

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.039

А.А. Баринов<sup>1</sup>, А.В. Варенцов<sup>1</sup>, В.Г. Главный<sup>2</sup>, С.М. Дмитриев<sup>1</sup>, М.А. Легчанов<sup>1</sup>,  
А.В. Рязанов<sup>1</sup>, А.Е. Хробостов<sup>1</sup>

## ВНЕДРЕНИЕ МЕТОДА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОНДУКТОМЕТРИИ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ СМЕШЕНИЯ ВНУТРИРЕАКТОРНЫХ ПОТКОВ В СОВРЕМЕННЫХ ЯЭУ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе (г. Новосибирск)<sup>2</sup>

Представлена методика калибровки сетчатых и стержневых датчиков при внедрении метода пространственной кондуктометрии в характерную геометрию водо-водяного реактора. Приведено обоснование применения данного метода. Представлено краткое описание экспериментального стенда, проведена отработка настройки пространственных кондуктометрических датчиков, получены значения погрешности измерительной системы.

*Ключевые слова:* ядерный реактор, пространственная кондуктометрия, CFD-коды, процессы смешения потоков в ЯЭУ.

### Введение

Одной из приоритетных задач в атомном машиностроении является решение вопросов обоснования теплотехнической надёжности и безопасности при проектировании современных РУ. Есть несколько вариантов обоснования безопасности конструкции. Первый – натурное возведение разрабатываемой установки с последующим комплексом испытаний, направленных на подтверждение надёжности конструкции. Очевидно, что такой метод требует колоссальных как ресурсных, так и временных затрат. Необходимо отметить, что современные проекты должны быть полностью разработаны в очень ограниченные сроки. В то же время, благодаря высокому уровню развития компьютерных технологий, широкое распространение получили расчёты сложных процессов в оборудовании. Вычислительная гидродинамика (computational fluid dynamics, CFD) позволяет моделировать различные процессы, протекающие внутри оборудования ещё на стадии проектирования. Однако, чтобы применять CFD-коды при разработке оборудования, применяемого в атомной энергетике, необходимо подтвердить достоверность результатов полученных расчётов.

Существует определённый класс задач, характерный для атомной энергетики – процессы смешения неизотермических потоков. Эти процессы существенно влияют на параметры теплоносителя на входе в активную зону, что определяет её теплотехническое состояние. На входе в реактор могут возникать неравномерные потоки теплоносителя по разным петлям, приводящие к локальным отклонениям параметров от номинальных. Процессы, протекающие при отклонении параметров теплоносителя от допустимых значений, необходимо оценивать при обосновании безопасной работы ЯЭУ, поскольку они приводят к существенной неравномерности теплогидравлических характеристик в камере смешения реактора и на входе в активную зону.

Прикладные исследования процессов смешения, пригодные для верификации, обуславливают применение в экспериментах современных и достоверных методов детектирования. К их числу относится кондуктометрический метод с использованием сетчатого датчика. В зарубежных исследованиях измерительные системы с сетчатыми датчиками находят широкое применение в исследовании процессов массообмена, благодаря высокой точности, наглядности и информативности полученных результатов.

Необходимость более детального изучения процессов гидродинамики в условиях реакторной геометрии и ранее проведенные исследования свидетельствуют об актуальности использования матричного кондуктометрического метода измерения при изучении тепло-массопереноса.

### Экспериментальный стенд

В настоящее время для экспериментальных исследований и верификации программных средств на кафедре «Атомные и тепловые станции» в НГТУ им. П.Е. Алексеева введен в эксплуатацию крупномасштабный стенд исследования смешения потоков.

Общая схема стенда (рис. 1) предполагает организацию трех видов экспериментальных режимов:

- изотермического смешения в разомкнутом контуре циркуляции (для исследований с использованием потоков с различной концентрацией примесей);
- неизотермического смешения как в замкнутом, так и в разомкнутом контуре циркуляции (для исследований с использованием разнотемпературных потоков).

