0,26
$\langle U_G \rangle$, м/с	0,308	0,3551	0,3276	0,3504	0,3505	0,3564	0,3683	0,3913	0,3989	0,4376	0,4453	0,4506
φ	0,0041	0,0041	0,0051	0,0053	0,0058	0,009	0,0119	0,017	0,0201	0,0215	0,0236	0,0319

Для оценки результата найдем истинное газосодержание, рассчитанное по изменению уровня жидкости в канале при подаче в него воздуха:

$$\varphi_{\text{изм. уровня}} = \frac{V_{\text{возд}}}{V_{\text{общ}}} = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \Delta h}{\pi \cdot R^2 \cdot h_{\text{общ}}} = \frac{\Delta h}{h_{\text{общ}}}, \quad (2)$$

где Δh – увеличение высота столба жидкости в канале при подаче в него воздуха (измерено по шкале линейки); $h_{\text{общ}}$ – общая высота столба жидкости с воздухом (замеренный первоначальный уровень жидкости с прибавленным Δh).

Различия оценивались следующим образом и приведены в табл.4:

$$\delta = \frac{\varphi_{\text{изм.уровня}} - \varphi}{\varphi_{\text{изм.уровня}}} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Таблица 4. Газосодержание, измеренное по изменению уровня жидкости

$G_{\text{возд}}, \text{ м}^3/\text{час}$	0,023	0,0265	0,03	0,0335	0,037	0,058	0,079	0,12	0,145	0,17	0,19	0,26
$\Delta h, \text{ мм}$	3	3,5	4	4,5	5	7	10	14	16	19	22	30
$h_{\text{общ}}, \text{ мм}$	813	813,5	814	814,5	815	817	820	824	826	829	832	840
$\varphi \text{ изм. уровня}$	0,0037	0,0043	0,0049	0,0055	0,0061	0,0086	0,0122	0,017	0,0194	0,0229	0,0264	0,0357
$\delta, \%$	11,7	4,1	3,0	4,3	4,8	5,0	2,7	0,2	3,7	6,2	10,7	10,6



Рис. 13. Зависимость газосодержания от объемного расхода воздуха в канале $D = 80 \text{ мм}$

4.5 Сравнение результатов

Для обоснования корректности подхода к исследованию были сравнены полученные данные с известными результатами для одиночно всплывающих пузырей [16]. Как видно из рис. 14, зависимость скорости всплытия пузырей от размера хорошо коррелирует с графиками, построенными по формулам Пиблса-Гарбера для одиночных пузырей (нисходящая и правая восходящая части кривой). Отличие может быть объяснено тем, что, видимо, для следующих друг за другом пузырей сопротивление жидкости меньше и их скорость больше, чем у одиночно всплывающего пузыря. Также можно предположить, что в стесненных условиях пузырь движется с большей скоростью.

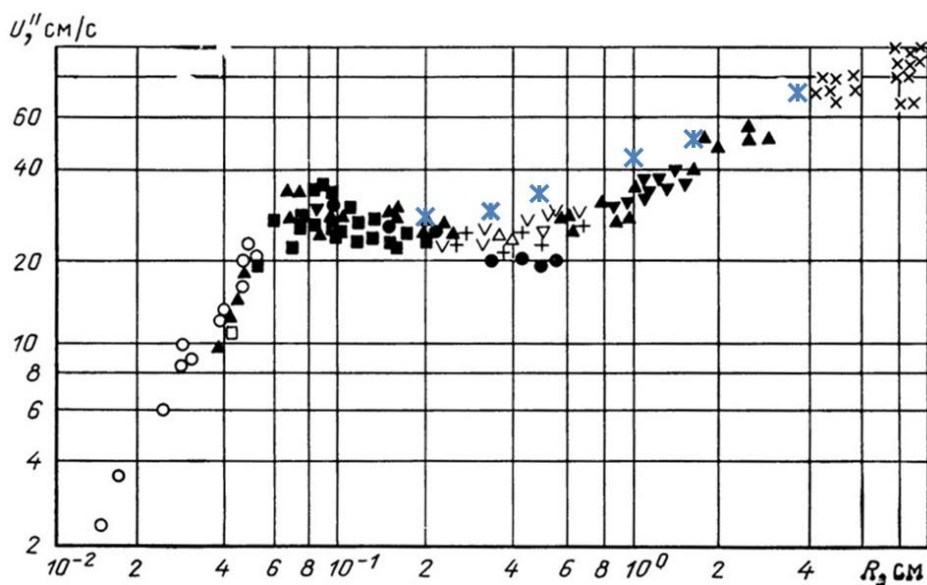


Рис. 14. Зависимость скорости всплытия в воде одиночного пузыря от размера при $p = 10^5$ Па (ж – результаты данной работы, полученные PIV-методом)

Заключение

В работе было представлено исследование адиабатического двухфазного потока в режиме барботажа в цилиндрических каналах с помощью оптических методов, с отсутствием влияния на поток. Найдены характерные скорости газовой фазы и проанализирован характер ее движения в установившемся участке в зависимости от интенсивности подачи газа. Построены скалярные поля для двухфазного потока в установившемся и в начальном участке канала, из которых сделан вывод о характере и направлении перемещения фаз в канале. Найдены смещения газовой фазы от оси на выходе из устройства для подачи воздуха в канал, угол отклонения при различной интенсивности подачи газа. По имеющимся скоростям газовой фазы вычислено газосодержание. Полученные данные сравнены с результатами, полученными в других исследованиях. Результаты исследования могут использоваться при верификации математических моделей для барботажа в цилиндрических каналах при нормальных условиях.

