

04, апрель 2016

УДК 532.574.7

Определение скоростей фаз восходящего двухфазного потока в вертикальном канале PIV-методом

***Мартынов Д.Р.**, студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Ядерные реакторы и установки»*

***Исаков Н.Ш.**, ассистент кафедры
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Ядерные реакторы и установки»*

*Научный руководитель: **Перевезенцев В.В.**, д.т.н., профессор,
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
en7@power.bmstu.ru*

Введение

Двухфазные потоки получили широкое распространение в водоохлаждаемых ядерных энергетических установках (ЯЭУ) [1, 2] в различных системах охлаждения, как при режимах нормальной эксплуатации, так и в аварийных ситуациях. Актуальной задачей обоснования безопасности проектов ЯЭУ в части надежности систем охлаждения с двухфазным потоком является повышение достоверности определения его различных характеристик (скоростей и коэффициента скольжения фаз, относительные доли фаз) [6, 7]. Среди современных методов расчетного обоснования проектов ЯЭУ значительное место занимает математическое моделирование в *одномерном* (коды улучшенной оценки) и *трехмерном* подходах (CFD-коды) [8, 9, 10]. При выполнении расчетных обоснований с использованием математических моделей описания характеристик двухфазных потоков применяются верифицированные соотношения на базе экспериментальных данных. Для детальной верификации структурных гидродинамических параметров, таких как скорость и газосодержание (паросодержание), может быть организовано их экспериментальное определение, базирующееся, в том числе, на виброакустических методах [7, 11] и методах, использующих цифровую визуализацию

[6] . В рамках проведенного исследования был использован метод цифровой трассерной визуализации (PIV-метод). В данной работе приведены краткие сведения о возможностях использования методов цифровой трассерной визуализации при измерениях скоростей фаз двухфазного потока в случае вертикального однонаправленного их движения, также рассматривается метод адаптивных корреляций в составе PIV-метода. Приведены поля скоростей фаз, полученные в ходе моделирования пузырькового режима течения потока, а также представлены результаты обработки кадров высокоскоростной фотосъемки его структуры.

Параметры и обозначения

Таблица 1

Параметры и обозначения

<i>Параметр</i>	<i>Обозначение</i>
Q'	объемный расход жидкой фазы
Q''	объемный расход газообразной фазы
w'	скорость жидкой фазы
w''	скорость газообразной фазы
s	коэффициент (фактор) скольжения фаз
φ	истинное объемное газосодержание

Цель и метод исследования

Приведенные результаты исследований были получены в рамках экспериментов, посвященных изучению динамики двухфазных потоков в условиях течения в вертикальных цилиндрических каналах в широком диапазоне изменения долей фаз. Целью данного исследования является выработка подходов к определению коэффициента скольжения фаз при пузырьковом режиме течения на основе результатов динамической регистрации мгновенных полей скорости PIV-методом.

Описываемый в данной работе *метод цифровой трассерной визуализации* (PIV-метод) – оптический метод измерения мгновенных полей скорости жидкости или газа в выбранном сечении потока, относящийся к классу бесконтактных оптических методов, позволяет регистрировать мгновенные поля скоростей в плоскости измерения. Одним из важнейших его преимуществ является отсутствие возмущающего влияния на поток. К достоинствам метода можно также отнести широкий динамический диапазон измеряемых скоростей. В рамках PIV-метода отдельное место занимает метод адаптивных корреляций. В этом методе вычисляются векторы скорости для начальной расчетной области (IA),

размеры которой равны N , умноженные на размеры конечной расчетной области. При этом промежуточные результаты используются для следующей расчетной области меньшего размера, до тех пор, пока не будут достигнуты размеры конечной расчетной области. Кроме того, в метод адаптивных корреляций можно добавить локальную валидацию, в результате которой будет создано меньше «плохих» векторов (фильтрация) [5]. Основной недостаток PIV-метода – неидеальность трассирующих частиц (размер, плотность), приводящей к тому, что трассеры не всегда точно следуют за потоком, а также их отсутствием внутри пузырей и скоплением на границе раздела фаз. Кроме того, диаметр используемых частиц ограничивает размер элементарной области, а использование более мелких частиц сопряжено с влиянием броуновского движения на их смещение, а также накладывает ограничения на мощность источника излучения и чувствительность регистрирующей аппаратуры.

