

УДК 621.039

В. И. Мельников, Г. А. Егоров

**УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ВОЛНОВОДНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПОТОКА ДВУХФАЗНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается новая акустическая диагностическая система 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.

*Ключевые слова:* двухфазный теплоноситель, диагностика потока, визуализация процесса, ультразвуковые волноводы.

Визуализация потоков в гидродинамическом эксперименте в настоящее время находит все большее применение в связи со своей наглядностью и большой информационной насыщенностью, что позволяет оперативно получать достоверную информацию о сложных процессах, происходящих в элементах энергетического оборудования. При визуализации потока возможности 3D графики на порядок превосходят обычные двухмерные изображения. Современные программы и системы 3D моделирования при необходимости могут создавать объекты и описания процессов со степенью реалистичности, близкой к фотографической. При этом целью визуализации является облегчение понимания процесса и смысла происходящих явлений и позволяет избежать чрезмерных финансовых затрат, сэкономить массу ресурсов при реализации технологического процесса на практике.

Однако наблюдение процессов, происходящих в высокотемпературном потоке теплоносителя, при помощи оптических систем практически исключается ввиду экстремальности условий процесса. Особые трудности возникают при изучении двухфазных пароводяных потоков из-за экранирования ядра потока внешним дисперсным слоем.

Вместе с тем, весьма заманчиво получать информацию о распределении фаз в элементах оборудования на рабочих режимах, что позволяет проверять и корректировать расчетные модели процессов теплообмена. Особенно важна для разработчиков информация о распределении фаз по сечению сборок на выходе теплоносителя из кипящих ТВС, в тяговых участках трубопроводов в контурах с естественной циркуляцией теплоносителя, в различных частях трубопроводов при исследовании аварийных процессов, связанных с разрывом контура. Поэтому разработка диагностических систем, позволяющих наблюдать за характером движения фаз в реальном масштабе времени при высоких температурах и давлениях, представляется актуальной.

Для решения этой задачи предложено использовать так называемые сеточные датчики, а также системы, содержащие множество идентичных датчиков, распределенных по пространству в заранее определенных точках и работающих согласованно в рамках общей информационной системы. По нашему мнению, наиболее подходящими для визуализации потока двухфазного теплоносителя являются ультразвуковые сеточные датчики на основе волноводов продольных волн [1–3].

В данной работе приведены результаты исследований развития технологии визуализации двухфазного потока при помощи ультразвукового волноводного сеточного датчика.

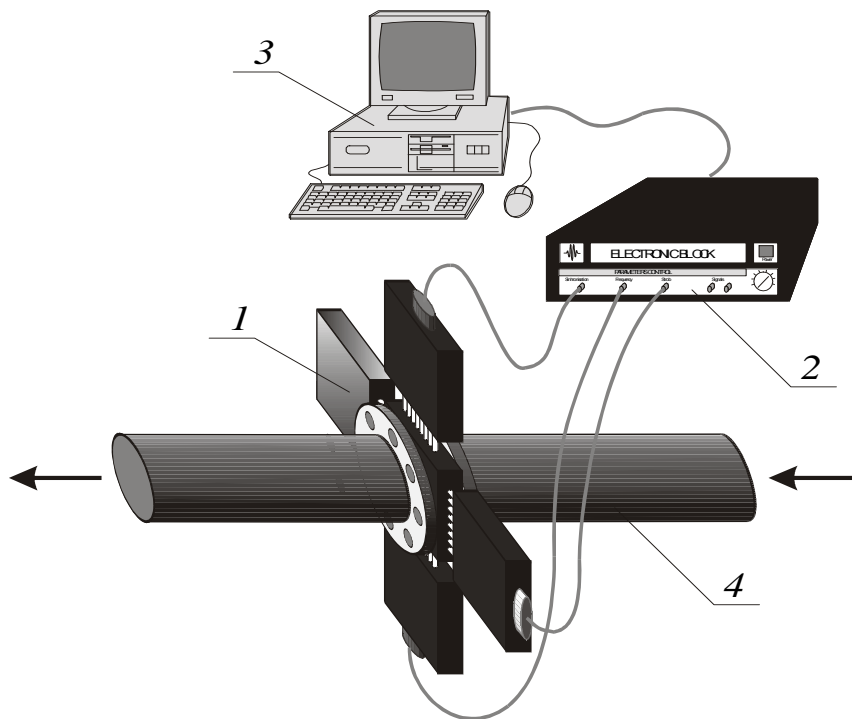
Основными элементами системы высокоскоростной визуализации двухфазного потока являются сеточный датчик, снабженный усилителями и оконечными каскадами генераторов, интерфейс ввода данных и персональный компьютер. Управление процессом визуализации

