

Гидродинамика и теплообмен двухфазного газожидкостного потока в элементах ТВС¹

Кашинский О.Н.*, Прибатурин Н.А.****, Лобанов П.Д.*, Курдюмов А.С.*, Рандин В.В.*

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

**Новосибирский филиал Института проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Новосибирск

Проведено исследование гидродинамики и теплообмена двухфазного потока в основных элементах теплообменных контуров ЯЭУ — осесимметричном кольцевом канале и сборке вертикальных стержней. Проведено исследование особенностей распределения газовой фазы в сечении рабочих участков установок. Получены зависимости напряжения трения и коэффициента теплообмена при различных расходных скоростях жидкости и газа. Рассмотрено взаимодействие одно- и двухфазного потоков с преградами, которые перекрывают часть поперечного сечения каналов — дистанционирующей решеткой в сборке стержней и перегородкой, закрывающей 25% поперечного сечения кольцевого канала. Полученные данные могут быть использованы для верификации современных расчетных кодов.

1. Введение

К настоящему времени двухфазное течение в сборках стержней и пространственно сложных каналах реакторных установок фактически не изучено, соответственно отсутствуют и закономерности такого течения. В литературе имеется большое количество работ, посвященных динамике отдельных пузырей и пузырьковых смесей. Большинство работ по исследованию динамики двухфазной газо- и парожидкостной смеси проведены в каналах простой геометрии, в основном в вертикальных трубах. Приведены карты режимов течения, описаны механизмы, приводящие к распределению газовой и жидкой фаз в поперечном сечении каналов, особенностям межфазных взаимодействий, получены эмпирические корреляции. В последнее время появились работы, где проблемы движения газожидкостных смесей разрешаются при помощи современных расчетных методик DNS и LES. Однако модели, полученные для труб, нельзя напрямую перенести на каналы с более сложной геометрией, например, такие, как сборки стержней или кольцевые каналы.

В связи с этим возникает необходимость проведения экспериментальных исследований характера движения газо- и парожидкостных потоков в каналах сложной геометрии. О большом интересе к подобным исследованиям свидетельствует появле-

ние отдельных работ, выполненных ведущими зарубежными исследовательскими группами в последние пять лет [1–4].

2. Экспериментальная установка

Работа выполнена на гидродинамическом стенде ИТ СО РАН, представляющем собой замкнутый по жидкой фазе и разомкнутый по газовой фазе контур. Циркуляционным насосом жидкость из бака подавалась на вход вертикально размещенного рабочего участка, в который устанавливалась модель кольцевого канала или сборки стержней, имитирующей течение в ТВС. Из рабочего участка жидкость по отводному трубопроводу попадала обратно в бак. Для поддержания температуры рабочей жидкости $25 \pm 0.2^\circ \text{C}$ использовалась система термостатирования. Измерения среднего и пульсационного напряжений трения на стенке выполнены с помощью электродиффузионного метода [5]. Измерения распределения газосодержания проводились при помощи датчика проводимости. Измерения проводились в области, расположенной непосредственно за препятствием в кольцевом канале и за дистанционирующей решеткой в сборке стержней. Минимальные шаги измерений составляли 10 градусов по азимутальной координате и 5 мм по высоте рабочего участка. Последующая обработка записанных реализаций сигналов датчиков позволяла построить трехмерные распределения трения на стенке газосодержания. Измерения проводились при расходной скорости жидкости до 3 м/с.

¹Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых кандидатов наук МК-5147.2012.8.