Принцип PIV-метода

PIV-метод позволяет регистрировать мгновенные поля скоростей потока в плоскости измерения. Измерение мгновенного поля скорости в заданном сечении основано на измерении перемещения частиц примеси, находящихся в плоскости сечения, за фиксированный интервал времени. В поток жидкости или газа добавляются частицы малого размера (трассеры). Измерительной областью потока считается плоскость, "вырезаемая" световым ножом (рис. 1). Частицы в измерительной плоскости потока должны быть освещены минимум дважды. Образы частиц регистрируются на цифровую камеру. Последующая обработка изображений позволяет рассчитать смещения частиц за время между вспышками источника света и построить двухкомпонентное поле скорости. Измеренные двухкомпонентные значения векторов являются проекциями реальных (трехмерных) векторов на плоскость, перпендикулярную оптической оси регистрирующей камеры. Для измерения трех компонент скорости используют две камеры, оптические оси которых ориентированы под определенным углом относительно друг друга.

В качестве источника излучения применяются твердотельные импульсные лазеры. Они имеют малую длительность импульса ($\sim 4 \dots 10$ нс) и достаточно высокую энергию в импульсе.

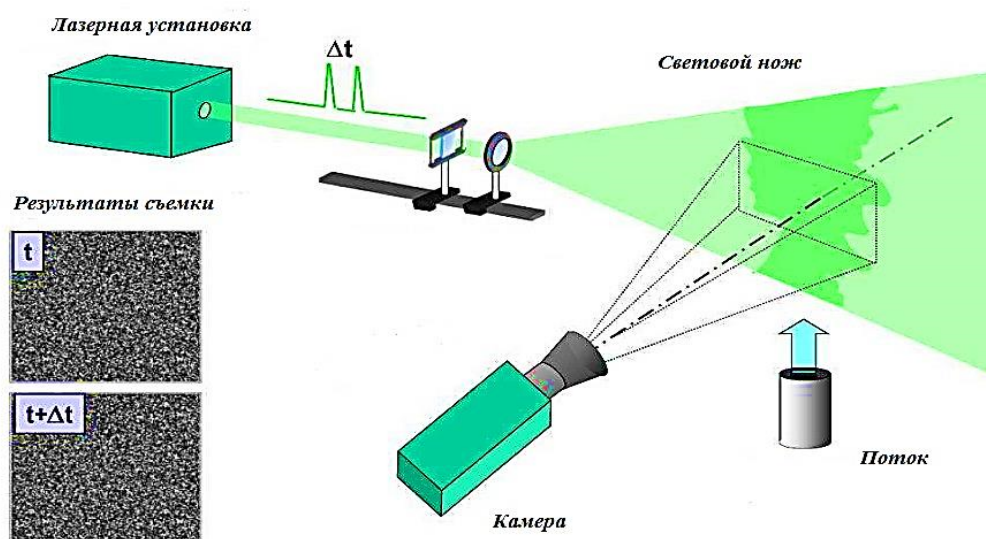


Рис. 1. Принцип PIV-метода измерения скоростей потока

Проведение эксперимента и последующая обработка результатов производилась с использованием специализированного программного обеспечения (ПО) *Dantec Dynamics*[5].