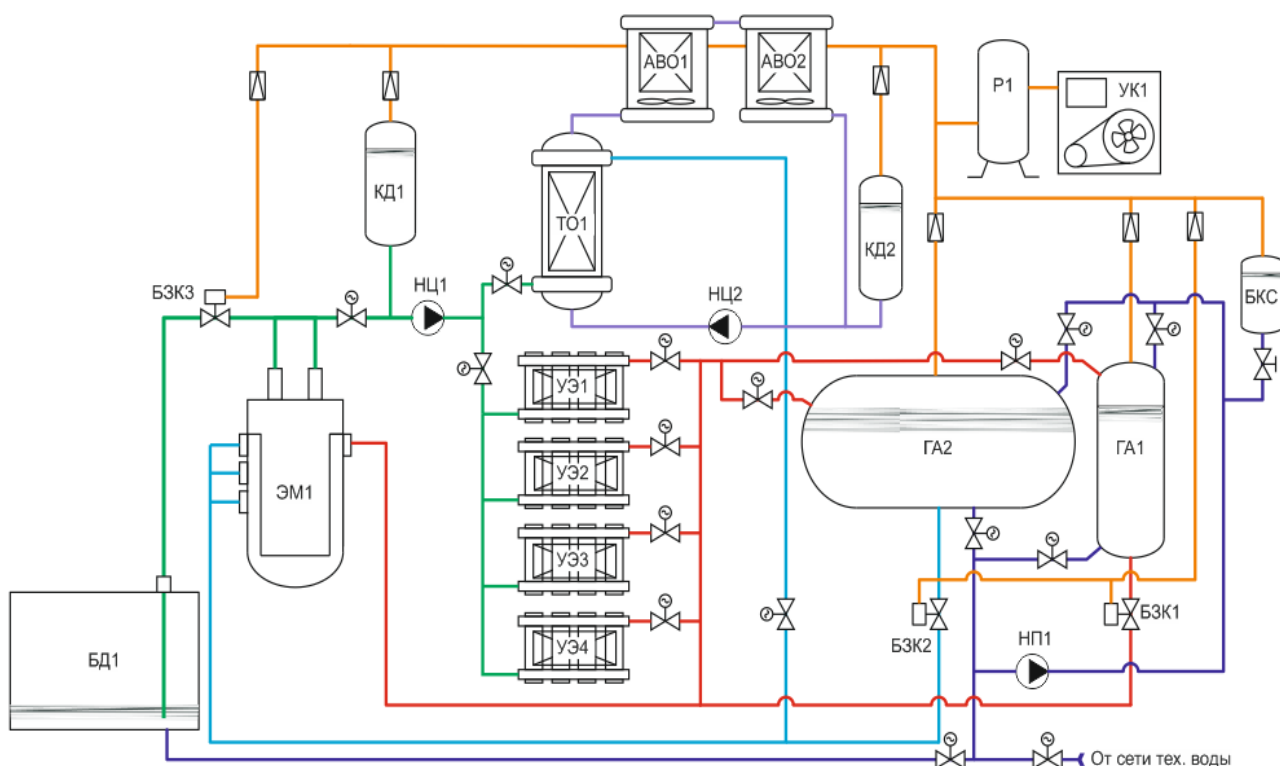


Рис. 1. Упрощённая схема экспериментального стенда

Для проведения указанных режимов стенд спроектирован в виде двух контуров: исследовательского контура смешения потоков с установленной экспериментальной моделью и контура охлаждения, необходимого для отвода тепла и подготовки «холодного» теплоносителя.

Оборудование стенда позволяет создать режимы как ламинарные, так и турбулентные течения при различной температуре, расходах и концентрации примесей в потоке теплоносителя. Параметры, при которых может осуществляться моделирование, приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Основные параметры экспериментального стенда

Параметр	Значение
Число имитирующих петель циркуляции теплоносителя	6
Мощность нагревательных установок (суммарная), кВт	800
Мощность контура охлаждения (максимальная), кВт	960
Расход через экспериментальную модель, м <sup>3</sup> /ч	До 200
Температура смешиваемых потоков, °С	15-200
Диаметры исследуемых моделей по внешней обечайке, мм	400-1500
Давление в контуре смешения потоков, кгс/см <sup>2</sup>	До 20
Удельная электрическая проводимость теплоносителя	До 4000 мкСм/см