3. Результаты измерений

3.1. Кольцевой канал

Кольцевой канал является простейшей физической моделью течения в системе продольных стержней. Объектом исследования было одно- и двухфазное течения в осесимметричном кольцевом канале при создании возмущений, которые провоцируют значительные изменения структуры течения, в частности, турбулентных характеристик, локального теплообмена, распределения газосодержания. Возмущение потока в кольцевом канале было создано путем частичного перекрытия поперечного сечения. Такая геометрия позволяет получить поток со строго выраженной крупномасштабной трехмерной структурой, что вызвано перестроением линий тока жидкости при обтекании преграды. Рабочим участком является вертикальная труба из оргстекла внутренним диаметром $D_O = 42.2$ мм и длиной 3600 мм. По оси этой трубы установлена внутренняя металлическая труба с наружным диаметром $D_I = 20$ мм. Гидравлический диаметр кольцевого канала $D_h = 22.2$ мм. В рабочем участке реализуется восходящее течение жидкости. В кольцевом канале установлена преграда — металлическая пластина высотой 2 мм, перекрывающая четверть поперечного сечения кольцевого канала (рис. 1). Преграда находится на расстоянии $L_O = 2700$ мм от входа в рабочий участок. Данная преграда вносит сильное возмущение в течение, имеющее трехмерный характер. Для центрирования центральной трубы в канале выше преграды по потоку располагались центрирующие решетки, схема которых приведена на рис. 1(б). Штриховой линией показан диаметр внешней трубы, а сплошными линиями — перекрытие решеткой поперечного сечения потока. Эксперименты проводились при расходной скорости жидкости 0.45 м/с, число Рейнольдса, рассчитанное по эквивалентному диаметру канала, равно 11000. Внутренняя труба закреплялась на координатном устройстве, при помощи которого производилось ее перемещение вдоль вертикальной оси канала и вращение трубы. В результате можно было менять положение датчиков измерения трения, теплового потока, газосодержания относительно преграды, что позволяло проводить исследование поля течения и теплообмена как по продольной, так и по азимутальной координатам.

Было проведено исследование локальных осредненных и пульсационных характеристик течения жидкости, имеющей трехмерную структуру. Получены азимутальные распределения напряжения трения и его пульсаций на различном расстоянии от перегородки. Показано, что в непосредственной близости от перегородки на-

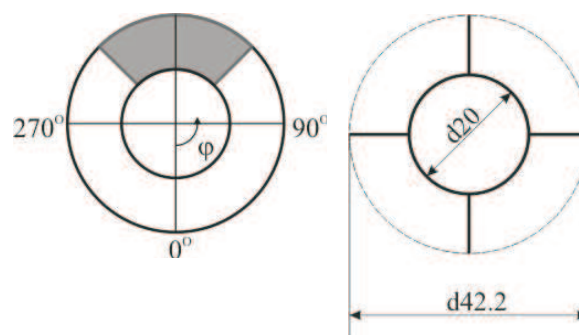


Рис. 1. Схемы поперечного сечения: а — кольцевого канала и перегородки; б — дистанционирующей решетки

блюдается сложная структура сигнала датчиков трения, содержащая выраженный минимум в затененной области сечения канала и два максимума, расположенных по краям этой зоны. При увеличении расстояния от перегородки наблюдается выравнивание сигнала датчика, однако слабое влияние перегородки заметно на расстоянии свыше 600 мм. Распределение турбулентных пульсаций напряжения трения на стенке трубы непосредственно за перегородкой характеризуется резким возрастанием в затененной области и небольшим снижением в свободном сечении канала. На расстоянии более 400 мм от перегородки измеренные значения интенсивности турбулентных пульсаций потока соответствуют таковым при турбулентном течении невозмущенной жидкости.

Для двухфазного газожидкостного течения проведено исследование распределения газа за возмущающей поток преградой. Данные об азимутальном распределении локального газосодержания за преградой приведены на рис. 2. За преградой формируется трехмерная вихревая структура. За счет вихрей происходит захват пузырей газа, что хорошо наблюдается визуально. Это приводит к появлению повышенного газосодержания в области за преградой. В свободном сечении канала газ проходит без задержек и газосодержание значительно ниже. Интересно, что в свободной от преграды области с увеличением расстояния от заслонки наблюдается переход профиля газосодержания от параболического к седлообразному. Пик газосодержания за заслонкой наблюдается на расстоянии более 350 мм от заслонки. Распределение локального газосодержания по высоте канала после заслонки приведено на рис. 3. Вид А показывает сечение, которое соответствует минимальному (слева) и максимальному (справа) отклонению от преграды. Заметно, что за преградой формируется область с повышенным газосодержанием. В продольном сечении канала за-