ции потока, настройка и корректировка параметров, считывание, хранение и анализ полученных данных осуществляется при помощи компьютера (рис. 1).

Сеточный датчик состоит из двух волноводных решеток, размещенных во взаимно параллельных плоскостях перпендикулярно оси течения потока с зазором 1–2 мм (рис. 2). Решетки составлены из восьми волноводов диаметром 0,8 мм, расположенных параллельно. Взаимный угол между волноводами из разных решеток составляет  $60^\circ$ . Все волноводы снабжены пьезоэлектрическими акустическими преобразователями, выведенными за пределы трубопровода. При работе датчика преобразователи одной из решеток используются в качестве излучателей, которые могут активироваться как одновременно, так и поочередно, а преобразователи второй решетки используются как приемники.

Принцип работы сеточного датчика основан на индикации акустической проводимости контролируемой среды, находящейся в «точках» пересечения излучающих и приемных волноводов (узлах решеток), осуществляемой с частотой несколько сотен герц. Процесс измерений происходит следующим образом. Ультразвуковой импульс, генерируемый первым преобразователем – излучателем, распространяется по волноводу и излучается в теплоноситель вокруг него. При прохождении ультразвука теплоносителя в «точках» пересечения волноводов сигналы последовательно принимаются приемными волноводами, а затем фиксируются электронной аппаратурой.

Амплитуда принятых сигналов зависит от фазового состава теплоносителя в «точках» (зазорах между излучающим и приемными волноводами). Она максимальна, когда в «точке» находится жидкая фаза теплоносителя и минимальна, когда – газовая фаза. Процесс измерений повторяется с использованием второго волновода и т. д. до последнего излучающего волновода в решетке.



**Рис. 1. Основные элементы системы визуализации двухфазного потока:**

- 1 – сеточный датчик; 2 – электронный блок; 3 – персональный компьютер;  
4 – трубопровод с контролируемым потоком теплоносителя

В результате в памяти электронной аппаратуры оказывается информация о распределении фаз по сечению трубопровода с шагом, определяемым координатами узлов решеток. Цикл измерений осуществляется за время порядка 500 мкс. В результате получается картина, показывающая практически мгновенный срез фазового состава теплоносителя в сечении

контроля (кадр). Весь процесс повторяется с частотой 500–2000 Гц. Поскольку поток теплоносителя находится в движении, отдельные его фазовые компоненты последовательно пересекают узлы решеток, в результате фиксируется изменение распределения фаз по сечению трубопровода практически в реальном масштабе времени. На конечном этапе данные измерений обрабатываются при помощи компьютера, где реализована программа визуализации размеров, формы и процесса перемещения фаз и производится расчет основных характеристик потока – паросодержания, дисперсности и их изменений во времени.

При разработке ультразвукового волноводного сеточного датчика были исследованы и решены некоторые технические проблемы. *Во-первых*, изучены возможные конструктивные решения для обеспечения наиболее эффективной передачи ультразвуковых сигналов от излучающих волноводов к приемным при минимизации поля помех. *Во-вторых*, размещено сравнительно большое число волноводов с пьезопреобразователями на небольшой площади поверхности трубопровода, при необходимой его герметизации и защите от взаимных помех. *В-третьих*, разработана конструкция, минимизирующая гидравлическое сопротивление и вносящая наименьшие искажения структуры двухфазного потока.



