

# УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ВОЛНОВОДНАЯ МНОГОТОЧЕЧНАЯ СИСТЕМА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДВУХФАЗНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

**В.И. Мельников\*, В.В. Контелев\*, В.В. Иванов\*, Х.-М. Прассер\*\*, В. Циппе\*\***

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

*\*\* Научно-исследовательский центр "Розендорф", г. Дрезден, Германия*



Статья представляет новую акустическую диагностическую систему для высокоскоростной визуализации двухфазных теплоносителей в трубопроводах. Описывается принцип действия, конструктивные особенности и методика визуализации двухфазных потоков. Приводятся результаты экспериментального тестирования этой системы на теплофизическом стенде.

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в области развития экспериментальной техники для исследования двухфазных потоков наиболее актуальной стала разработка диагностических систем визуализации, позволяющих получить информацию о структуре двухфазной смеси в виде изображения поперечного сечения потока с высоким временным и пространственным разрешением. Разработка таких систем стала возможна только в связи с интенсивным развитием электронно-вычислительной техники, т.к. решение подобной задачи требует манипулирования большими массивами экспериментальных данных. Представляя поток теплоносителя в виде динамичной, меняющейся в режиме реального времени картины поперечного сечения, системы визуализации дают гораздо больше информации о различных его параметрах (степени дисперсности, локализации, форме и размерах фракции) по сравнению с применяемыми ранее кондуктометрическими ячейками [1-3],  $\gamma$ -плотномерами, нейтронными и рентгеновскими датчиками [4-6].

В настоящее время разработаны системы визуализации, основанные на использовании проникающего излучения, измерении электрических свойств исследуемой среды и применении ультразвука.

Так, например, в статье [7] описан "Высокоскоростной рентгеновский компьютерный томографический сканер" с быстродействием 2000 кадров в секунду и пространственным разрешением около 2 мм. В публикациях [8] и [9] представлена емкостная и электропроводная визуализационная техника. В первом случае для восстановления картины о распределении фаз по сечению трубопровода используется информация о емкости двухфазной смеси, измеряемой между электродами, расположенными в стенке трубопровода. Во второй системе измеряется элек-

тропроводность между электродами, образующими тонкую сетку по сечению канала. Работа [10] посвящена ультразвуковой отражательной томографии, принцип действия которой подобен применяемому в медицинской технике УЗИ. Однако вследствие сильной неоднородности акустических свойств промышленных объектов простой перенос на промышленные процессы медицинской УЗИ технологии невозможен, и разработчики применяют ряд специальных мер для адаптации ультразвуковых преобразователей к промышленным потокам.

Во всех перечисленных выше системах для восстановления изображения используются томографические алгоритмы, суть которых заключается в восстановлении изображения по интегральным проекциям каких-либо измеренных физических величин. Этот подход, вследствие сложного математического аппарата, требует громоздких вычислений, существенного упрощения исходных систем уравнений, значительных временных затрат и сложного оборудования (как первичных датчиков, содержащих множество источников и детекторов для получения требуемого количества проекций, так и мощных электронных систем для обработки данных). Кроме этого каждая из перечисленных систем имеет специфические недостатки, характерные только для нее и ограничивающие область применения. Для рентгеновского сканера - это зависимость и влияние на показания толщины стенок трубопровода из-за низкой проникающей способности рентгеновских лучей. Электрические системы не могут визуализировать неэлектропроводные потоки, а ультразвуковая отражательная установка работоспособна только в определенных режимах с достаточно редкими и крупными пузырями.

Создать более дешевый прибор, не использующий сложные математические алгоритмы, но обладающий в то же время высокими разрешающими характеристиками, удалось разработчикам электродно-ячеистой томографической системы [11]. В основе этой системы применен решеточный датчик, состоящий из двух электродных сеток, расположенных в параллельных плоскостях на близкой дистанции друг от друга. Угол между электродами обеих сеток составляет 90 градусов. На электроды первой сетки (излучающая плоскость) последовательно подается задающее напряжение. Если импульс, подведенный к одному из излучающих электродов, возникает на конкретном электроде второй сетки (приемная плоскость), то, следовательно, поперечная точка между этими электродами занята проводящей фазой (водой). В течение измерительного цикла последовательно активируются все излучающие электроды, полученная двумерная матрица токовых сигналов отражает проводимость между всеми поперечными точками электродов двух плоскостей. Измеренные мгновенные значения проводимости сравниваются с предварительными калибровочными данными, и по результатам сравнения вычисляется газосодержание в каждой точке. Максимальное временное и пространственное разрешение, достигнутое в настоящее время при помощи этой системы, составляет 1024 Гц и 256 контролируемых точек соответственно. Эти датчики были успешно испытаны в экспериментах по визуализации различных режимов двухфазного потока в вертикальном канале и при визуализации процесса кавитации за быстрозапорным ventилем в горизонтальном трубопроводе [12].