Описание экспериментального стенда

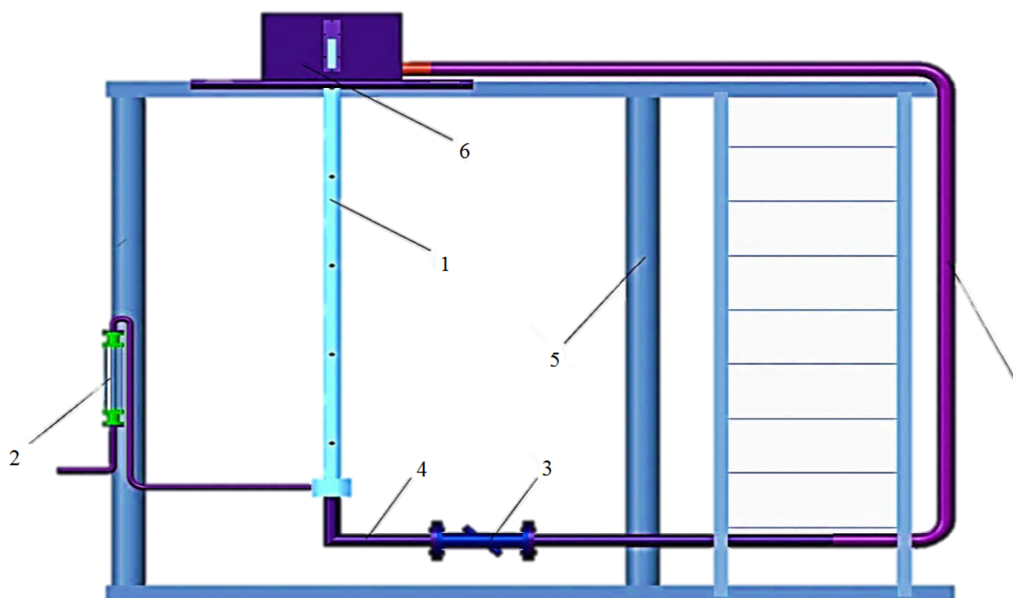


Рис. 2. Экспериментальный стенд

Экспериментальный стенд кафедры «Ядерные реакторы и установки», предназначенный для моделирования двухфазного (вода-воздух) потока [7] . Стенд представляет собой адиабатический контур циркуляции, оснащенный средствами

измерений (рис. 2). В состав контура входит сменный экспериментальный участок **1** в виде цилиндрического вертикального канала, выполненный из оргстекла, опора **5**, подводящий участок **4** и опускной участок **7**, бак-сепаратор **6**. В состав измерительного оборудования входит ротаметр **2**, а также оптическое устройство (камера), лазерная установка (рис. 3) и ПК с ПО для обработки полученных материалов и построения полей скоростей.

