

# ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТОЗОНДОВОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ КИПЯЩЕГО ВОДЯНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

**В.И. Мельников, А.В. Дунцев, А.Б. Вьюгин**

*Нижегородский государственный технический университет, г. Н. Новгород*



В статье приведены результаты разработки и исследования акустозондовой системы для определения уровня и количества жидкой фазы в контролируемом объеме по данным пространственного распределения пара в кипящей воде. Разработанная система позволяет определять фазовое состояние среды в восьми локальных объемах, размещенных по высоте сосуда, и исследовать дисперсионные характеристики пароводяной смеси. Описываются конструкция прибора, разработанное программное обеспечение, результаты лабораторных и стендовых испытаний системы.

Проблема измерения уровня двухфазного теплоносителя является актуальной во многих практических задачах атомной энергетики. Контроль уровня двухфазного теплоносителя необходим для управления работой парогенераторов АЭС, ядерных установок моноблочного исполнения, кипящих реакторов и при исследованиях тепломассообмена в энергетическом оборудовании, в частности в экспериментах по изучению аварийных процессов.

Попытки решить проблему измерения уровня кипящего теплоносителя при помощи устройств, основанных на различных физических принципах (термометрические, акустические, кондуктометрические и другие), оказались неэффективными ввиду чрезвычайной сложности движения границ раздела фаз в контролируемом объеме и экстремальности условий работы датчика.

Кроме того, существует неопределенность в самой трактовке понятия “уровень двухфазной среды” в сосуде, в частности в литературных источниках различают уровни весовой, объемный, гидродинамический, граница фаз и прочие [1-3], причем различные авторы некоторые из этих определений уровня трактуют по-разному.

Поскольку на практике реально наблюдаются различные переходные двухфазные слои по высоте сосуда с кипящей жидкостью, зависящие от режимов течения теплоносителя, скорости, концентрации фаз, геометрии и других параметров, то, по-видимому, продуктивней формулировать задачу контроля уровня кипящего теплоносителя как проблему измерения распределения концентрации одной из фаз по высоте контролируемого сосуда. При этом задача контроля уровня кипящего теплоносителя сводится к измерению концентраций газовой фазы (паросодержания) в локальных объемах, распределенных по высоте контролируемого сосуда и соответствующим расчетам. Это позволяет получить необходимую информацию о количестве и распределении газовой фазы по высоте контролируемого объема. Затем общее количество жидкой фазы теп-