Достижения в конструировании решеточных датчиков, их успешное тестирование, а также желание разработать подобный недорогой прибор, но основанный на волноводно-акустической технологии, для визуализации в том числе и неэлектропроводных потоков, стали причинами для начала наших исследований, результат которых - разработка ультразвуковой волноводной многоточечной системы.

## КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНОВОДНОЙ СИСТЕМЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Применение волноводов для решения проблемы устойчивости акустических датчиков при диагностике двухфазных потоков с экстремальными параметрами было предложено еще в 70-е гг. Конструкция датчика, в котором для подвода акустической энергии в контролируемый объем движущегося с высокой скоростью находящегося под давлением нагретого двухфазного потока используются волноводы, т. е. проволока или стержни, проще и надежнее, чем применение теплостойких пьезоэлементов или создание специальной системы охлаждения. Дистанционирование и удаление из агрессивных условий элементов, не обладающих достаточной стойкостью, которые достигаются при применении волноводов, особенно актуальны для ядерно-энергетических установок (ЯЭУ), где дополнительными вредными факторами являются мощные потоки ионизирующих излучений.

На основе этих конструктивных принципов для диагностики двухфазных потоков были разработаны и экспериментально проверены локальные [13], резонансные [14] и импедансные акустические зонды [15].

Идея многоточечной волноводно-акустической системы основана на достижениях при создании локальных и импедансных зондов. Принципиально новой конструктивной особенностью стало применение не единичных волноводов, а сложных волноводных систем для создания конструкции датчика с равномерно распределенными по сечению потока контролируемыми объемами.

Принцип действия новой диагностической системы основан на измерении акустической проводимости среды.

Основными элементами системы высокоскоростной визуализации двухфазного потока являются датчик и электронный блок. Управление процессом измерения потока, настройка и корректировка параметров, считывание, хранение и анализ полученных данных осуществляются при помощи персонального компьютера. Упрощенная блок-схема прибора показана на рис.1.

Электрические импульсы, генерируемые электронным блоком, преобразуются пьезоэлементами в акустические волны и излучаются цилиндрическими волноводами. Если в контролируемом объеме находится жидкость, то затухание ультразвука, проходящего через контролируемый объем, незначительно; акустические колебания достигают приемного волновода и после преобразования в электрические сигналы поступают в электронную систему обработки. Если в контролируемом объеме находится газовая фаза, то ультразвук затухает и не достигает приемного волновода.

В каждом контролируемом объеме измеряется амплитуда акустических импульсов, прошедших от излучателей к приемникам. Эта амплитуда связана с акустичес-

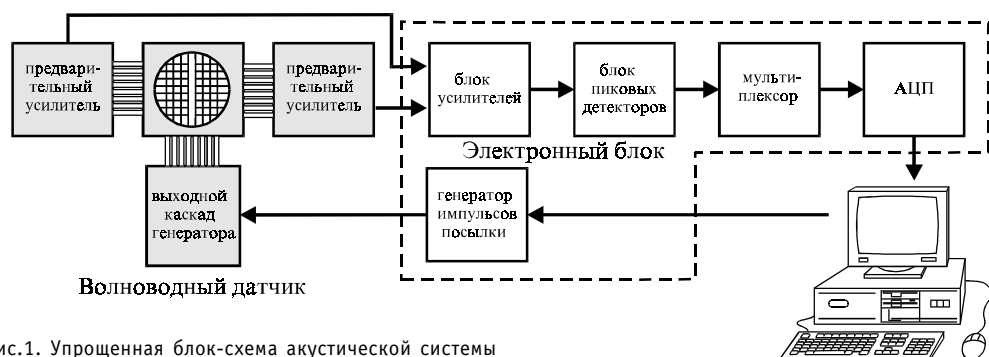


Рис.1. Упрощенная блок-схема акустической системы

ким волновым сопротивлением среды ( $Z$ ):

$$Z = \rho c, \quad (1)$$

где  $\rho$  - плотность среды,  $c$  - скорость звука в ней.

