

## РАЗРАБОТКА МНОГОТОЧЕЧНОЙ АКУСТОЗОНДОВОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ДВУХФАЗНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

**В.И. Мельников, В.В. Иванов, И.А. Тепляшин, А.В. Логинов\*,**

**Д.И. Шмелев\***

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Н.Новгород*

*\*ОАО «Опытное конструкторское бюро машиностроения «Африкантов»,  
г. Н.Новгород*



Разработана система диагностики двухфазного водовоздушного потока, основанная на методе акустического зондирования. Созданная система позволяет изучать распределение истинного объемного газосодержания по сечению прямоугольного канала 100×100 мм при различных углах его наклона от вертикали. С ее помощью можно оценивать дисперсность и скорость перемещения газовых включений, а также режимы течения потока. Система состоит из перемещаемого восьмиточечного зонда, управляемого при помощи компьютера дистанционно, электронного блока и персонального компьютера с программой обработки данных. Выполнена калибровка измерительной системы dilatометрическим методом при вертикальном положении канала. Показано, что среднеквадратичное относительное отклонение газосодержания от эталонных значений не превышает 2% в диапазоне газосодержаний 0 – 12%. Выполнены расчетные оценки измеренных значений газосодержания в сравнении с известными зависимостями модели потока дрейфа.

**Ключевые слова:** акустическое зондирование, двухфазные потоки, объемное газосодержание, измерительная система, пассивная система аварийного расхолаживания,

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных направлений повышения безопасности ЯЭУ является внедрение пассивных систем аварийного расхолаживания активной зоны, основанных на естественной циркуляции теплоносителя (ЕЦ). Главным их преимуществом является полная автономность от внешних источников энергии. В процессе работы таких систем при понижении давления в системе теплоноситель вскипает, что, с одной стороны, способствует развитию ЕЦ, а с другой, может приводить к неустойчивости циркуляции и даже ее опрокидыванию. Контур аварийного расхолаживания может состоять из труб различного геометрического размера, иметь горизонтальные и наклонные участки. При проектировании системы охлаждения необходима информация об особенностях движения двухфазного потока теплоносителя в трубах.

Вместе с тем, сведения о поведении двухфазного потока в горизонтальных и вертикальных трубопроводах скудны, а в наклонных – практически отсутствуют.

Разработанная система диагностики двухфазного потока теплоносителя на основе метода акустического зондирования [1] предназначена для исследования распределе-

© В.И. Мельников, В.В. Иванов, И.А. Тепляшин, А.В. Логинов, Д.И. Шмелев, 2014

ния истинного объемного газосодержания и дисперсности газовой фазы по сечению в канале при разных углах наклона, при давлении, близком к атмосферному, и различных расходах жидкой и газовой фаз.

### КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ

Основным элементом разработанной системы является измерительная ячейка прямоугольного сечения (100x100мм), оснащенная акустозондовым датчиком и электронным блоком. Управление процессом измерений и обработки данных осуществляется при помощи персонального компьютера. Измерительная ячейка с датчиком, устройство перемещения и платы электронного блока установлены на общей платформе. Измерительная ячейка изготовлена с возможностью встраивания в экспериментальный канал (рис. 1).

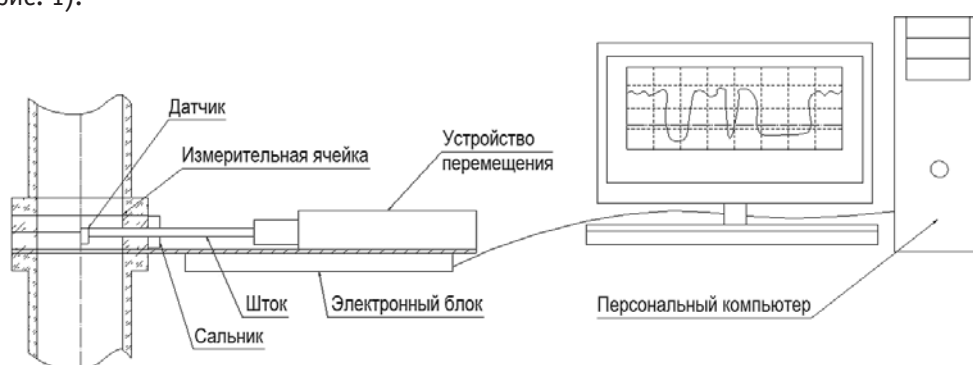


Рис. 1. Общая схема системы диагностики газожидкостного потока

Датчик представляет собой устройство из восьми акустических зондов, позволяющих контролировать такое же число локальных объемов двухфазной среды, состоящей из жидкости с газовыми включениями различного размера.