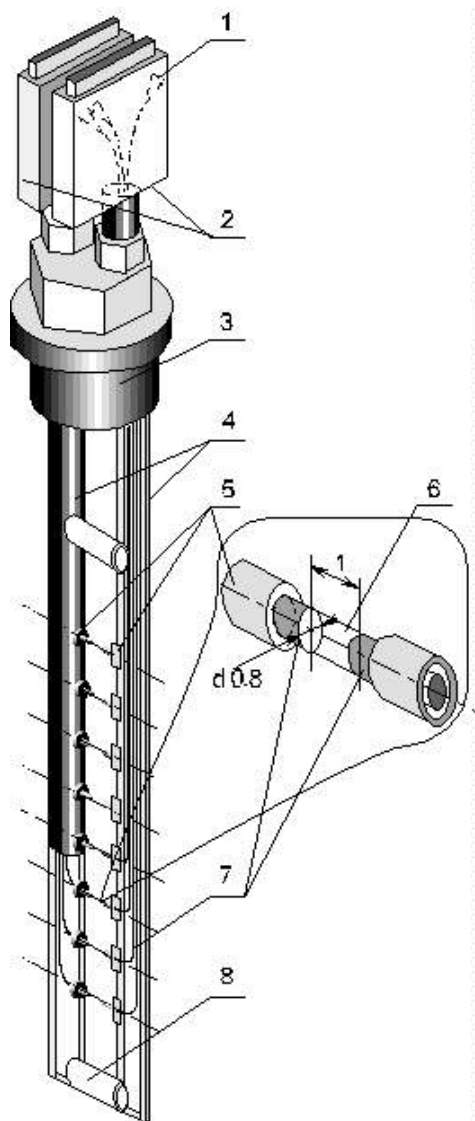


Рис. 1. Датчик акустического уровнемера.  
Основные элементы датчика и его геометрические размеры:  
1– пьезопреобразователь, 2– блоки предварительных усилителей и выходных каскадов генераторов, 3– узел герметизации датчика, 4– защитные чехлы, 5– герметизирующие гильзы, 6– контролируемые объемы, 7– волноводы, 8 – дистанционирующие элементы

лоносителя в сосуде, а также величины уровней (весового, объемного, гидродинамического и т.д.) нетрудно найти при помощи простых вычислений.

Решить задачу измерения распределения паросодержания по высоте сосуда можно с помощью зондов, принцип действия которых основан на индикации газовой и жидкой фаз теплоносителя в локальных контролируемых объемах среды по его электрической, оптической или акустической проводимости [4-7]. При этом, по нашему мнению, наиболее перспективно в жестких условиях, характерных для ЯЭУ, применение акустических зондов, положительно зарекомендовавших себя в практике теплофизических исследований. Данная работа посвящена разработке и исследованию акустозондовой системы измерения уровня кипящего теплоносителя.

Разработанная нами система состоит из акустозондового датчика, электронного блока генерации и обработки сигналов и персонального компьютера.

Датчик содержит восемь пар волноводов, размещенных в двух защитных чехлах, параллельных друг другу. Волноводы образуют восемь контролируемых объемов, расположенных по высоте с шагом 50 мм (рис. 1). В совокупности контролируемые объемы образуют измерительный участок уровнемера высотой 400 мм. При этом, в один из чехлов помещены излучающие волноводы, во второй – приемные.

На верхнем торце каждого волновода установлен электромеханический пьезопреобразователь. Нижние торцы волноводов выведены через боковые отверстия в защитных чехлах, загерметизированы специальными гильзами и попарно формируют контролируемые объемы датчика. Защитные чехлы скреплены дистанционирующими элементами и установлены в герметизирующем фланце.

Волноводы изготовлены из проволоки диаметром 0,8 мм, защитные чехлы – из трубы диаметром 10×1 мм, длиной 1 м. Материал датчика – сталь 12Х18Н10Т. Использовались пьезоэлементы из керамики ЦТС-19 диаметром 2,5 мм.

В верхней части датчика размещены восемь предварительных усилителей и восемь выходных каскадов генератора импульсов в защитных экранирующих корпусах. Для подключения датчика к блоку электронной обработки сигналов исполь-

зуется 16-канальный высокочастотный кабель.

Электронный блок выполняет следующую последовательность операций:

- по команде персонального компьютера генерирует зондирующие импульсы заданной длительности и частоты следования для активации пьезоэлементов излучателей;

- усиливает принятые акустические импульсы, прошедшие через контролируемые объемы;

- производит временную селекцию принятых сигналов и определяет их амплитуды;

- оцифровывает полученные данные и вводит их в компьютер.

Система работает следующим образом. По командам управляющей программы персонального компьютера блок электронной обработки формирует зондирующие импульсы длительностью 0,7 мкс и частотой следования около 800 Гц, которые после усиления последовательно подаются на обкладки излучающих пьезоэлементов. Затем по волноводам акустические сигналы поступают в контролируемые объемы, принимаются торцами соответствующих приемных волноводов, достигают приемных пьезоэлементов, усиливаются, оцифровываются и поступают в компьютер.

Для исключения влияния помех при каждом запуске ультразвукового зондирующего сигнала работает только один излучающий канал, и система считывает принятый сигнал только одного принимающего канала.

Далее принятый сигнал сравнивается с заданным уровнем дискриминации. При этом, если амплитуда сигнала превышает уровень дискриминации, то предполагается, что в контролируемом объеме в момент прохождения сигнала находилась жидкость, в противном случае – пар.