В наиболее сложном режиме (неизотермического смешения в замкнутом контуре), циркуляция теплоносителя происходит следующим образом:

- напором, создаваемым циркуляционным насосом контура смешения, теплоноситель направляется в напорный коллектор, после которого разделяется на две части. Одна часть направляется в раздающий коллектор электронагревательной установки, где распределяется между четырьмя параллельно подключенными электронагревательными установками. В них теплоноситель подогревается, снимая тепло с нагревательных элементов. На выходе из нагревателей "горячий" потоки теплоносителя направляются в сливной коллектор, где объединяются. Далее поток поступает в трубопровод, откуда направляется в "горячий коллектор" системы подачи теплоносителя в модель. Другая часть теплоносителя под действием напора насоса, по трубопроводу направляется в змеевиковый теплообменник системы охлаждения, где передает тепло теплоносителю.

"Холодный" теплоноситель поступает в трубопровод и далее в "холодный коллектор" системы подачи теплоносителя в модель. После смешения потоков в модели теплоноситель отводится в "сливной коллектор" системы, откуда по трубопроводу подается вновь на всас насоса. Система замкнутого контура оснащена всеми необходимыми вспомогательными системами, включая системы компенсации объема, воздухоудаления, дренажа и пр.

## Измерительная система

Измерительная система стенда состоит из технологической части, необходимой для контроля режимных параметров работы установки, а также исследовательской части, при помощи которой выполняются замеры физических характеристик в области турбулентного смешения потоков, разработанной совместно с Институтом теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН. Параметры измерительной системы стенда представлены в табл. 2.

Таблица 2

## Параметры измерительной системы

Параметр	Значение
1	2
Технологическая часть измерительной системы (КИП и А, АСУ ТП)	
Число датчиков контроля температуры сред	29
Число датчиков контроля давления	23
Число датчиков контроля расхода	14
Число уровнемеров	5
Число датчиков контроля солесодержания	12
Число управляемых элементов арматуры	70
Исследовательская часть системы	
Число датчиков контроля солесодержания сред:	
- в опускной камере реактора	54 (3 плоскости по 18 датчиков)

Окончание табл. 2

1	2
- на входе и выходе из активной зоны	2
- частота независимого опроса датчиков	100 Гц
- диапазон проводимости рабочей среды	10-4000 мкСм/см (5-2000 мг/л NaCl)

Задачами исследований является изучение смешения потоков. В связи с этим необходимо фиксировать пульсации изучаемых полей. В дальнейшем разрешение пульсаций даёт возможность вести спектральный анализ. Для этого можно выбрать следующие методы:

1. Термопарный (исследуются температурные поля).
2. Оптический (исследуются температурные поля).
3. Кондуктометрический (исследуются поля концентраций).

Преимущества, которые даёт метод пространственной кондуктометрии:

- быстроедействие – измерения проводятся с высокой скоростью, позволяющей разрешить пульсации полей. Для достижения таких результатов измерением при помощи термопар, существует необходимость выполнять их очень малого размера;
- достаточная пространственная разрешающая способность – при необходимости измерения большего числа характерных точек, есть возможность добавления числа струн сетчатого датчика. Метод позволяет экономить число каналов измерения, поскольку измерительная область образуется скрещивающимися струнами. Так, для измерения 19 каналов-имитаторов ТВС, требуется 10 измерительных каналов в кондуктометрическом методе, против 19 в термопарном, но с увеличением измеряемых точек, преимущество кондуктометрического метода растёт. При исследовании потока на выходе из 163 каналов-имитаторов, потребуется всего 36 измерительных канала для кондуктометрического метода;
- отсутствует необходимость использования прозрачных моделей – преимущество относительно оптических методов исследований, что даёт возможность проводить моделирование под большим избыточным давлением и высокой температуре.
- дешевизна применения – не требуются специально приготовленные калиброванные примеси, для лучшей детекции, как в оптическом методе (PIV);
- исследование сложных геометрий, недоступных лазерным технологиям (например, труба в трубе).