Чем больше акустическое волновое сопротивление среды, тем больше энергия акустических импульсов, прошедших через контролируемый объем, и тем больший сигнал будет принят.

В данном методе необходимо решить две задачи.

1. Эффективно излучить акустическую энергию в контролируемую среду. При этом необходимо подавить различные паразитные акустические колебания, связанные с реверберацией и “звоном” конструктивных элементов, не участвующих в передаче акустических сигналов (герметизирующие элементы, подвеска, корпус).

2. Эффективно принять прошедшие через контролируемый объем сигналы. При этом необходимо выделить полезные акустические импульсы, подавить помехи и сигналы от соседних излучателей.

Ключевым элементом системы является датчик (рис. 2), который непосредственно размещается в контролируемом потоке, и подвергается воздействию всех негативных факторов со стороны рабочей среды.

Конструкция датчика выполнена по волноводно-акустической технологии (WAT-technology) [16-17], основным принципом которой является применение волноводов в акустическом тракте. Применение этой технологии, как уже отмечалось, позволяет удалить из зоны воздействия вредных факторов со стороны окружающей среды элементы, не обладающие достаточной надежностью (пьезокерамические преобразователи, электронные компоненты, проводники и т. д.).

При разработке датчика были проведены эксперименты для выбора оптимальной геометрии волноводов. На экспериментальной модели варьировались следующие их характеристики: диаметр, длина, способы соединения с герметизирующими элементами, отрабатывались разные конструкции согласующих элементов. Данные экспериментов показали, что наиболее оптимальной конструкцией является система, в которой излучение ультразвука осуществляется отдельными, не зависящими друг от друга волноводами, а для приема используются объединенные в группы волноводы. Это позволило сделать систему более компактной и надежной за счет уменьшения количества приемников и излучателей.

Конструкция и размещение волноводов тако-

вы, что по сечению трубопровода диаметром 50 мм образуются 48 точек контроля. Контролируемые объемы образуются между излучателями и перпендикулярно расположенными приемниками.

В качестве излучателей используются капиллярные трубочки диаметром 1,1 мм, приемники - проволока 0,8 мм.

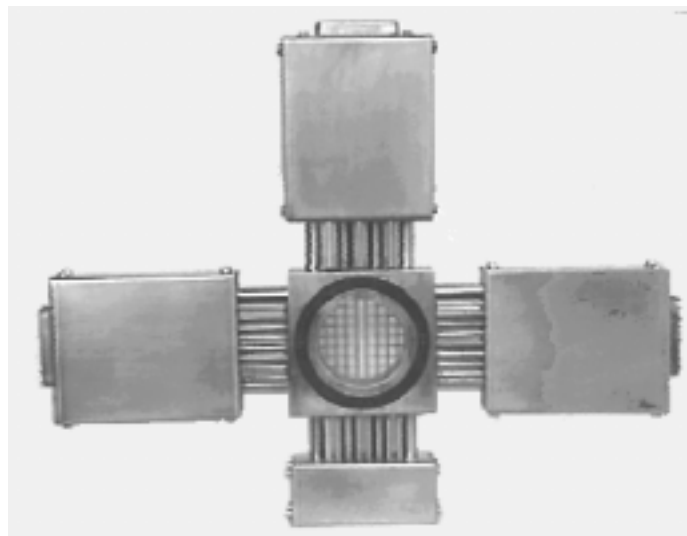


Рис.2. Внешний вид датчика

Торец приемника ориентирован на боковую поверхность излучателя и расположен на расстоянии 1 мм. Это расстояние является оптимальным с учетом нескольких ограничительных факторов. С уменьшением расстояния увеличивается влияние датчика на поток, с увеличением - уменьшается уровень принимаемого сигнала. Подавление помех и уменьшение реверберации в излучающем и в приемном тракте достигается при помощи демпфирования конструктивных элементов многожильным медным и нихромовым проводом. Эффективное выделение полезных импульсов из принятых акустических сигналов осуществляется посредством временной селекции в электронном блоке. В трубопровод с исследуемым потоком датчик устанавливается при помощи фланцевого соединения.