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. Metallurgy. 2006. Вып. 7, № 10. С. 63-68.
12. Raffel M., Willert C., Kompenhans J. Particle Image Velocimetry. A Practical Guide. Springer Berlin Heidelberg, 1998. 253 p. DOI: [10.1007/978-3-662-03637-2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-03637-2)
13. Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа: пер. с англ. М.: Мир, 1983. 312 с.
14. Dynamic Studio 3.2. Руководство пользователя, 2013. 422 с.
15. Накоряков В.Е., Горин А.В. Тепломассоперенос в двухфазных системах. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 1994. 431 с.
16. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. М.: Энергоатомиздат, 1990. 195 с.
17. Леманов В.В., Терехов В.И., Шаров К.А., Шумейко А.А. Экспериментальное исследование затопленных струй при низких числах Рейнольдса // Письма в Журнал технической физики. 2013. Т. 39, вып. 9. С. 34-40.

Structure of two-phase adiabatic flow in air sparging regime in vertical cylindrical channel with water

06, June 2014

DOI: 10.7463/0614.0713566

V.I. Solonin , V.V. Perevezentsev, N.S. Isakov, V.B. Kuzero

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

en7@power.bmstu.ruvpereves@power.bmstu.runi.isakov@gmail.cominfi24ity@gmail.com

The article presents a research of two-phase adiabatic flow in air sparging regime in vertical cylindrical channel filled with water. A purpose of the work is to obtain experimental data for further analysis of a character of the moving phases. Research activities used the optic methods PIV (Particle Image Visualization) because of their noninvasiveness to obtain data without disturbing effect on the flow. A laser sheet illuminated the fluorescence particles, which were admixed in water along the channel length. A digital camera recorded their motion for a certain time interval that allowed building the velocity vector fields. As a result, gas phase velocity components typical for a steady area of the channel and their relations for various intensity of volume air rate were obtained. A character of motion both for an air bubble and for its surrounding liquid has been conducted. The most probable direction of phases moving in the channel under sparging regime is obtained by building the statistic scalar fields. The use of image processing enabled an analysis of the initial area of the air inlet into liquid. A characteristic curve of the bubbles offset from the axis for various intensity of volume gas rate and channel diameter is defined. A character of moving phases is obtained by building the statistic scalar fields. The values of vertical components of liquid velocity in the inlet part of channel are calculated. Using the obtained data of the gas phase velocities a true void fraction was calculated. It was compared with the values of void fraction, calculated according to the liquid level change in the channel. Obtained velocities were compared with those of the other researchers, and a small difference in their values was explained by experimental conditions. The article is one of the works to research the two-phase flows with no disturbing effect on them. Obtained data allow us to understand a character of moving the two-phase flows in sparging regime. They may be used for verification of mathematical models of CFD thermo-hydraulic codes. The future development of the

work is to be connected with the investigation of two-phase flow in a closed circuit with natural circulation.

Publications with keywords: [hydrodynamics](#), [verification](#), [bubbling](#), [two-phase flow](#), [characteristics of structure](#), [one-dimensional and three-dimensional CFD thermohydraulic codes](#), [PIV-method](#)

Publications with words: [hydrodynamics](#), [verification](#), [bubbling](#), [two-phase flow](#), [characteristics of structure](#), [one-dimensional and three-dimensional CFD thermohydraulic codes](#), [PIV-method](#)

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 translation: *Atomic Energy*, 2004-12, 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 translation: *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 blowdown]. *Vestnik YuUrGU. Ser. Metallurgiya*, 2006, iss. 7, no. 10, pp. 63-68. (in Russian).
12. Raffel M., Willert C., Kompenhans J. *Particle Image Velocimetry. A Practical Guide*. Springer Berlin Heidelberg, 1998. 253 p. DOI: [10.1007/978-3-662-03637-2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-03637-2)
13. Bendat J.S., Piersol A.G. *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis*. Wiley-Interscience, New York, 1980. (Russ. ed.: Bendat J.S., Piersol A.G. *Primenenie korrelyatsionnogo i spektral'nogo analiza*. Moscow, Mir Publ., 1983. 312 p.).
14. Dynamic Studio 3.2. Rukovodstvo pol'zovatelya [Dynamic Studio 3.2. User manual], 2013. 422 p. (in Russian).
15. Nakoryakov V.E., Gorin A.V. *Teplomassoperenos v dvukhfaznykh sistemakh* [Heat and mass transfer in two-phase systems]. Novosibirsk, Institute of Thermophysics of SB RAS Publ., 1994. 431 p. (in Russian).
16. Kutateladze S.S. *Teploperedacha i gidrodinamicheskoe soprotivlenie* [Heat transfer and hydrodynamic resistance]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 195 p. (in Russian).
17. Lemanov V.V., Terekhov V.I., Sharov K.A., Shumeyko A.A. [An experimental study of submerged jets at low Reynolds numbers]. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2013, vol. 39, iss. 9, pp. 34-40. (English translation: *Technical Physics Letters*, 2013, vol. 39, iss. 5, pp. 421-423. DOI: [10.1134/S1063785013050064](https://doi.org/10.1134/S1063785013050064))