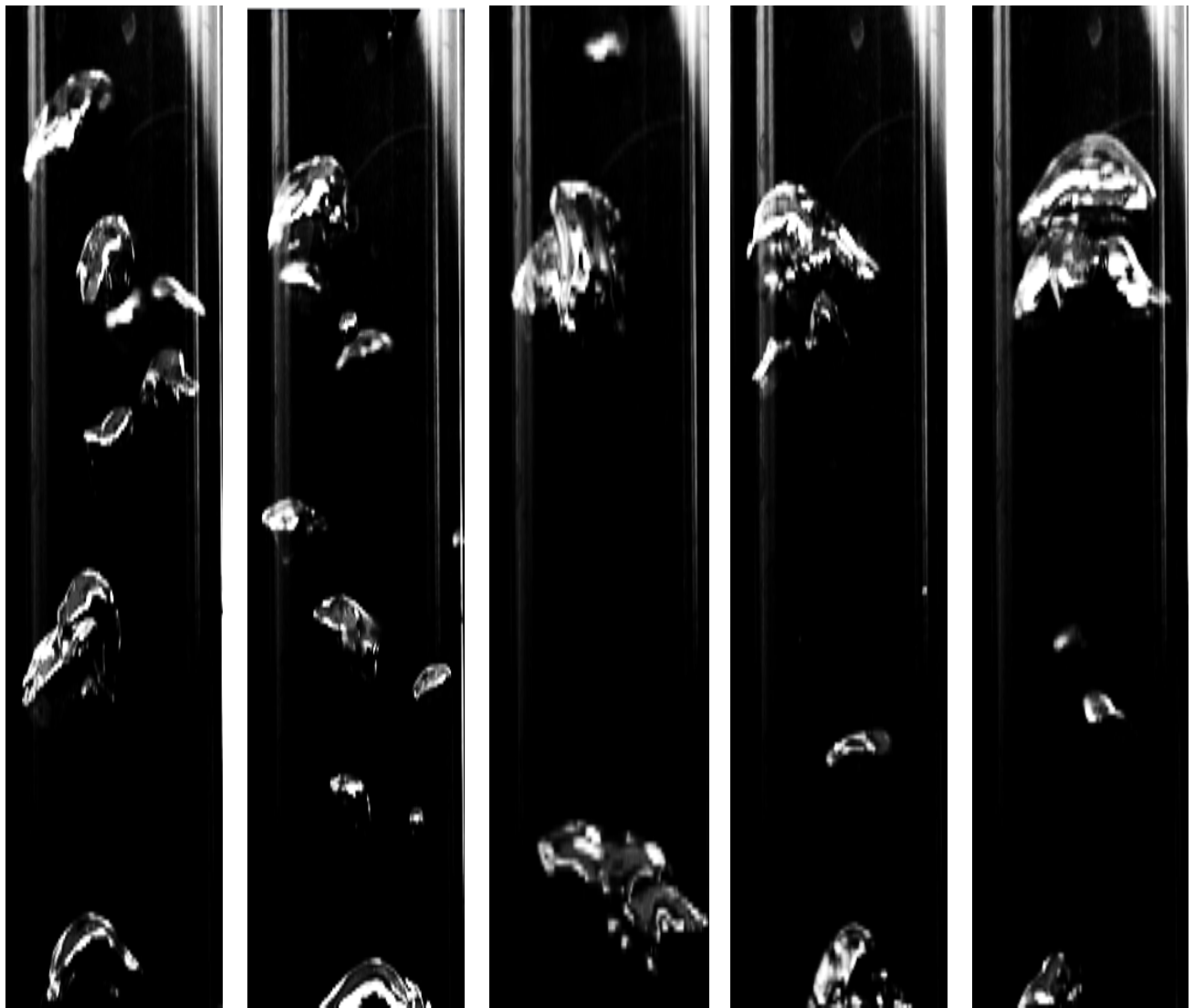


Рис. 3. Лазерная установка

Результаты эксперимента

В рамках приведенного исследования на стенде моделировался пузырьковый режим течения двухфазного вода-воздух потока, который реализован при следующих значениях объемных расходов фаз: воды $Q' = 1,370 \text{ м}^3/\text{ч}$ и воздуха $Q'' = 0,078 \text{ м}^3/\text{ч}$.

На рис. 4 показана структура двухфазного потока в вертикальном цилиндрическом канале (внутренний диаметр $\varnothing 30 \text{ мм}$). Соответствующие реализованному режиму результаты регистрации и последующей обработки PIV-методом параметры потока (поле скорости и распределение скоростей фаз), приведены на рис. 5, 6.



1 кадр

2 кадр

3 кадр

4 кадр

5 кадр

Рис. 4. Кадры высокоскоростной фотосъемки потока
(центральное вертикальное сечение, временная задержка между кадрами: 0,067 сек)