Зонды расположены в ряд на кронштейне на расстоянии 12 мм друг от друга. Кронштейн закреплен на штоке, уплотняемом сальником и приводимом в движение электроприводом по командам от персонального компьютера. В системе предусмотрено измерительное устройство для определения положения зондов в потоке (рис.2).

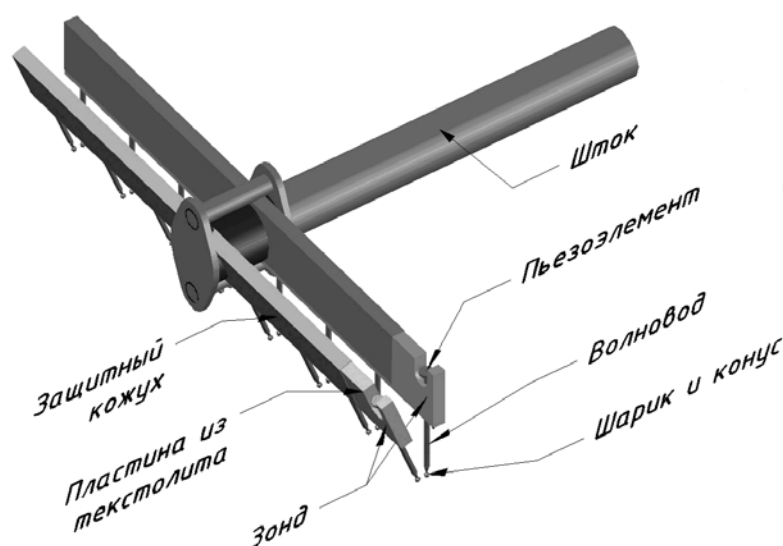


Рис.2. Конструкция акустозондового датчика

Каждый из зондов состоит из пары акустических волноводов диаметром 0,8 мм и длиной 20 мм. К волноводам с одной стороны прикреплены пьезоэлементы диаметром 2 мм, толщиной 0,8 мм, на другой стороне волноводов сформированы конусы высотой 5 мм с шариками на вершине диаметром 0,8 мм. Волноводы зонда расположены под углом около  $20^\circ$  друг к другу так, чтобы шарики находились на расстоянии около одного миллиметра друг от друга, формируя, таким образом, контролируемый объем.

Волноводы зондов закреплены в двух пластинах из стеклотекстолита, расположенных друг против друга, причем на одной пластине установлены излучающие волноводы, а на второй – приемные. Соединительные провода с обкладок пьезоэлементов выводятся через шток.

В процессе работы зонда на излучающий пьезоэлемент подаются электрические импульсы. Генерируемые им ультразвуковые волны через волновод возбуждают осциллирующие колебания шарика и передаются в среду. Если контролируемый объем заполнен жидкостью, то акустические сигналы достигают шарика второго волновода и заставляют его осциллировать. Затем акустические сигналы по волноводу поступают к приемному пьезоэлементу, где преобразуются в электрические сигналы и подаются на вход электронного блока. При попадании в контролируемый объем газовой фазы прием сигналов прекращается, что фиксируется электронной измерительной схемой. Принятые сигналы оцифровываются и передаются в компьютер.