В качестве основного конструкционного материала используется нержавеющая сталь 12X18H10T, что обеспечивает возможность эксплуатации датчика даже в экстремальных условиях ЯЭУ.

Электронный блок генерирует зондирующие импульсы заданной длительности и частоты, которые подаются на пьезоэлементы излучающих волноводов, усиливает и преобразует в цифровые электрические сигналы от приемных волноводов с последующим вводом их в персональный компьютер. Частота зондирующих импульсов 4 кГц, длительность 0,7 мкс, быстродействие при одновременном излучении двумя из восьми излучателей - 500 кадров в секунду.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Первое экспериментальное тестирование акустической системы было проведено на теплофизическом стенде в научно-исследовательском центре Rossendorf (Германия).

Примеры визуализации разных режимов потока, полученные при помощи ультразвуковой волноводной системы содержит рис.3.

На приведенной последовательности различных режимов течения отчетливо виден переход от пузырькового потока через снарядный, пенный и дисперсно-кольцевой, к кольцевому.

Методика экспериментальной обработки и графического отображения данных представляет собой следующий алгоритм. Перед экспериментом во время процедуры калибровки в память компьютера заносятся данные для двух крайних ситуаций - матрица значений сигналов в контролируемых точках в газовой фазе и матрица значений, когда во всех контролируемых объемах находится жидкость. По этим значениям устанавливаются уровни дискриминации и присваивается свой индивидуальный цвет для различных интервалов газосодержания. Во время эксперимента текущие (мгновенные) значения сигналов сравниваются с калибровочными данными, по результатам сравнения вычисляется газосодержание, и на дисплее компьютера воспроизводится структура сечения потока в контролируемых точках.

Качественное сравнение проводилось путем сопоставления изображений одних и тех же поперечных сечений, полученных от двух систем визуализации. Сравнения проводились с показаниями решеточного проволоочно-ячеистого томографа, разработанного в лаборатории доктора Прассера. Решеточный томограф был испытан и оттестирован гамма-плотномером. Акустический датчик был расположен на расстоянии 45 мм от проволоочно-ячеистого томографа по ходу движения потока в вертикальной трубе диаметром 51,2 мм. Измерения проводились в широком диапазоне изменения расходных скоростей воды и воздуха. На контролируемом участке трубопровода были реализованы различные режимы двухфазного потока (от пузырькового до кольцевого).