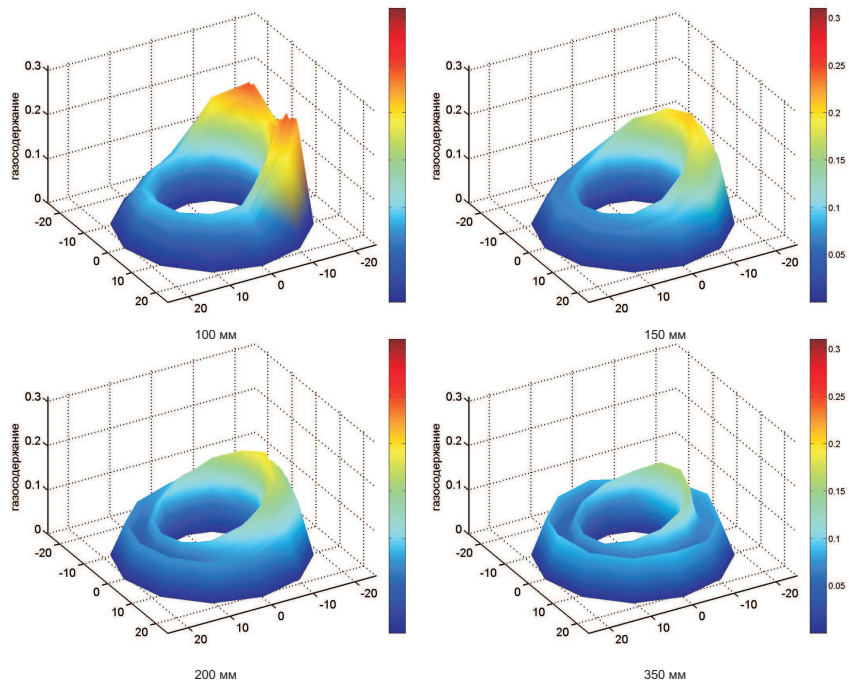


Рис. 2. Распределение локального газосодержания в поперечном сечении в кольцевом канале с перегородкой

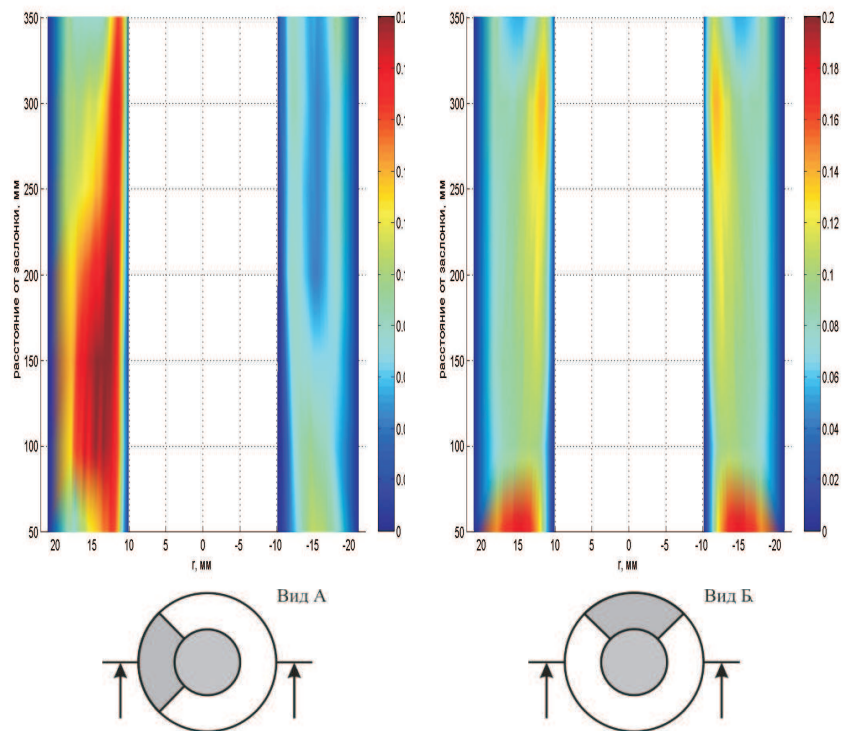


Рис. 3. Распределение локального газосодержания в продольном сечении в кольцевом канале с перегородкой

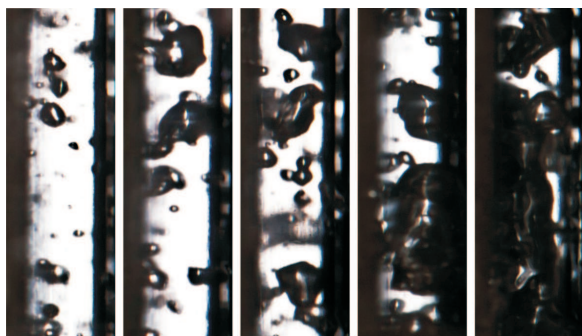


Рис. 4. Фотография пузырей в межтвэльном пространстве

метна миграция газа к внутренней стенке канала с увеличением расстояния от преграды. В противоположном положении заметно, как происходит переход от параболического при расстоянии от преграды 50 мм к седлообразному профилю на расстоянии более 200 мм от преграды.