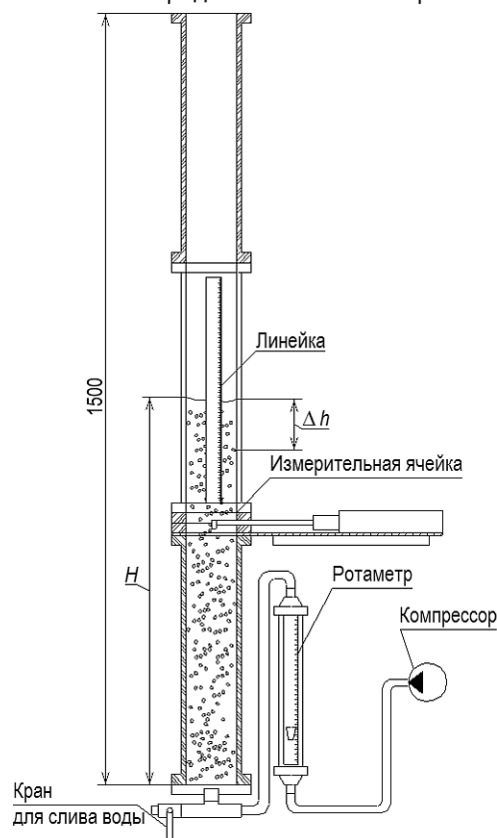


Рис.3. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка состоит из вертикального канала прямоугольного сечения (100×100мм), изготовленного из оргстекла (рис.3). Предусмотрена возможность наклона канала от вертикали на любой произвольный угол, вплоть до горизонтального положения.

Канал составлен из трех участков общей высотой 1500 мм. Измерительная ячейка установлена на высоте 500 мм в виде вставки между фланцевыми соединителями. Снизу канала организован подвод сжатого воздуха из компрессора. Расход воздуха определяется ротаметром. Для контроля уровня среды предусмотрена измерительная линейка, размещенная вдоль канала.

### КАЛИБРОВКА СИСТЕМЫ

Для определения погрешности измерений истинного объемного газосодержания двухфазной среды при помощи созданной системы использовалась методика сравнения результатов измерений, полученных с использованием системы диагностики, с данными дилатометрического метода в режиме барботажа. Положение канала выбрано вертикальное.

Истинное объемное газосодержание при барботаже столба жидкости газом определяется как доля объема двухфазной среды, занятой газовой фазой:

$$\varphi_d = \Delta h / H, \quad (1)$$

где  $\Delta h$  – приращение уровня среды за счет барботажа;  $H$  – уровень столба жидкости с газовой фазой в процессе барботажа.

При проведении калибровки в измерительный канал, заполненный водой до отметки 700 мм, снизу подавался воздух. Вследствие вспучивания верхняя граница воды смещалась вверх до уровня  $H$ . Среднее объемное газосодержание  $\varphi_d$  вычислялось по приращению уровня на величину  $\Delta h$  по формуле (1).

Измерение среднего по сечению газосодержания методом акустического зондирования осуществлялось за счет сканирования сечения канала 8-точечным датчиком и последующим усреднением данных:

$$\varphi_a = (\sum \alpha_i) / n, \quad (2)$$

где  $\alpha_i$  – истинное локальное газосодержание в  $i$ -й точке сечения канала;  $n$  – число точек измерения (обычно 64).

Время выдержки зондов в точке измерений составляло 30 с.

Результаты проведенных измерений приведены на рис. 4. Опыты проводились в диапазоне газосодержания от 0 до 12%. Это связано со значительным размыванием верхней границы уровня воды при больших расходах воздуха вследствие коалесценции пузырей и возникновения неустойчивости их движения в канале из-за его относительно большого сечения, что не позволило адекватно определить величину  $H$ .

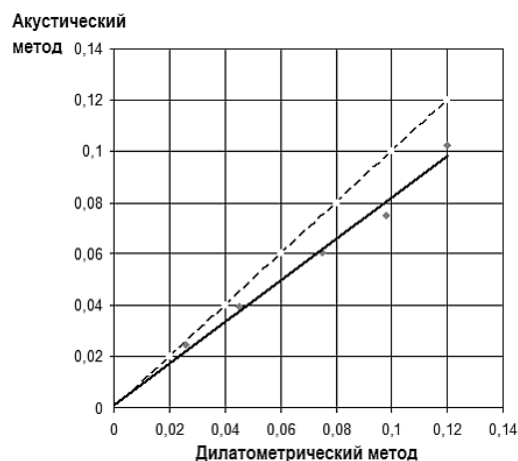


Рис. 4. Результаты измерений методом акустического зондирования по сравнению с данными дилатометрии. Пунктиром показаны результаты корректировки данных по формуле (3)

Принимая dilatометрический метод измерений за эталонный, мы выполнили коррекцию данных акустических измерений при помощи линейной функции.