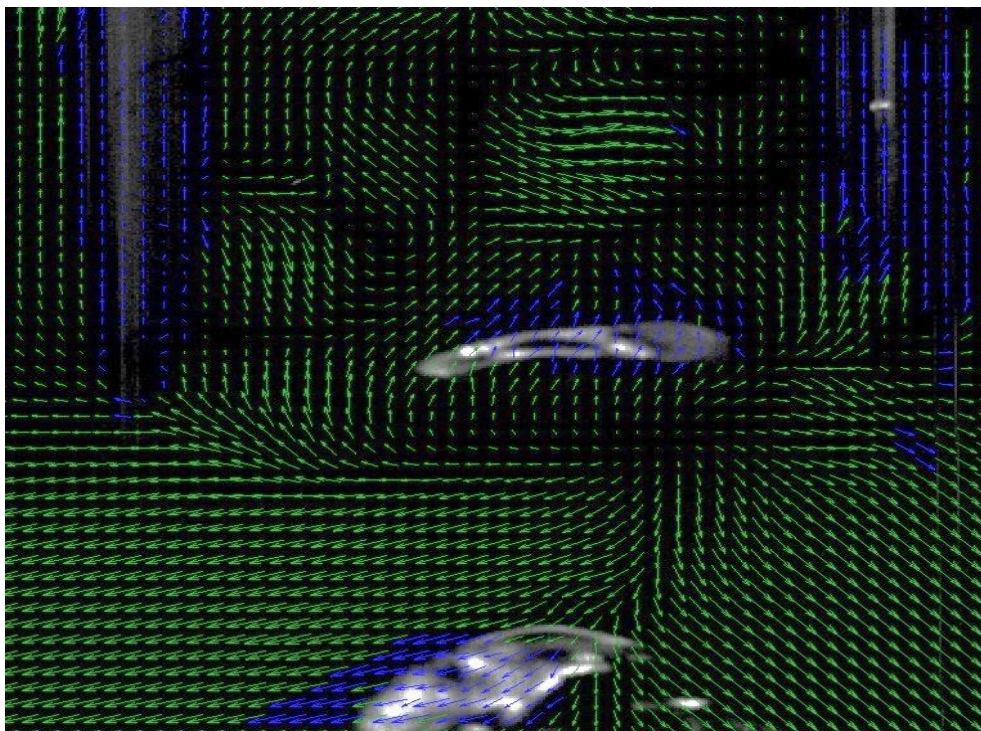


Рис. 5. Поле скорости

Методика построения профиля скоростей и расчета коэффициента скольжения

При обработке результатов эксперимента выделялась расчетная область по высоте. После выбора области на каждом фиксированном значении радиуса рассматривалось определенное число значений скорости (10 значений скорости по высоте, принадлежащих рассматриваемой области канала, лежащих на рассматриваемом радиусе), затем эти значения наносились на график, после чего проводилось осреднение. Такая процедура проводилась для всей области по высоте и радиусу с интервалом 1 мм. После проведения осреднения, полученные точки интерполировались сплайном.

Полученные в ходе обработки профили скоростей фаз (верхняя кривая – профиль скорости газообразной фазы; нижняя – жидкой) (см. рис. 6) имеют негладкий характер, что можно объяснить относительно большим размером трассирующих частиц, их слипанием в процессе движения вдоль канала, а также отсутствием частиц внутри пузырей воздуха.

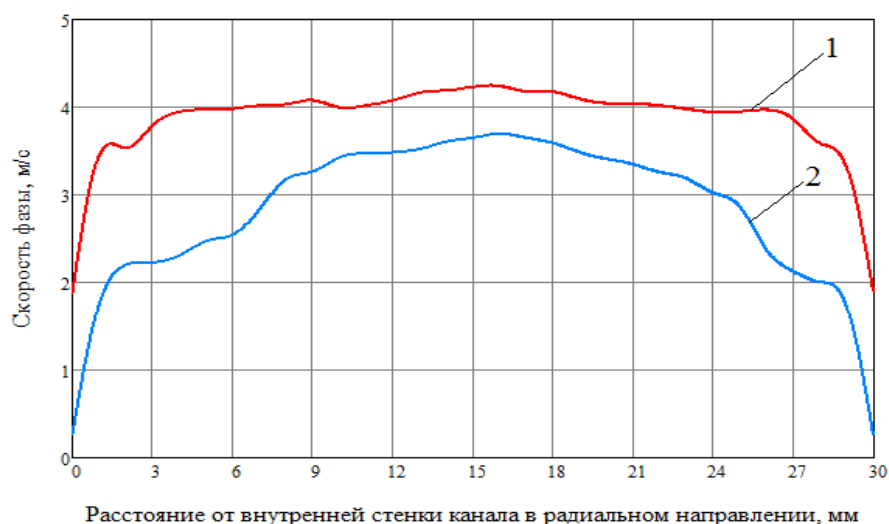


Рис. 6. Профиль скорости фаз: 1 – воздух, 2 – вода

Коэффициент (фактор) скольжения [3, 4] определяется как отношение скоростей газообразной и жидкой фаз:

$$s = w''/w' \quad , \quad (1)$$

где w'' , w' – значения скоростей газообразной и жидкой фаз, осредненных по площади поперечного сечения канала, в зависимости от расстояния от внутренней стенки канала в радиальном направлении.