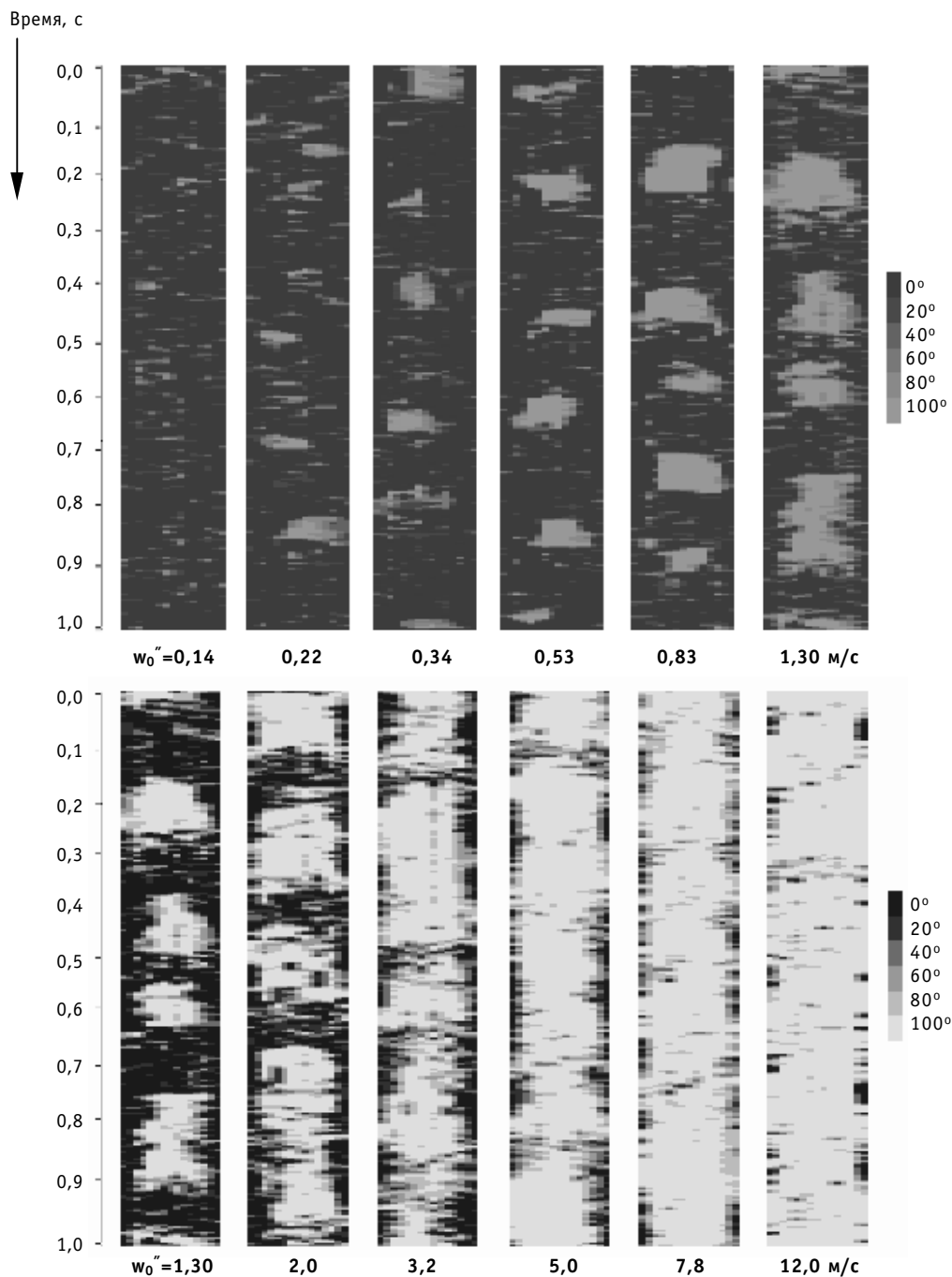


Рис.3. Изображение аксиального сечения потока в вертикальном трубопроводе для разных режимов течения: приведенная (расходная) скорость воды - 1 м/с; пространственное разрешение 169 точек (после интерполяции); временное разрешение 400 Гц

Общая динамика изменения структуры потока, воспроизводимая двумя визуализирующими системами, основанными на различных физических принципах, вполне сопоставима. Отличия объясняются значительной разницей в разрешающей способности.

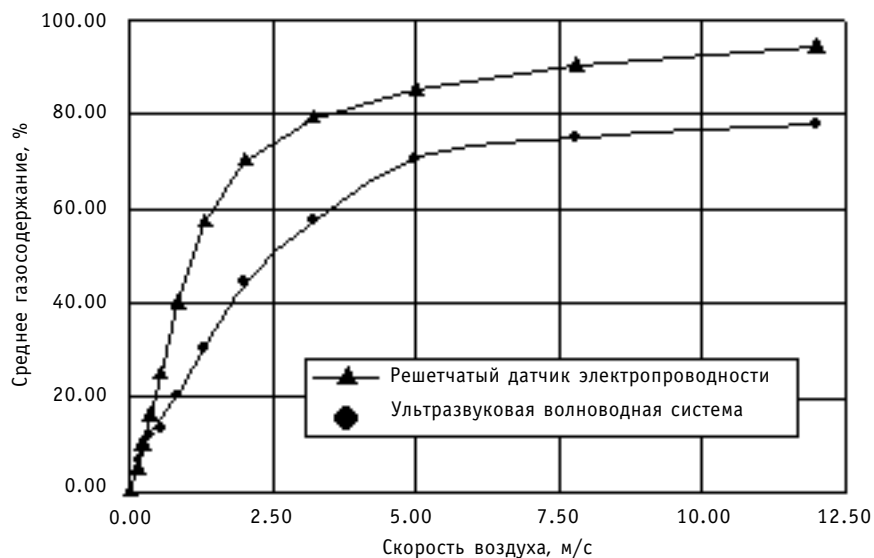


Рис. 4. Сравнение средних объемных газосодержаний, измеренных ультразвуковой волноводной системой и решетчатым датчиком, расходная скорость воды, 1 м/с