Корректировочная формула имеет вид

$$\varphi_k = -0.05 + 1.18\varphi_a. \quad (3)$$

В результате среднеквадратичное относительное отклонение откорректированных данных от эталонных не превышает 2%.

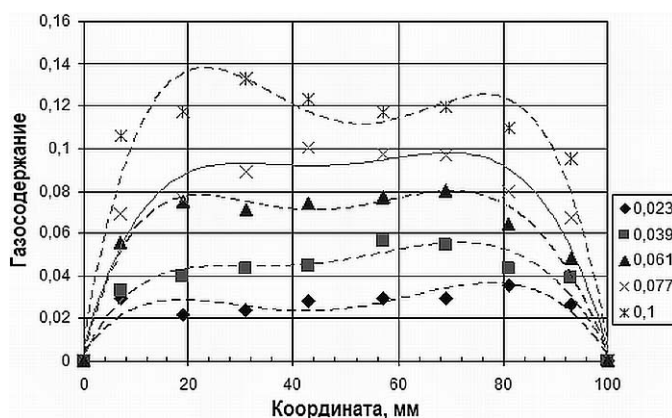


Рис. 5. Распределение газосодержания по сечению канала

На рисунке 5 приведены результаты измерения распределения объемного газосодержания по сечению канала при разных расходах воздуха (справа на графике указаны значения среднего газосодержания, полученные dilatометрическим методом).

Характерная форма распределения в виде двугорбой кривой является типичной для каналов относительно большого диаметра и обусловлена торможением пузырьков у стенки канала.

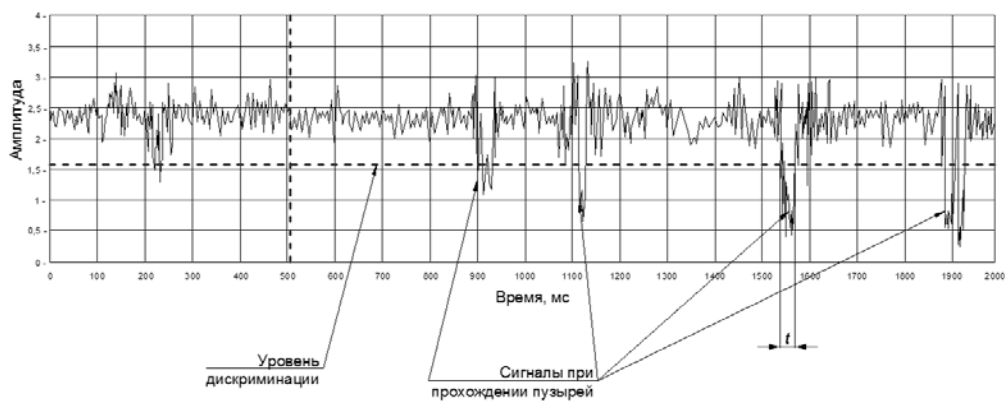


Рис. 6. Типичная форма сигналов на выходе зонда в пузырьковом потоке

Для определения дисперсности двухфазного потока, в нашем случае характерных размеров газовых включений, используется временной анализ сигналов на выходе зондов (рис. 6). При движении двухфазного потока амплитуда сигнала меняется в диапазоне амплитуд от максимальной (жидкая фаза) до минимальной (газовая фаза) [2]. Это вызвано попаданием движущихся газовых образований в контролируемый объем зонда, прерывающих прохождение ультразвуковых импульсов от излучателя к приемнику. Относительно небольшие колебания амплитуды сигнала обусловлены интерференцией акустической волны от поверхности пузырьков. Очевидно, чем больше длительность прерывания, тем больше размер пузыря.