График полученной зависимости коэффициента скольжения фаз от расстояния от внутренней стенки канала в радиальном направлении представлен ниже (рис. 7).

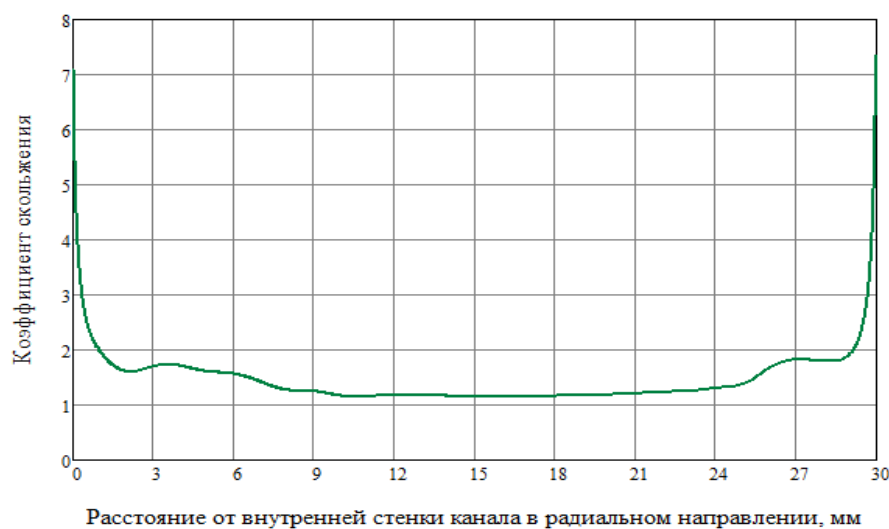


Рис. 7. Коэффициент скольжения фаз

Среднее значение коэффициента скольжения фаз в условиях эксперимента:
 $s_{\text{эксп}} = 1,35$.

Расчет коэффициента скольжения фаз проводился также по методике, изложенной в [12], и рекомендуемой руководящими отраслевыми документами для расчета гидродинамических характеристик элементов и оборудования водоохлаждаемых ЯЭУ, основанной на модели потока дрейфа и корреляции Chexal-Lellouche [13, 14]. Данная методика в широком диапазоне рассчитываемых параметров позволяет определить истинное объемное газосодержание:

$$\varphi = j'' / [C_0 \cdot (j'' + j') + \tilde{V}] , \quad (2)$$

где

C_0 – параметр распределения фаз,

$\tilde{V}$ – скорость дрейфа,

j'' , j' – приведенные скорости газообразной и жидкой фаз.

Значение истинного объемного газосодержания, рассчитанное по формуле (2): $\varphi = 0,037$.

Истинное объемное газосодержание предоставляет возможность определить коэффициент скольжения фаз:

$$s_{\text{расч}} = Q'' / Q' \cdot (1 - \varphi) / \varphi . \quad (3)$$

Значение коэффициента скольжения, рассчитанное по формулам (2) и (3): $s_{\text{расч}} = 1,48$.

Относительная погрешность полученного при использовании расчетной методики значения коэффициента скольжения $s_{\text{расч}}$ от экспериментального $s_{\text{эксп}}$ составляет ~ 10 %, что означает высокую степень её применимости для расчета рассмотренного режима.