3.2. Сборка вертикальных стержней

Измерения проводились при помощи датчика проводимости, установленного на центральном имитаторе твэла сборки. В процессе измерений газосодержания производилось вращение центральной трубки — имитатора твэла вокруг оси и ее перемещение по высоте. Позиционирование датчика относительно осевой и азимутальной координат производилось с использованием шаговых электродвигателей. Измерения проводились в области, расположенной непосредственно за ДР. Минимальные шаги измерений составляли 10 градусов по азимутальной координате и 5 мм по высоте модели имитатора ТВС. Измерения проводились при расходной скорости жидкости 3 м/с. Число Рейнольдса, рассчитанное по гидравлическому диаметру, равнялось 37000.

Исследования структуры двухфазного течения в межтвэльной ячейке за дистанционирующей решеткой показывают, что в потоке возможно движение как мелких пузырей газа, так и крупных удлиненных газовых образований, перекрывающих поперечное сечение межтвэльного пространства (рис. 4). Светлые области соответствуют жидкости, темные — газовой фазе.

Проведены измерения азимутального распределения газосодержания вокруг центрального стержня — имитатора твэла по высоте канала и в зависимости от точки ввода газа в поток. Схема измерений приведена на рис. 5. Пунктирной линией на рисунке показана линия хода измерительного датчика. Распределение газовой фазы вокруг цен-

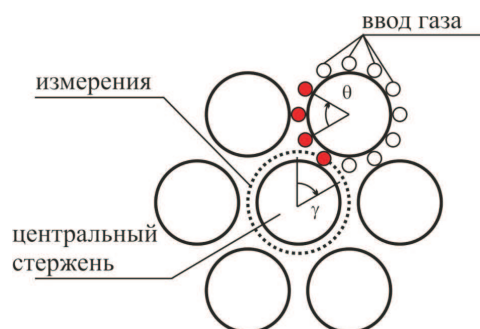


Рис. 5. Схема ввода газовой фазы в поток

трального стержня сборки при различных точках ввода газа приведено на рис. 6. Здесь Z обозначает расстояние от точки измерения до ДР; γ — азимутальный угол развертки измерений. В случае ввода газа в область, окружающую центральный имитатор твэла (рис. 6(a)), в секторе, соответствующем точке ввода газа в поток, наблюдаются большие значения локального содержания газовой фазы α . При изменении угла точки ввода газа наблюдается снижение значений α вплоть до практически нулевых значений в противоположной точке ввода газа относительно оси центрального имитатора твэла. Результаты этих измерений указывают на слабое перемешивание газовой фазы в межъячеечном пространстве.

Осредненные по азимутальному углу значения газосодержания в зависимости от расстояния от дистанционирующей решетки показывают, что для всех измеренных положений точки ввода газа наблюдается повышенное газосодержание на расстоянии не более 50 мм от решетки. Это вызвано тем, что за решеткой формируется вихревое течение, которое затягивает пузырьки газа. При увеличении расстояния от решетки происходит выравнивание распределения газовой фазы. Это свидетельствует о том, что в области за решеткой межъячеечное перемешивание слабо выражено.

Проведение измерений при разных расходных параметрах жидкой и газовой фаз позволило построить карту течения двухфазного потока в сборке при вводе газа из одиночного источника (рис. 7). Пузырьковый режим течения характеризуется наличием в потоке достаточно крупных, деформированных пузырей (spherical cap). При увеличении расходного газосодержания и снижении расходной скорости жидкости наблюдается переход к каналному снарядному режиму течения (cell Taylor bubble). Этот режим характеризуется наличием в потоке крупных газовых образований, длина кото-

