

УДК 621

А.А. Баринов, В.Е. Бородина, С.М. Дмитриев, Е.Д. Игнатов,
А.А. Табекин, А.Е. Хробостов

ВНЕДРЕНИЕ МЕТОДА МАТРИЧНОЙ КОНДУКТОМЕТРИИ В ИССЛЕДОВАНИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТЕЧЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ОБОРУДОВАНИИ ЯЭУ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлено описание метода матричной кондуктометрии, разработан и введен в эксплуатацию экспериментальный стенд по изучению гидродинамических процессов с помощью сетчатого датчика, выявлены параметры функционирования измерительной системы, представлена методология исследования, приведен перечень планируемых экспериментов.

Ключевые слова: ядерный реактор, гидродинамика, теплообмен, кондуктометрия, сетчатый датчик.

Введение

Одной из основных задач атомного машиностроения является обеспечение надежности и безопасности ЯЭУ. Решение данной проблемы реализуется применением комплекса мер, направленных на обоснование теплотехнической надежности оборудования АЭС, а также на тщательное исследование всех процессов и явлений, происходящих в нем. С другой стороны, конструкция элементов реакторной установки, отвечающих за отвод тепла, должна быть выбрана с учетом специфики гидродинамических процессов при течении теплоносителя. Эти процессы определяют такие характеристики, как критический тепловой поток, коэффициенты теплоотдачи и другие, от значения которых зависит нормальное функционирование оборудования энергетической установки в различных эксплуатационных условиях. Поэтому обеспечение безопасности и надежности АЭС требует более детального изучения гидродинамических процессов в условиях реакторной геометрии.

Обоснование тех или иных конструктивных изменений в оборудовании ЯЭУ во многом базируется на теплогидравлическом расчете. Надежный теплогидравлический расчет активной зоны ядерного реактора требует проведения значительного комплекса экспериментальных исследований и развития новых методов расчета локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока в пучках стержней [1]. Всё это обуславливает 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 теплопереноса. В связи с этим в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева был разработан и введен в эксплуатацию научно-исследовательский стенд, целью которого является разработка и апробация методики проведения исследований с помощью сетчатого датчика.

Теоретические основы кондуктометрического метода исследования

В общем случае процессы теплообмена характеризуются изменением совокупности значений температуры или концентрации во всех точках изучаемого пространства в данный момент времени. Такое распределение принято называть полем. Аналитически темпера-

турное поле и поле концентрации можно представить в виде функции зависимости от координат точек пространства и времени.

$$T = T(x, y, z, \tau), \quad (1)$$

$$C = C(x, y, z, \tau). \quad (2)$$

В движущейся жидкости поле температуры, как и поле концентрации, зависит от поля скорости, которое описывается уравнениями гидродинамики. Поэтому решение задач конвективного массообмена сводится к решению системы дифференциальных уравнений: уравнения неразрывности, уравнения движения, уравнения диффузии.

При эмпирическом исследовании данных процессов удобно использовать двухкомпонентные среды, в которых изменение некоторого характерного параметра, вызванное конвективным и диффузионным обменами вещества, будет определять тепломассообмен. Такими характерными показателями могут выступать: температура, концентрация, электропроводимость.

Кондуктометрический метод с использованием сетчатого датчика основан на отслеживании динамики переноса и распространения электрически контрастного трассера. Он позволяет измерять поля концентраций электролитических сред в плоских областях различной геометрической конфигурации. Сетчатый зонд позволяет регистрировать пространственное распределение электрических параметров среды. В общем случае электропроводимость является комплексной величиной, состоящей из активной (вещественной) компоненты R^{-1} и емкостной (мнимой) компоненты $X = \omega C$, т.е. [2]

$$Y = R^{-1} + j\omega C. \quad (3)$$

Исходный сигнал поступает от генератора на датчик. Параметры и форма сигнала определяются выбранным режимом работы сетчатого зонда. При использовании датчика для измерения проводимости, где влияние емкостной составляющей пренебрежимо мало, предполагается использовать меандрический сигнал с частотой до 100 кГц. При исследовании двухфазных течений (типа вода-воздух), где влияние резистивной составляющей незначительно, схема должна измерять емкостную часть комплексной проводимости. В этом случае частота исходного синусоидального сигнала должна быть порядка единиц МГц.