Исходя из перечисленного, исследовательская часть измерительной системы основана на применении кондуктометрических датчиков сетчатой и стержневой конструкции, изображённые на рис. 2.



а)

б)

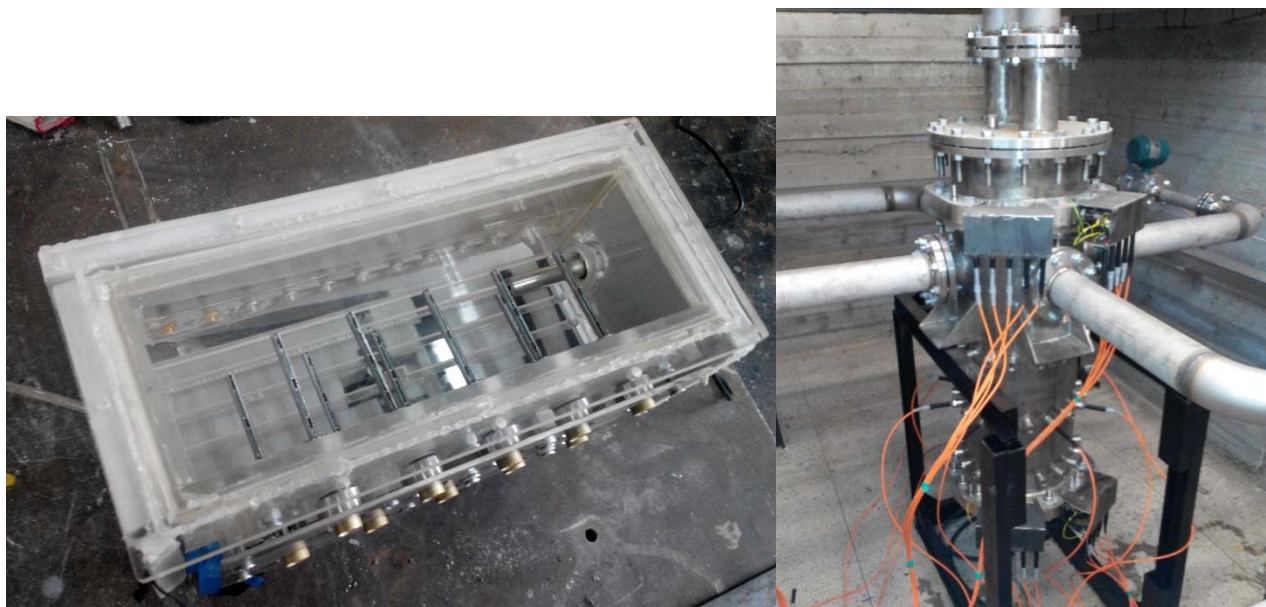
**Рис. 2. Исследовательская часть измерительной системы:**  
а – сетчатый датчик (верхняя камера); б – стержневые датчики

Сетчатый датчик устанавливается на входе и выходе из области, имитирующей каналы активной зоны (измерительные области по центрам канал-имитаторов), и представляет собой набор струн, расположенных в двух скрещивающихся плоскостях, повернутых друг относительно друга на 60 градусов. Таким образом, любые две струны соседних слоёв представляют собой скрещивающиеся отрезки. Область, расположенная между струнами датчика в месте их видимого пересечения, образует кондуктометрическую ячейку. Совокупность кондуктометрических ячеек между электродами образует измерительную область сетчатого датчика. Стержневые датчики установлены на всем протяжении опускной камеры реактора (в трех плоскостях с азимутом  $20^\circ$  между соседними датчиками). Каждый датчик имеет по три пары электродов, между которыми образуется кондуктометрическая ячейка. Характеристики измерительной системы дают возможность работать с потоками в широком диапазоне проводимостей рабочих сред, а также получать частотно-энергетические характеристики флуктуаций значений локальной концентрации для последующего восстановления спектра турбулентных пульсаций в потоке.