Использовались следующие расчетные формулы.

Локальное объемное паросодержание в  $j$ -ом контролируемом объеме

$$a_j = \frac{\sum_i \tau_{ij}}{T}, \quad (1)$$

где  $\tau_{ij}$  – время нахождения  $i$ -го пузыря в  $j$ -ом контролируемом объеме;  $T$  – время измерений.

Среднее объемное паросодержание на измерительном участке контролируемого сосуда определяется суммой:

$$\varphi = \frac{1}{8} \sum \alpha_j. \quad (2)$$

Объем жидкой фазы теплоносителя в измерительном участке

$$V = SH_0(1 - \varphi), \quad (3)$$

где  $S$  – сечение измерительного участка контролируемого сосуда;  $H_0$  – высота измерительного участка контролируемого сосуда.

Физический объемный уровень жидкой фазы теплоносителя

$$H = H_0(1 - \varphi).$$

(4)

**Основные технические характеристики датчика.** Число каналов измерения паросодержания 8. Расстояние по высоте между соседними контролируемыми объемами 50 мм. Высота измерительного участка контролируемого сосуда 400 мм. Описанный диаметр чувствительного элемента датчика 30 мм. Максимальная рабочая температура 350°C; давление 25 МПа.

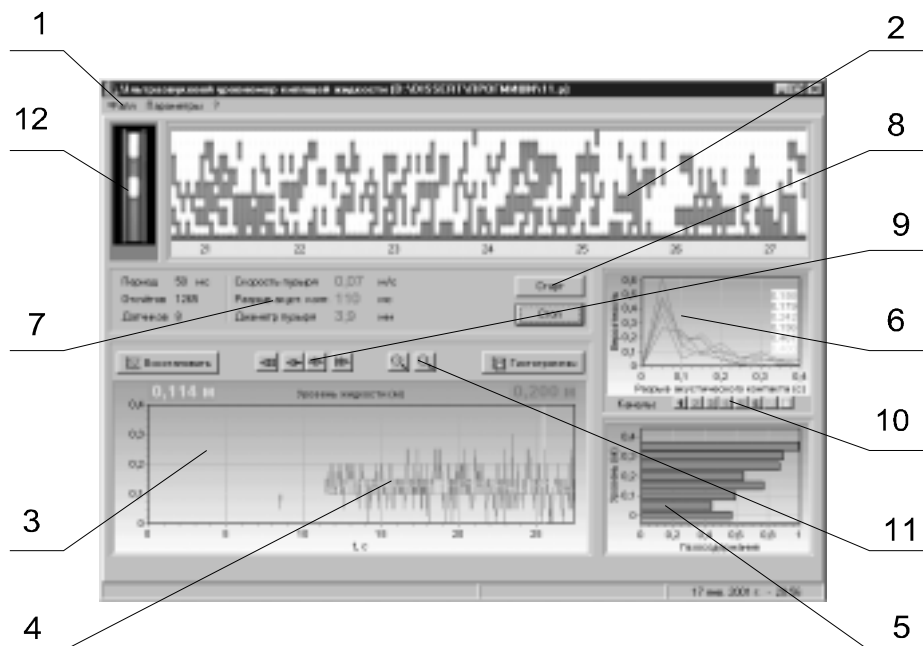


Рис. 2. Окно программы обработки записанных файлов: 1 - строка меню, 2 - записанные данные, 3 - область интерпретации записанных данных в виде графика, 4 - динамика уровня, 5 - гистограмма распределения газосодержания (усреднение за одну секунду), 6 - функции взаимной корреляции для рабочих каналов, 7 - оперативная числовая информация, 8 - кнопки управления пуском программы, 9 - управление прокруткой файла, 10 - управление количеством одновременно изображаемых функций взаимной корреляции (от 1 до 8 графиков), 11 - управление масштабom изображения по временной оси, 12 - мгновенное сечение контролируемого сосуда