**Рис. 2. Конструкция волноводной решеточной датчика:**

1 – излучающая волноводная решетка; 2 – приемная волноводная решетка; 3 – узлы решеток;  
4 – акустические преобразователи

Алгоритм реконструкции газовых фракций основан на геометрических методах, для которых опорные данные представляются в качестве массива значений, считанных с датчика, и фиксирующих фазовое состояние среды. Следует учитывать, что метод акустического зондирования позволяет получить в точках сечения информацию, свидетельствующую либо о наличии газа в данной точке, либо об его отсутствии, что требует проведения дискриминации полученных данных. Для алгоритма дискриминации используются сведения об акустической проводимости среды в контролируемых точках, полученные при калибровке осушенного датчика и погруженного в жидкость.

Сечения потока считываются через равные промежутки времени и формируется трехмерный массив, характеризующий фазовую структуру газожидкостного потока.

Вполне естественно, что при использовании одного датчика томографа получается развертка потока по шкале времени, а не по продольной оси экспериментального участка, но так как при большинстве режимов движения потока он не успевает существенно эволюционировать на небольших расстояниях, наблюдается визуальное соответствие между считанной и реальной картиной потока. Это позволяет сопоставлять результаты работы томографа с фотографиями потока на визуальном участке, который находится непосредственно перед датчиком или после него.

Для всего массива полученных данных производится изолирование отдельных групп элементов. При этом в каждой такой группе любой элемент должен быть соседним в трёхмерном массиве хотя бы для одного другого элемента той же группы.

Метод создания поверхностей, характеризующих границы разделов фаз

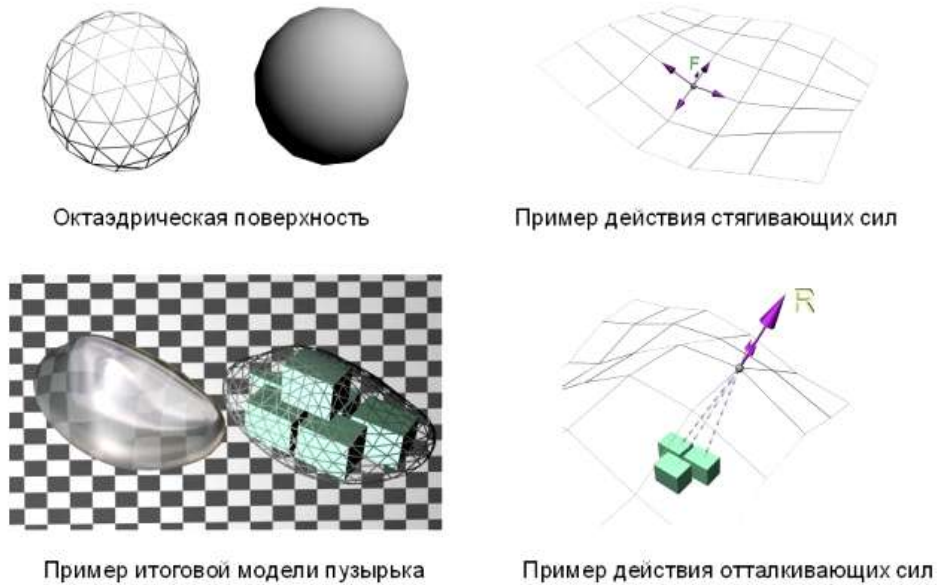
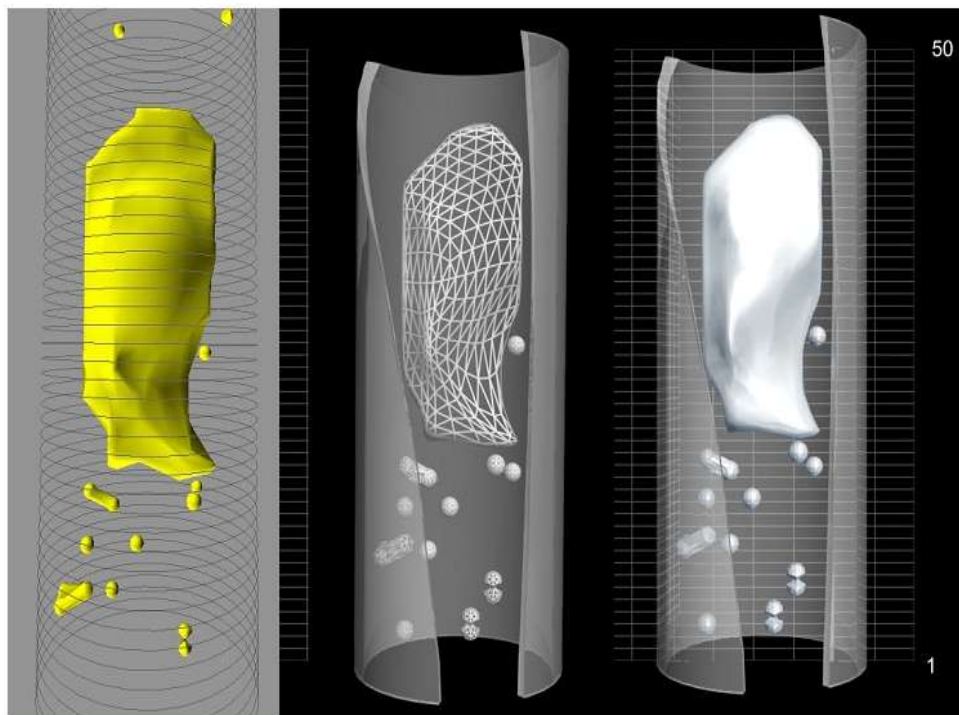