### Методика калибровки измерительной системы

Опыт применения сетчатого кондуктометрического датчика в простой геометрии показал, что при одинаковой удельной проводимости среды в сечении сетчатого датчика значения напряжения для разных измерительных ячеек существенно различаются. По этой причине возникает необходимость получения калибровочных зависимостей для пересчёта измеренных значений напряжения в величину проводимости и концентрации растворённой примеси для каждой измерительной ячейки. Поэтому первой задачей, которую потребовалось решить при внедрении метода пространственной кондуктометрии в характерную реакторную геометрию, стала необходимость калибровки измерительной системы.

Отличия в калибровке стержневого и сетчатого датчика заключались в том, что для стержневого типа была создана специальная калибровочная модель, в которую загружалось сразу по 10 датчиков, а для сетчатого датчика калибровка проводилась непосредственно после установки в экспериментальную модель, так как она возможна только после натяжения самих струн и герметизации вводных участков. Модели, в которых проводилась калибровка датчиков изображены на рис. 3.



*a)*

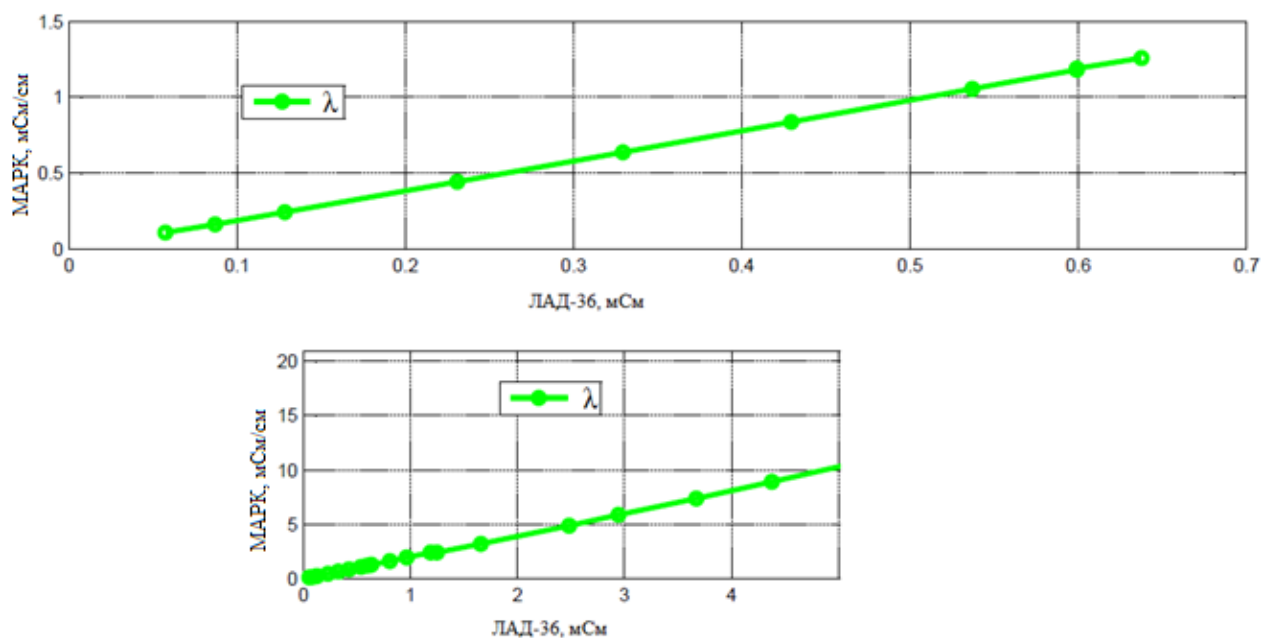
*б)*

**Рис. 3. Модели для калибровки кондуктометрических датчиков:**

*a* – модель для калибровки стержневых датчиков; *б* – экспериментальная модель

В остальном калибровка для обоих типов датчиков велась одинаково и проходила по следующему алгоритму: модель заполнялась «пресным» теплоносителем, затем через вводные участки подавался насыщенный раствор сульфата натрия, после чего воздухом проходило интенсивное перемешивание. После размытия пятна трассера, фиксировались значения проводимости среды при помощи лабораторного прибора МАРК-603. Затем вводилась следующая порция трассера для повышения общего уровня проводимости теплоносителя на 200 мкСм/см. Таким образом, каждому значению проводимости, соответствует значение электрического сигнала в кондуктометрических ячейках. После чего были подобраны переводные коэффициенты, которые дают возможность переводить измеренные значения напряжения в величину проводимости для каждой измерительной ячейки.