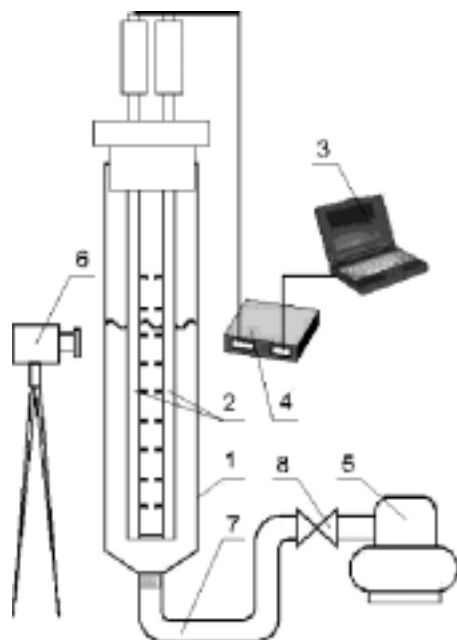


Рис. 3. Схема стенда: 1 - контролируемый сосуд, 2 - датчик, 3 - компьютер, 4 - блок электронной обработки сигналов, 5 - компрессор, 6 - видеокамера, 7 - трубопровод, 8 - арматура

Разработанная программа считывает записанные в файл результаты эксперимента и позволяет визуализировать «историю» эксперимента (рис. 2).

Одновременно с наглядной визуализацией записанные данные используются для построения графика динамики распределения газовой фазы. Параллельно на экран монитора выводятся гистограммы распределения среднего объемного паросодержания ( $\varphi$ ) по высоте контролируемого объема путем усреднения данных во времени и графики функций взаимной корреляции сигналов с соседних пар измерительных каналов.

Целью построения графиков функций взаимной корреляции является оценка времени прохождения пузырями дистанции между контролируемыми объемами для определения скорости движения паровой фазы теплоносителя. По времени нахождения пузырей в контролируемом объеме и скорости их движения можно оценивать характерные размеры паровых образований.

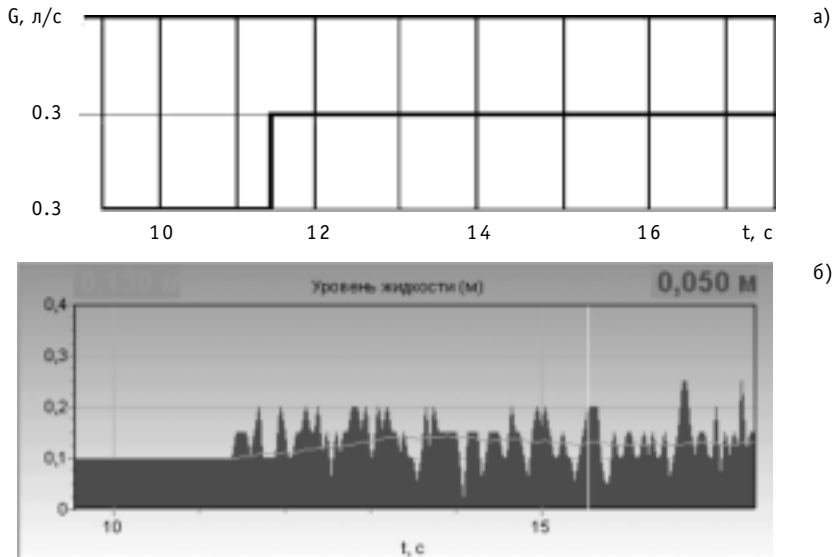


Рис. 4. Результаты испытаний системы на стенде: а) - расход газа, б) - показания системы

Программа предусматривает также возможность наблюдения полученных данных в любой момент времени, прокрутки графика динамики уровня и изменения масштаба графика.

Экспериментальная проверка разработанной системы была проведена в лаборатории акустики физико-технического факультета Нижегородского государственного технического университета и в институте IPM (университет прикладных наук) города Цитау (Германия).