Для количественной оценки точности измерений были проведены усреднения газосодержания во времени и по диаметру сечения. Графики на рис.4 иллюстрируют результаты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная система обладает двумя важными достоинствами.

1. Возможность визуализации двухфазных потоков при высоких температурах и давлениях (температура до 350°C, давление до 20 МПа).
2. Возможность визуализации неэлектропроводных потоков (например, нефтепродуктов, фреонов, растворителей и т. д.).

Как показывает практика, в настоящее время нет универсальной системы, пригодной для эксплуатации во всех условиях и режимах течения, которые могут возникать при использовании двухфазных потоков. Мы надеемся, что наша система будет дополнением к существующим разработкам и расширит область исследований двухфазных потоков.

## Список литературы

1. Субботин В. И., Похвалов Ю. Е., Михайлов А. Е. и др. Резистивный и емкостной методы измерения паросодержания // Теплоэнергетика. – 1974. – № 6. – С. 63-68.
2. Субботин В. И., Похвалов Ю. Е., Михайлов А. Е. и др. К расчету газосодержания смеси при пузырьковом течении по данным измерения резистивным и емкостным методами // Теплоэнергетика. – 1975. – № 4. – С. 70-75.
3. Субботин В. И., Похвалов Ю. Е., Михайлов А. Е. и др. Временные и структурные характеристики газожидкостного потока при снарядном течении // Теплоэнергетика. – 1976. – № 1. – С. 67-70.
4. Gay R. R., Schell S., Lahey R. T. The side-scatter gamma technique for local density measurements // Trans. Amer. Nucl. Soc. – 1978. – Vol. 30. – P. 508-510.
5. Емельянов И. Я., Юрова А. Н., Смолин В. Н. Использование нейтронного датчика для определения паросодержания // Атомная энергия. – 1977. – Т. 43. – № 3. – С. 171-175.
6. Inoue A. et al. In Bundle Void Measurement of BWR Fuel Assembly by an X-ray CT scanner: Assessment of BWR Design Void Correlation and Development of New Void Correlation. 2<sup>nd</sup> ASME/JSME Nuclear Engineering Conference. Vol. 1. 39 (1993).

7. Hori K., Fujimoto T., Kawanishi K., Nishikawa H. Advanced high speed X-ray CT scanner for measurement and visualization of multi-phase flow. In: OECD/CSNI Specialist Meeting on Advanced Instrumentation and Measurements Techniques. Santa Barbara. (USA. March 17-20, 1997).
8. Reinecke N., Mewes D. Investigation of the two-phase flow in trickle-bed reactors using capacitance tomography // Chem. Eng. Sci. 52 (1997) 13, -PP. 2111-2127.
9. Reinecke N., Boddem M., Petritsch G. Mewes D. Tomographisches Messen der relativen Phasenanteile in zweiphasigen Stromungen fluider Phasen // Chemie-Ing.-Technik 68 (1996) 11, - P. 1404-1412.
10. Schlager H. I., Yang M., Hoyle B. S. Real-time ultrasonic process tomography for two-component flows // "Electronic Letters". - 1996. - Vol. 32. - №.17. - P. 1571-1572.
11. Prasser H.-M., Bottger A., Zschau J. A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows // Flow Measurement and Instrumentation. 9 (1998) - P. 111-119.
12. H.-M. Prasser, A. Bottger, J. Zschau. A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows // Forschungszentrum Rossendorf. Institute of Safety Research. Annual Report. - 1996. - P. 34-37.
13. Мельников В. И., Кутьин Л. Н., Лобанов А. И., Максимов В. И. А. с. 792130 СССР. МКИ<sup>3</sup> G01 №29/00. Устройство для измерения локального объемного паросодержания. // Открытия. Изобретения. - 1980. № 48.
14. Мельников В. И., Махин В. А., Дзятко Н. В. А. с. 901895 СССР. МКИ<sup>3</sup> G01N29/02. Устройство для диагностики двухфазного потока. // Открытия. Изобретения. - 1982. - № 4.
15. Мельников В. И., Хохлов В. Н., Маслов В. А. А. с. 1116382 СССР. МКИ<sup>3</sup> G01N29/02. Устройство для измерения среднего объемного паросодержания среды. // Открытия. Изобретения. - 1984. - № 36.
16. Мельников В. И., Усынин Г. Б. Акустические методы диагностики двухфазных теплоносителей ЯЭУ. - М.: Энергоатомиздат, 1987.
17. Melnikov V. I., Nigmatulin B. I. The newest two-phase control devices in LWR equipment based on ultrasonic and WAT-technology // Nuclear Engineering and Design. 149. (1994) - P. 349-355.