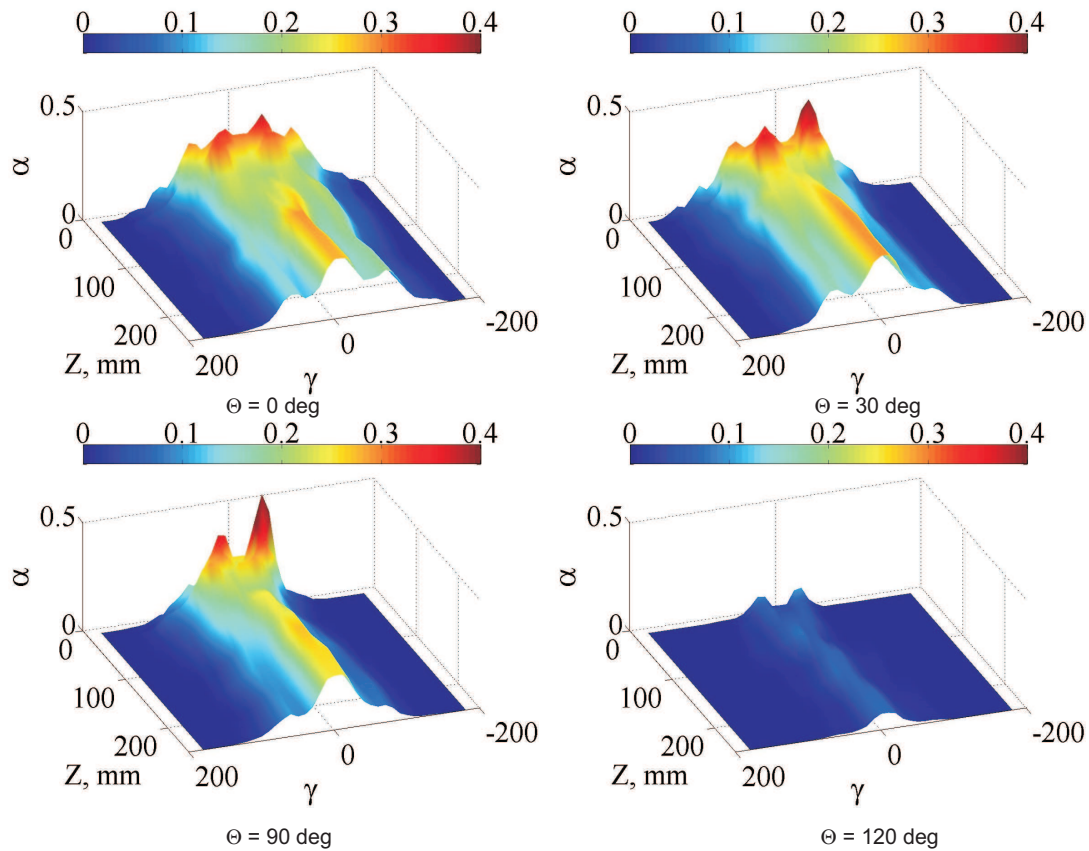


Рис. 6. Распределение газовой фазы в сборке стержней

рых существенно превышает диаметр канала. Канальные пузыри Тейлора занимают практически все поперечное сечение канала. Снарядный режим течения обнаружен при более высоких скоростях жидкости и расходах газа.

Гистограммы оценочной длины пузырей приведены на рис. 8 для скорости жидкости 3 м/с. Длина пузырей определялась как произведение времени взаимодействия пузыря с датчиком газосодержания на среднюю скорость пузырей в потоке. Наибольшее количество пузырей имеет размер не более 5 мм, количество более крупных пузырей существенно ниже. Явно выраженного изменения формы гистограммы при изменении расстояния от решетки не происходит, что может говорить об отсутствии интенсивных процессов дробления и коалесценции пузырей.

Таким образом, измерения показывают, что при двухфазном течении в сборке вертикальных стержней — имитаторов твэлов наличие дистанционирующей решетки вызывает неравномерное по высоте распределение газосодержания. Сразу же за решетками возникает область с увеличенным га-

зосодержанием, которое затем снижается до средней величины, соответствующей режиму течения. В области вблизи решеток происходит и уменьшение скорости пузырей, возможны коалесценция пузырей и увеличение их размера. Длина этой области зависит от конструкции решетки и колеблется в диапазоне 20–40 мм, увеличение газосодержания по сравнению с основным потоком составляет от 10 до 30%. Средняя скорость пузырей газа в потоке превышает расходную скорость жидкости в среднем на 25%. В широком диапазоне газосодержаний и приведенной скорости жидкости преобладающим является каналный снарядный режим течения.