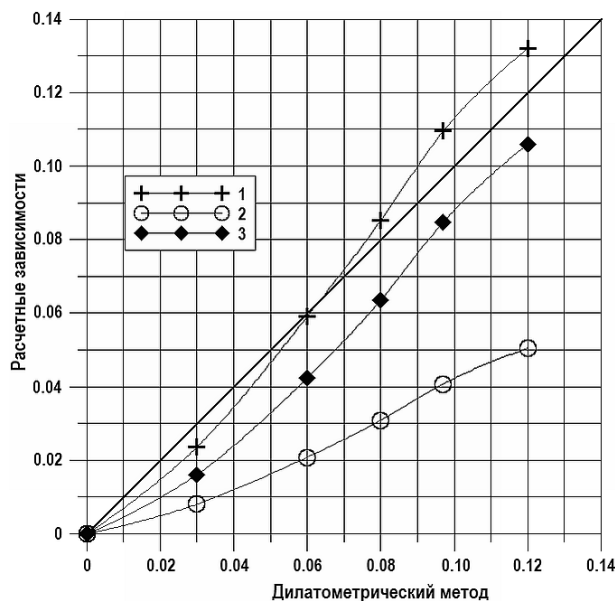


Рис. 7. Результаты расчетов объемного газосодержания по различным методикам: 1 – [3]; 2 – [4]; 3 – [5]

Нами были выполнены расчетные оценки истинного объемного газосодержания по данным измерения расхода воздуха, подаваемого в канал, с использованием известных зависимостей модели потока дрейфа [3 – 5]. Результаты приведены на рис. 7.

Из приведенного графика следует, что при барботаже зависимость [3] дает значения, наиболее близкие к результатам нашего эксперимента.

Предполагается продолжить исследования движения двухфазного потока в наклоненных каналах при различных расходах воды и воздуха.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана система диагностики двухфазного потока, позволяющая проводить исследования двухфазного теплоносителя в канале прямоугольного сечения 100x100мм с изменяемым углом наклона (вертикально, наклонно и горизонтально). Предусмотрена возможность измерения распределения газосодержания по сечению канала, а также дисперсности потока.

Основной частью системы является датчик с восемью акустическими зондами, перемещаемый по сечению канала дистанционно управляемым устройством. Функции позиционирования датчика, съема и предварительной обработки информации осуществляет персональный компьютер.

Относительная погрешность измерений истинного объемного газосодержания в сравнении с дилатометрическим методом находится в пределах 2% в диапазоне газосодержаний от 0 до 12%.

## Литература

1. Мельников В.И., Дробков В.П., Контелев В.В. Акустические методы диагностики газожидкостных потоков. – М.: Энергоатомиздат, 2006, – 351 с.
2. Мельников В.И. и др. Исследование акустической проводимости водяного теплоносителя высоких параметров при его вскипании// Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2006. – №1. – С. 70-75.
3. Kataoka I., Ishii M. Drift Flux Model to Large Diameter Pipe and New Correlation for Pool Void Fraction// Int. J. Heat Mass Transfer. – 1987. – V. 30. – №9. – P. 1927.

4. Лабунцов Д.А., Корнюхин И.П., Захарова Э.А. Паросодержание двухфазного адиабатного потока в вертикальных каналах // Теплоэнергетика. – 1968, – № 4. – С. 62-67.

5. Балунов Б.Ф и др. Экспериментальное обоснование проекта системы аварийного расхолаживания реакторной установки КЛТ-40С плавучей атомной теплофикационной электростанции // Теплоэнергетика. – 2011. – №5. - С. 55-60.

Поступила в редакцию 20.11.2013 г.