Поступила в редакцию 30.11.99.



**УДК 621.039.554.34**

*Experimental and Numerical Investigations of Mass- and Heat-Exchange Processes under the Loss Coolant Accident* \A.D. Efanov, V.V. Lozhkin, B.I. Kulikov, O.A. Sudnitsin, Yu.A. Bezrukov, S.N. Zaitzev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 15 pages, 14 illustrations. – References, 6 titles.

Experimental investigations of thermo-hydraulic characteristics, temperature modes of fuel assemblies simulators and velocities of wetting front under the maximal design accident at the stage of repeated gulf of reactor core are carried out on full-scale models of fuel assemblies of VVER-1000 with 7 and 37 rods. The experiments were conducted on repeated gulf loop of the stand (SVD-1).

**УДК 536.24**

*Turbulizing Influence of Smooth Cylindrical Elements on Intensification of Heat-Exchange of Symmetric Passage Pipe Bundles* \A.A. Anisin, A.K. Anisin, V.T. Buglaev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 13 pages, 5 illustrations, 2 tables. – References, 5 titles.

The opportunity is analysed for intensification of heat transfer of transversally streamlined symmetric passage pipe bundles under usage of smooth turbulizing rods sequentially disposed at centers of pipe cells in its arrangement scheme. Realization of the introduced arrangement scheme of pipe elements as a combined surface of the bundle of pipes of different diameters and its heat-air-dynamic characteristics obtained by experimental way, testify to opportunity of practical application of the offered approach to increase the efficiency of pipe heat-exchange devices.

**УДК 532.526.4:621.039.534**

*Diagnostics of Distance up to the Point of Rupture of the Pipe Line using the Change of Hydraulic Characteristics* \E.F. Avdeev, V.V. Bolshunova; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 4 pages, 1 illustration, 2 tables. – References, 4 titles.

New approach is developed for finding out the distance up to the point of partial rupture in loop contours or main pipe lines using the change of the hydraulic characteristics under initiation of leak.

**УДК 621.039.564.5**

*Ultrasound Waveguide Multipoint System of Visualisation of Two-phase Coolant* \V.I. Melnikov, V.V. Kontelev, V.V. Ivanov, X.-M. Prasser, V. Zippe; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 8 pages, 4 illustrations. – References, 17 titles.

New ultrasonic diagnostic system for high-speed visualization of coolant in pipelines is represented in the paper. The principle of activity, design features and technique of visualization of two-phase streams is described. The results of experimental testing of this system on the thermal-physical stand are given.

**УДК 621.039.534.63**

*Effect of «Hanging» of Liquid Sodium and Its Influence on Operation of Heat Exchangers of an Evaporative - Condensation Type* \M.N. Arnoldov, V.N. Bogomolov, O.G. Grigoriev, V.N. Zamusskiy; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 8 pages, 4 illustrations. – References, 9 titles.

Phenomenon of relocation of considerable volumes of liquid sodium stipulated by effect of its «hanging» on interior devices of complex construction high-temperature thermal pipes (HTTP) over contour of the sodium HTTP is described. Influence of this effect on operation of evaporative - condensation systems (ECS) is shown. Necessity of checking of the sodium level for identification of abnormal modes of the ECS connected with drainages of capillary - porous structure of evaporation zone is proved.