4. Заключение

Проведено экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена двухфазного течения потока теплоносителя в каналах сложной формы, характерных для реакторных установок: кольцевом канале с частичным перекрытием сечения и сборке вертикальных стержней, имитирующей конструкцию тепловыделяющей сборки. Получены закономерности изменения газосодержания по высоте

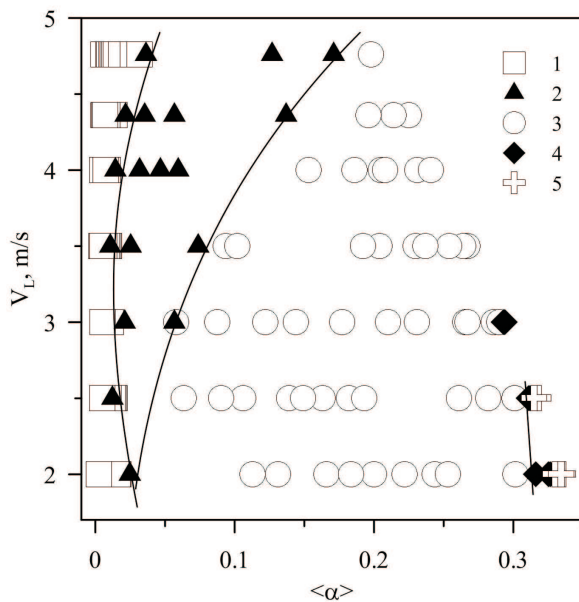


Рис. 7. Карта режимов двухфазного течения в вертикальной сборке имитаторов твэлов. 1 — пузырьковый; 2 — переходный; 3 — каналный снарядный; 4 — переходный; 5 — снарядный режимы течения двухфазной жидкости. Сплошными линиями выделены характерные границы переходов режимов течения

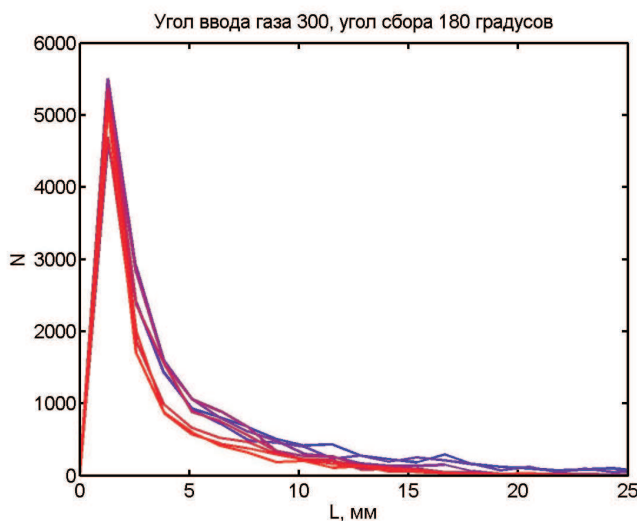


Рис. 8. Гистограмма распределения размеров пузырей за решеткой ТВС-1200

и поперечному сечению каналов, эволюции газовых образований, осредненные и пульсационные гидродинамические характеристики течения, закономерности теплообмена. Показана качественная аналогия поведения трения и теплообмена в двухфазном потоке.

Получена база экспериментальных данных, включающая в себя распределение локальных осредненных характеристик течения по сечению каналов, распределение турбулентных параметров течения, включающих в себя корреляционные и спектральные характеристики, данные по локальному теплообмену, данные по распределению газосодержания. Результаты работы могут служить бенчмарком для верификации CFD кодов, используемых при гидродинамических расчетах реакторных установок.

Список литературы

- [1] Praser H. Novel experimental measuring techniques required to provide data for CFD verification // Nuclear Engineering and Design. 2008. V. 238. P. 744–770.
- [2] Yadigaroglu G., Andreani M., Dreier J., Coddington P. Trends and needs in experimentation and numerical simulation for LWR safety // Nuclear Engineering and Design. 2003. V. 221. P. 205–223.
- [3] Roy R.P., Velidandla V., Kalra S.P., Peturand P. Local measurements in the two phase flow region of subcooled boiling flow // Trans. ASME. J. Heat Transfer. 1994. V. 116. P. 660–669.
- [4] Hibiki T., Situ R., Mi Y., Ishii M. Local flow measurements in vertical upward bubbly flow in an annulus // Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. V. 46. P. 1479–1496.
- [5] Накоряков В.Е., Бурдуков А.П., Кашинский О.Н., Гешев П.И. Электродиффузионный метод исследования локальной структуры однофазных и двухфазных течений. Издательство Института теплофизики, Новосибирск, 1986, 247 с.