#### **Авторы**

Мельников Владимир Иванович, профессор, доктор техн. наук

E-mail: melnikov@nntu.nnov.ru

Иванов Вадим Владимирович, доцент, кандидат техн. наук

E-mail: ivv@nntu.nnov.ru

Тепляшин Иван Алексеевич, аспирант НГТУ

E-mail: ivantia@mail.ru

Логинов Андрей Валентинович, инженер-испытатель, аспирант НГТУ

E-mail: loginoff.86@gmail.com

Шмелев Дмитрий Игоревич, инженер-конструктор, аспирант НГТУ

E-mail: shmelyov@mail.ru



UDC 621.039.564

## THE DEVELOPMENT OF MULTI-POINT ACOUSTIC PROBE DIAGNOSTICS SYSTEM OF TWO-PHASE COOLANT

Mel'nikov V.I., Ivanov V.V., Teplyashin I.A., Loginov A.V. <sup>\*)</sup>, Shmelyov D.I. <sup>\*)</sup>

Nizhniy Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev. 24, Minin st., Nizhniy Novgorod, 603600 Russia

<sup>\*)</sup> Joint Stock Company «Afrikantov Experimental Design Bureau for Mechanical Engineering». 15, Burnakovsky passage, Nizhniy Novgorod, 603074 Russia

### ABSTRACT

Air-water two phase flow diagnostics system based on acoustic sounding method has been developed for passive system of emergency cooling. The system make possible to study the real volumetric gas content distribution in the cross section of rectangular channel 100×100 mm at different angles of slope from vertical. Moreover, it is possible to estimate the flow dispersion, velocity of gas inclusions moving and flow conditions. The system consists of a movable 8-point probe which controlled remotely, electronic test unit in connection with computer for data processing.

The calibration of the measurement system by dilatometer method in vertical position of the channel was carried out. It has been shoran that the mean-square relative deviation of gas content from the standard values didn't be over 2% in the range 0 – 12% of gas content.

The calculated evaluation of measured values of gas content in comparison with the known dependencies for drift-flux model.

**Key words:** multi-point acoustic probe, two-phase flow, volume gas content, measurement system, passive system of shut-down cooling of reactor.

### REFERENCES

1. Mel'nikov V.I., Drobkov V.P., Kontelyov V.V. *Akusticheskie metody diagnosiki gazozhidkostnyh potokov* [Acoustic methods of diagnosis of gas-liquid flows]. Moscow, Energoatomizdat Publ. 2006. 351 p. (in Russian)
2. Mel'nikov V.I., Khokhlov V.N., Ivanov V.V., Duncsev A.V. Issledovanie akusticheskoy provodimosti vodyanogo teplonositelya vysokih parametrov pri ego vskipanii [Investigation of acoustic conductivity water coolant of high parameters when boiling]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2006, no. 1, pp. 70–75.
3. Kataoka I, Ishii M. Drift Flux Model to Large Diameter Pipe and New Correlation for Pool Void Fraction. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1987. 1927 p.
4. Labuncov D.A., Koryuhin I.P., Zaharova E.A. Parosoderzhanie dvufaznogo adiabatnogo potoka v vertikal'nyh kanalah [Steam content of adiabatic two-phase flow in vertical channels]. *Teploenergetika*. 1968. 257 p.
5. Balunov B.F., Scheglov A.A., Il'in V.A., Sajkova E.N., Bol'shuhin M.A., Byh O.A., Hizbulin A.M., Sokolov A.N. Eksperimental'noe obosnovanie proekta sistemy avariynogo rasholagivaniya reaktornoj ustanovki KLT-40S plavechej atomnoj teplofikacionnoj electrostancii [Experimental study for emergency cooling system KLT-40S floating nuclear cogeneration power station]. *Teploenergetika*. 2011, no. 5, pp. 55-60.

### Authors

Mel'nikov Vladimir Ivanovich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: melnikov@nntu.nnov.ru

Ivanov Vadim Vladimirovich, Docent, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: ivv@nntu.nnov.ru

Teplyashin Ivan Alekseevich, Postgraduate of NNSTU

E-mail: ivantia@mail.ru

Loginov Andrej Valentinovich, Engineer, Postgraduate of NNSTU

E-mail: loginoff.86@gmail.com

Shmelyov Dmitriy Igorevich, Engineer, Postgraduate of NNSTU

E-mail: shmelyov@mail.ru