Заключение

В ходе проведения эксперимента по моделированию течения двухфазного потока при пузырьковом режиме, а также при обработке полученных данных, были изучены возможности и особенности PIV-метода исследования потока. Получено поле скорости для восходящего потока в заданном режиме на основе высокоскоростной фотосъемки, и изучена структура, её динамика, рассчитан коэффициент (фактор) скольжения.

Полученные данные были использованы для проведения верификации расчетной методики, созданной на базе модели потока дрейфа и корреляции Chexal-Lellouche, широко применяющейся для проведения теплогидравлических расчетов. Результаты верификации хорошо сопоставимы с результатами, полученными в ходе обработки эксперимента, для рассмотренного режима с относительной погрешностью ~10 %.

Список литературы

- [1]. Адамов Е.О., Драгунов Ю.Г., Орлов В.В. Машиностроение ядерной техники. В 25 т. Т. 4. В 2-х кн. Кн. 1. / под ред. Е.О. Адамова. М.: Машиностроение, 2005. 960 с.
- [2]. Емельянов И.Я., Михан В.И., Солонин В.И. Конструирование ядерных реакторов: учебное пособие для вузов / под ред. акад. Н.А. Доллежала. М.: Энергоиздат, 1982. 400 с.
- [3]. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам. М.: Энергоатомиздат, 1984. 290 с.
- [4]. Уолис Г., Одномерные двухфазные течения. М.: Издательство «Мир», 1972. 440 с.
- [5]. Программное обеспечение Dynamic Studio ver.3.20. Руководство пользователя. М.: Издательство «Октава+», 2012. 500 с.
- [6]. Солонин В.И., Перевезенцев В.В., Исаков Н.Ш., Кузоро В.Б. Структура двухфазного адиабатического потока в режиме баббетажа воздуха в заполненном водой вертикальном цилиндре // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 6. DOI:10.7463/0614.0713566
- [7]. Перевезенцев В.В., Исаков Н.Ш. Диагностика двухфазных течений в вертикальных каналах в режиме естественной циркуляции по пристеночным пульсациям давления // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение. 2015. № 3. С. 17 – 29. DOI:10.18698/0236-3941-2015-3-17-29
- [8]. Марков П.В. Интенсификация перемешивания в ТВС водоохлаждаемых реакторов сотовыми перемешивающими решетками // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2012. № 1. С. 117–125. Режим доступа: <http://journal.iate.obninsk.ru/?q=node/751> (дата обращения 12.10.2015).

- [9]. Гетья С.И., Крапивцев В.Г., Марков П.В., Солонин В.И., Цирин С.И. Моделирование температурных неоднородностей в пучке твэлов ТВС ВВЭР-1000 // Атомная энергия, 2013. № 1. С. 55 – 57.
- [10]. Исаков Н.Ш., Перевезенцев В.В. Расчетное исследование теплогидравлической неустойчивости в контурах с естественной циркуляцией двухфазного теплоносителя // 13-ая научно-техническая конференция молодых специалистов ОКБ «ГИДРОПРЕСС» (Подольск, 16 – 17 марта 2011 г.): тез. докл. Подольск, 2011. С. 6 – 7.
- [11]. Гетья С.И., Солонин В.И., Перевезенцев В.В. Опыт разработки и использования пьезорезистивных виброакселерометров для исследования вибраций ТВС ВВЭР-440 // Датчики и системы. 2006. № 10. С. 25–29.
- [12]. РБ-040-09. Расчетные соотношения и методики расчета гидродинамических и тепловых характеристик элементов и оборудования водоохлаждаемых ядерных энергетических установок. Руководство по безопасности. Введ. 2009-09-01. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200079316> (дата обращения 20.10.2015).
- [13]. Chexal B., Lellouche G., Horowitz J., Healzer J. A void fraction correlation for generalized applications. Progress in Nuclear Energy, 1992. DOI:10.1016/0149-1970(92)90007
- [14]. Chexal B., Lellouche G. A Full-Range Drift-Flux Correlation for Vertical Flows (Revision 1). Special report. Electric Power Research Institute. Available at: <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=NP-3989-SR>, accessed 23.10.2015.