После введения калибровочных коэффициентов в программу измерительной системы, был проведён ряд «слепых» тестов, приведены на рис. 4, для проверки правильности проведённой калибровки. Для этого вводился трассер в модель, производилось интенсивное перемешивание теплоносителя внутри модели. Затем снимались показания при помощи измерительной системы ЛАД-36, которые сравнивались с эталонными показаниями МАРК-603.



**Рис. 4. Калибровка измерительной системы. Сверху – низкий диапазон концентраций теплоносителя, снизу – рабочий диапазон (до 4000 мкСм/см)**

В результате оценки погрешности измерительной системы, который показал, что максимальное расхождение измерительной системы ЛАД-36 с показаниями лабораторного прибора МАРК составляют 20 мкСм/см при общем уровне концентрации 1500 мкСм/см, что в относительных единицах означает 1,3%

### Выводы

1. Проведён комплекс экспериментальных исследований, в результате которых была откалибрована измерительная система. Таким образом, измерительный комплекс позволяет фиксировать пространственное распределение полей концентрации в модели водо-водяного реактора с отклонением показаний не более 1,3%.

2. Полученные калибровки измерительной системы занесены в измерительный программный комплекс, что даёт возможность проведения крупномасштабных высокоточных экспериментов для исследования внутриреакторных процессов смешения.

3. Отработана методика проведения высокоточных экспериментов, необходимых для верификации расчётных CFD-кодов

**Библиографический список**

1. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах: учебник / С.М. Дмитриев [и др.] / под ред. С.М. Дмитриева. – М.: Машиностроение, 2013.
2. **Большухин, М.А.** Актуальные вопросы развития экспериментальной базы данных для верификации CFD-программ при их использовании в атомной энергетике / М.А. Большухин [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – №2. – С. 117–125.
3. **Дмитриев, С.М.** Опыт проектирования крупномасштабного верификационного стенда по исследованию смешения неизотермических потоков в корпусе водо-водяного реактора / С.М. Дмитриев [и др.] // 21-я Нижегородская сессия молодых ученых. – 2016. – С. 110–112.
4. **Баринов, А.А.** Особенности применения пространственных кондуктометрических датчиков при моделировании смешения потоков теплоносителя в элементах оборудования ядерных энергетических установок / А.А. Баринов [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7. – №3.

*Дата поступления  
в редакцию 26.04.2017*

**A.A. Barinov<sup>1</sup>, A.V. Varentsov<sup>1</sup>, V.G. Glavny<sup>2</sup>, S.M. Dmitriev<sup>1</sup>, M.A. Legchanov<sup>1</sup>,  
A.V. Ryazanov<sup>1</sup>, A.E. Khrobostov<sup>1</sup>**

**IMPLEMENTATION OF THE METHOD OF SPATIAL CONDUCTOMETRY  
FOR EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE PROCESSES  
OF MIXING INTRA-REACTOR FLOWS IN MODERN NUCLEAR UNITS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeyev<sup>1</sup>,  
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences Institute of Thermophysics n.a. S.S. Kutateladze<sup>2</sup>

**Purpose:** Adaptation of the spatial conductometry method for working in the system with specific geometry (water-cooled reactor)

**Method of work:** The choice of the conductometric sensors configuration (grid and core structure) has been based on the characteristic geometry of the PWR model with considering subsequent calibration of the system.

**Results:** Calibration of the measuring system was carried out with subsequent transfer the values of conversion coefficients to the WMS\_Pro complex. Experience of working with spatial conductometers let us shape the principles of research into main equipment of nuclear power plants on large-scale models.

**Conclusions:** This work makes possible to use the method of spatial conductometry for studying turbulent structures in the large-scale modeling of mixing intra-reactor flows.

*Key words:* nuclear reactor, spatial conductometry, CFD, mixing intra-reactor flows.