Для экспериментальной проверки системы был изготовлен гидравлический стенд, в котором кипение теплоносителя моделировалось барботажем столба воды воздухом. Стенд представляет собой открытый вертикальный сосуд, изготовленный из прозрачной пластиковой трубы с внутренним диаметром 80 мм и высотой 1 м, в котором предусмотрен барботаж столба жидкости компрессором (рис.3).

Результаты измерений мгновенных значений динамики уровня воды в контролируемом сосуде при барботаже атмосферным воздухом при постоянном расходе газовой фазы представлены на рис.4. На этом же графике показано изменение среднего значения объемного уровня воды во времени при выборе времени усреднения одна секунда (плавная кривая). Данные тестирования системы свидетельствуют, что колебания уровня воды, фиксируемого системой, не выходят за пределы, определяемые шагом чувствительных элементов по высоте, т.е. 50 мм.

Импульсный впрыск газа позволяет имитировать снарядный режим течения теплоносителя в вертикальном участке трубопровода. Реализация в этом случае име-

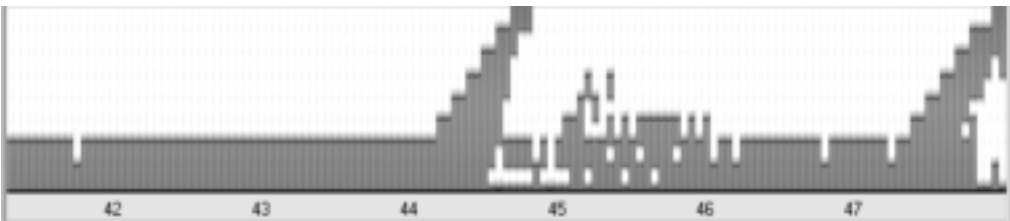


Рис. 5. Показания измерительной системы при снарядном режиме течения двухфазного теплоносителя

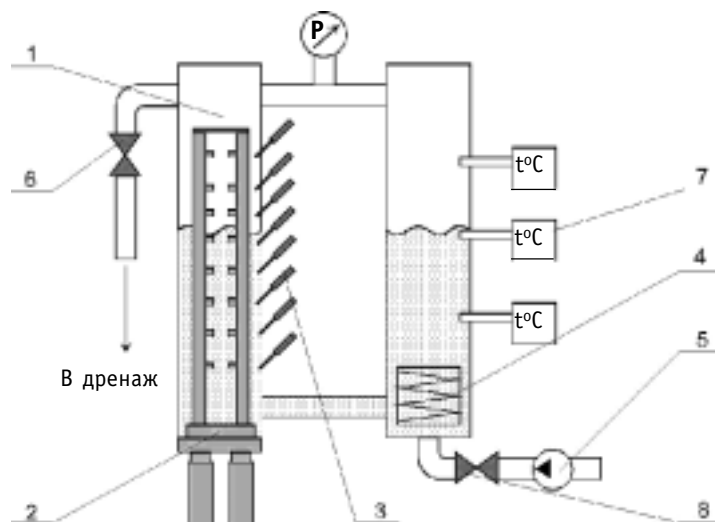


Рис. 6. Схема стенда ИРМ: 1 - контролируемый сосуд, 2 - акустозондовый датчик, 3 - датчики электроконтактного уровня, 4 - электронагреватель, 5 - насос, 6 - дренажный клапан, 7 - термометры, 8 - арматура