Рис. 3. Реконструкция формы газовых фракций



а) б) в)  
Рис. 4. Этапы доработки геометрической модели, наложение материалов и эффектов освещения

Таким образом, для «газовых» элементов массива определяются газовые фракции. Далее для каждой группы элементов, представляющей газовую фракцию, описывается поли-

гональная поверхность, включающая по объему в себя всю группу элементов в трехмерном пространстве. При этом изначальное распределение полигонов по поверхности изотропно (рис. 3). Такой вариант поверхности наиболее предпочтителен, так как позволяет моделировать действие поля сил на границе раздела фаз наиболее адекватно.

Моделируя в каждой точке поверхности действие основных сил, которые являются прототипами таких физических сил, как давление и поверхностное натяжение, и опираясь на информацию о структуре потока, можно итерационно привести форму поверхности к форме, которая с определенными допусками соответствует реальной физической форме газовой фракции. Этапы доработки геометрической модели показаны на рис. 4.

На первом этапе (рис. 4, *a*) представлено изображение работы зондирующей программы, два изображения (рис. 4, *б*, *в*) показывают второй этап обработки, как результат импорта обработанных геометрических данных в программу 3D моделирования. Для передачи данных доступны два стандартных формата описания 3D моделей – OBJ и VRML.

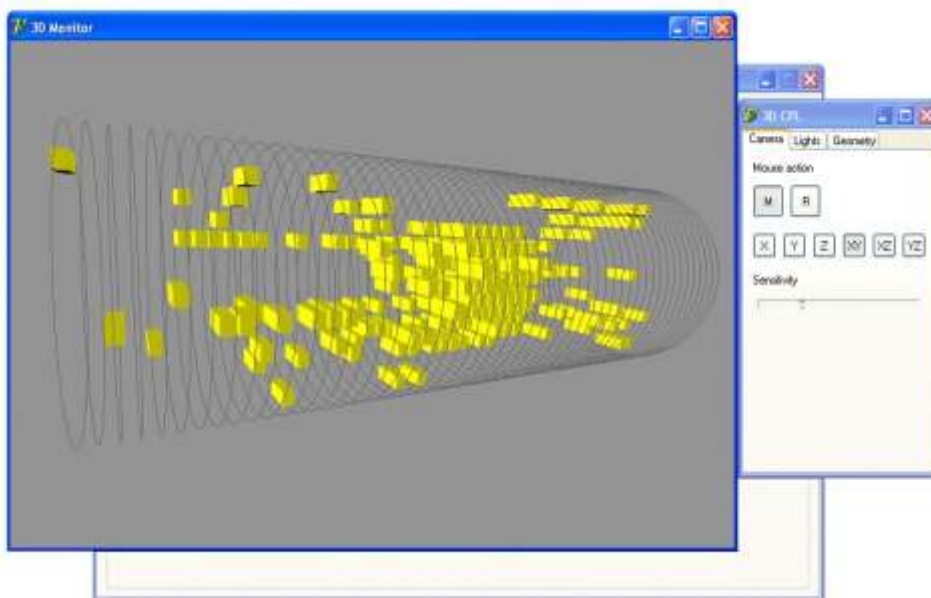


Рис. 5. Пример синтеза трехмерной модели потока

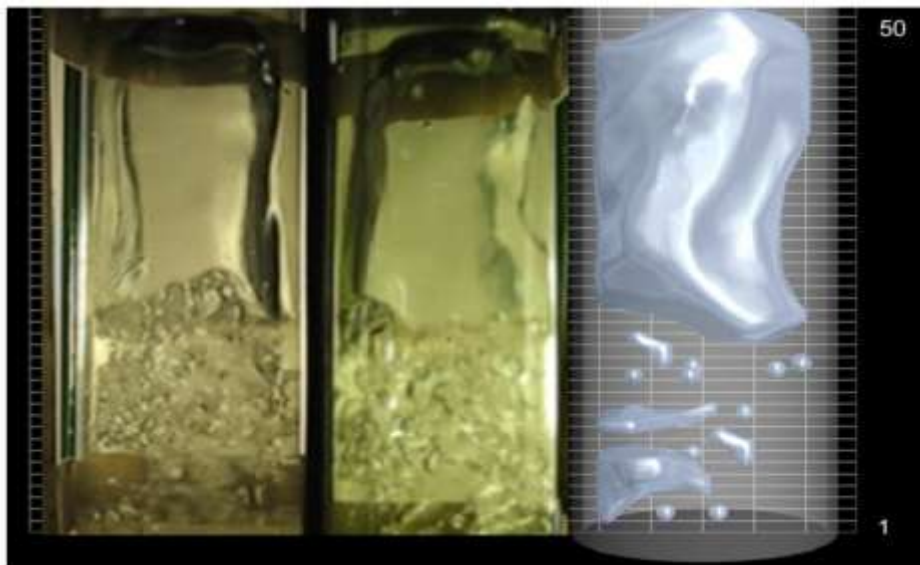


Рис. 6. Фотографии снарядного режима течения потока (фас и профиль) и реконструкции потока сеточным датчиком (объемный расход воды  $1,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ , объем пузыря  $70 \text{ см}^3$ )