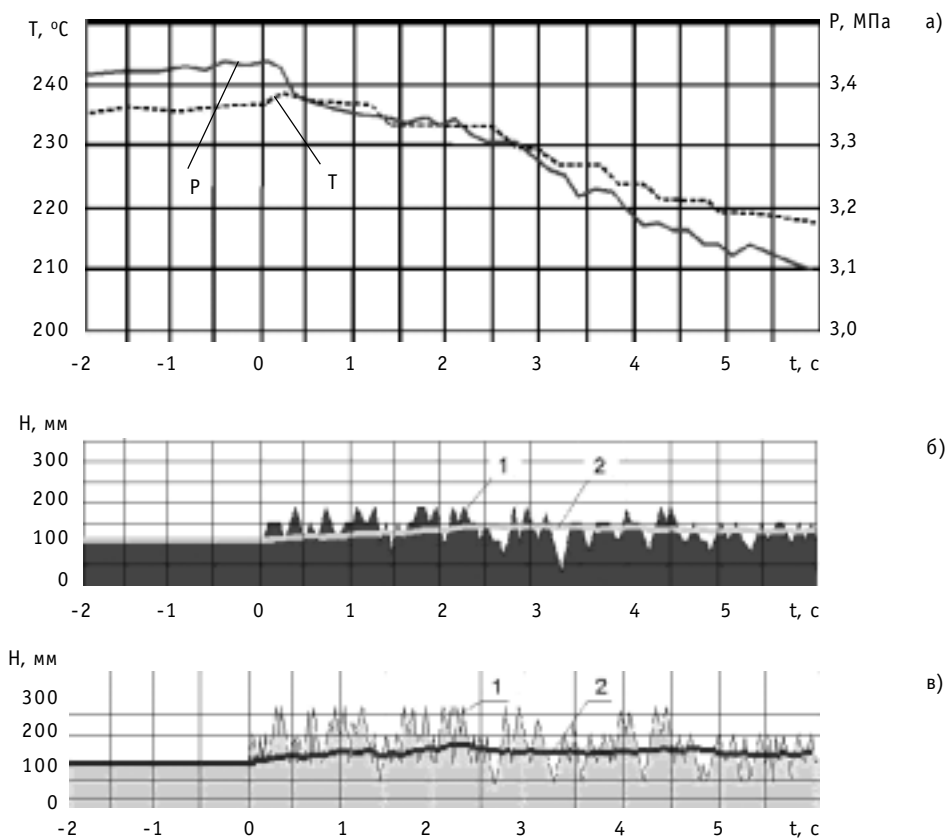


Рис. 7. Показания уровнемеров в кипящем теплоносителе: 1 - мгновенные значения, 2 - усредненные за время 1 секунда; а) - изменение температуры и давления, б) - показания электроконтактного уровнемера, в) - показания акустического уровнемера

ет характерный вид, показанный на рис. 5. Таким образом, система дает возможность контролировать процессы образования и движения больших одиночных паровых пузырей (газовых пробок). Можно также наблюдать эффект «вспухания» уровня теплоносителя в момент впрыска газа.

Изучение разработанной системы в условиях кипения водяного теплоносителя высоких параметров были проведены на теплофизическом стенде в институте ИРМ Цитау (Германия).

Для сравнительных испытаний разработанного ультразвукового датчика в экспериментальный стенд были вмонтированы датчики электрического уровнемера, принцип действия которого основан на измерении электрической проводимости контролируемой среды (рис. 6).

После проверки работоспособности всех измерительных систем на холодном стенде была проведена серия экспериментов, где процесс кипения возникал вследствие уменьшения давления при разгерметизации контролируемого сосуда.

Перед началом эксперимента теплоноситель в стенде разогревался до температуры  $T \approx 236^\circ\text{C}$  при давлении около  $P \approx 3,5$  МПа. Затем в заданный момент времени  $t_0$  открывался автоматический клапан сброса давления, что приводило к объемному вскипанию теплоносителя в контролируемом сосуде.

Характерные результаты измерений приведены на рис. 7. Можно отметить, что вскипание теплоносителя не приводит к изменению регистрируемого системой уровня более, чем на 50 мм. При этом значения уровня воды, измеренные электрическим уровнемером, на 3-5% превышают показания акустозондового измерителя. Это объясняется тем, что акустозондовый измеритель не реагирует на пузырьки пара, проплывающие мимо его контролируемых объемов, а электрический уровнемер их регистрирует.

## ВЫВОДЫ

1. Предложена система определения уровня кипящего теплоносителя, основанная на измерении распределения паровой фазы по высоте акустическими зондами.

2. Разработана методика, позволяющая в режиме реального времени осуществлять оперативный контроль за количеством теплоносителя в реакторных установках с естественной циркуляцией и моноблочного исполнения на всех режимах их работы.

3. Разработанный прибор может быть использован в экспериментах по изучению развития аварийных процессов в теплофизическом оборудовании, при отработке элементов энергетического оборудования, в процессе технологических испытаний.

## Литература

1. *Сырикович М.А., Резников М.И.* Методы экспериментального изучения процессов генерации пара. - М.: Энергия, 1977.
2. *Куталадзе С.С.* Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. Справочное пособие. - М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. *Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г.* Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. - М.: Высшая школа, 1977.
4. *Мельников В.И., Усынин Г.Б.* Акустические методы диагностики двухфазных теплоносителей ЯЭУ. - М.: Энергоатомиздат, 1987.
5. *Бабинов О.И.* Контроль уровня с помощью ультразвука. - М.: Энергия, 1978.
6. *Лабутин С.А., Мельников В.И.* Ультразвуковые волноводные измерители параметров однофазных и двухфазных сред и потоков // Датчики и системы. - 2001. - №2. - С. 54-62.
7. *Prasser H.-M., Bottger A., Zschau J.* A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows // Flow Measurement and Instrumentation. - 1998. - № 9. - P. 111-119.

Поступила в редакцию 15.07.2002

ing). - Obninsk, 2002. - 13 pages, 3 illustrations, 2 tables. - References, 12 titles.

The generalized hierarchically closed analytical relationships are derived for distribution parameters  $C_{ks}$  of the quasi-one-dimensional (drift flux model) form of continuity, energy and momentum equations for two-phase non-equilibrium flow with non-uniform profiles. The main assumptions are superposition method and power approximations of the local phase profiles for derivation of the quadratures of distribution parameters and for their assessment. The complementarity and mirror symmetry properties are presented for parameter distributions for flows with non-uniform parameter profiles.

#### **УДК 621.039.534**

*Distribution Parameters for the Quasi-One-Dimensional Two-Phase Non-Equilibrium Flow Models. Generalization for Annular Channel and Rod Bundle Flows \ Yu.N. Kornienko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 12 pages, 5 illustrations. - References, 12 titles.*

The derived in the previous articles [1,2] relationships for two-phase non-equilibrium flow distribution parameters  $C_{ks}$  are generalized for an annulus and pin bundle geometry. The main assumptions are superposition method and power approximations of the local phase profiles for derivation of the quadratures of distribution parameters and for their assessment. There are derived the limiting analytical forms for  $C_{ks}$  relationships for symmetrical subchannel in the tight packet pin bundle and also with taking into account the azimuthal profiles of the variables.

#### **УДК 621.039.534**

*Heat Transfer and Temperature Fields in the Core of Fast BREST Reactor with Lead Cooling \ J.A. Kuzina, A.V. Zhukov, A.P. Sorokin, A.I. Filin, V.P. Smirnov, V.N. Leonov, A.G. Sila-Novitsky; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 9 pages, 8 illustrations. - References, 10 titles.*

The results of thermohydraulic research for the experimental demonstration lead-cooled fast reactor BREST-OD-300 are considered.

#### **УДК 621.039.534**

*Investigation of the Acoustic Probe System for Analysis of a Level of Boiling Water Coolant \ V.I. Melnikov, A.V. Dunzev, A.B. Vjugin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 7 pages, 7 illustrations. - References, 7 titles.*

The developed acoustic probe system for analysis of a level and amount of liquid phase on the data of a vapor space distribution in control boiling water volume has been investigated. The acoustic probe system allows to determine the state of phase into 8 local volume by probes placed along the height of vessel, and to study dispersing properties of the vapor-liquid water mixture.

The construction of the acoustic device, computer program, laboratory and testing unit experiments are described.