Изготовленный датчик был установлен в вертикальной трубе диаметром 50 мм водовоздушного стенда, моделирующего восходящий двухфазный поток. Сравнивались результаты визуализации снарядного режима течения потока при помощи фотоаппаратуры и реконструкции потока сеточным датчиком (рис. 6).

#### Библиографический список

1. **Мельников, В.И.** Акустические методы диагностики газожидкостных потоков / В.И. Мельников, В.П. Дробков, В.В. Контелев. – М.: Энергоатомиздат, 2006. –351 с.
2. **Мельников, В.И.** Ультразвуковая волноводная многоточечная система визуализации двухфазного теплоносителя / В.И. Мельников, В.В. Контелев, В.В. Иванов // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2000. №1. С. 81–88.
3. **Melnikov, V.I.** First experiments on visualisation of two-phase high pressure and temperature flows using an ultrasonic mesh sensor / V.I. Melnikov, V.N. Khokhlov, V.V. Ivanov and at. // Kerntechnik, May 2003. V. 68. No. 3. P. 102–105.

*Дата поступления  
в редакцию 04.02.2011*

**V.I. Melnikov, G.A. Egorov**

#### **ULTRASOUND WAVE-GUIDE SYSTEM FOR TWO-PHASE HEAT CARRYING FLOWS VISUALIZATION**

This article presents new acoustic measurement and diagnostic system for high performance visualization of two-phase heat carrying flows inside of pipes. It describes principles and methods of two-phase flows visualization. Some results of experiments with developed system are applied to the article.

*Key words:* two-phase flows, flow analysis, flow visualization, ultrasound wave-guide sensors.