Структурно сетчатый датчик состоит из двух групп электродов (рис. 1), которые находятся в параллельных плоскостях, разнесенных в пространстве и развернутых друг относительно друга на 90 град. Электроды совмещают две функции: измерение пространственного распределения электрических характеристик изучаемого потока жидкости и ввод получаемой информации в систему сбора данных [3]. Основными характеристиками датчика являются боковой шаг электродов и расстояние между слоями. Первая группа электродов – возбуждители (генераторы опорных сигналов), а вторая – приемники. Пространственное пересечение двух групп электродов образует измерительную область, состоящую из набора узлов, каждый из которых образован парой электродов генератор-приемник. Измерение параметров происходит в области зазора между двумя электродами, один из которых используется как источник напряжения, второй – приемник тока. То есть измерение проводимости жидкости между каждым пересечением двух электродов происходит независимо. На основе измеренного тока определяется электрический импеданс среды в пространстве между электродами. Определяемым параметром при использовании данного метода является удельная проводимость жидкости. Для получения картограммы перемешивания среды необходимо обеспечить разницу в электрической проводимости в объеме исследуемой жидкости. Это достигается добавлением трассера, электрические свойства которого отличаются от свойств основного потока.

Чтобы выполнить исследование процессов массопереноса с помощью сетчатого дат-

чика в условиях, близких к естественным условиям эксплуатации оборудования ЯЭУ, необходимо использовать в качестве трассера вещество, характеристики (кинематическая вязкость, плотность) которого слабо зависят от солесодержания в широком диапазоне температур [4]. Таким веществом является водный раствор соли NaCl.

Для снижения эффекта вынужденного электролиза на электродах сеточного зонда необходимо, чтобы уровень постоянного сигнала на электродах возбуждения не превышал значение электрохимического потенциала разложения электролита. Для раствора NaCl при выполнении этого условия ограничивает напряжение на электродах величиной 2,19 В [5]. При измерении принимаемый сигнал искажается из-за наличия емкости у проводов. Чтобы минимизировать этот эффект, измерения производятся тогда, когда завершится переходный процесс приема сигнала. По предварительным расчетам это время составляет около 0,06 мс.

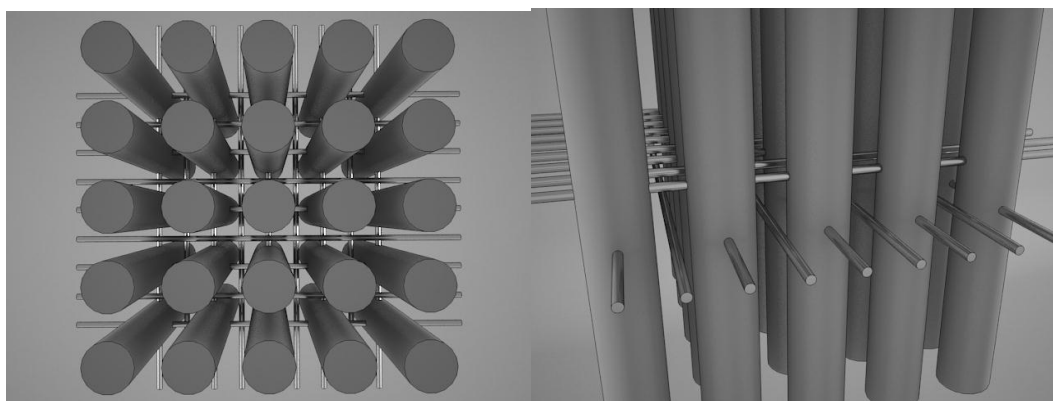


Рис. 1. Расположение сетчатого датчика в стержневом пучке

Ввиду наличия близкорасположенных электрически связанных электродов появляются «перекрестные» помехи. То есть электрическое поле от соседнего электрода оказывает влияние на результаты измерения у другого электрода. Это помехи приводят к размыванию сигнала. Чтобы это предотвратить, сетчатый датчик выполнен таким образом, что провода имеют значительно более низкий импеданс, чем жидкость между ними. В таком случае отсутствует высокая разность потенциалов между проводами, и «перекрестные» помехи эффективно компенсируются.

Автоматизированная система сбора и обработки сигналов замеряет уровень напряжения каждого узла датчика. Частота опроса выбирается с точки зрения нивелирования нежелательных физико-химических процессов, возникающих на поверхности струн датчика (образование газа), и оптимальности работы электрических компонентов. Также благодаря выбранной частоте достигается высокая плотность результатов, позволяющая наиболее точно описывать исследуемый процесс.

Полученные результаты уровня напряжения ячеек пересчитываются по соответствующим зависимостям в проводимость среды. Далее строится картограмма распределения концентрации соли в поперечном сечении потока. Её анализ позволяет сделать вывод о количественной и качественной интенсивности процессов массообмена в исследуемом стержневом пучке.

Описание экспериментального стенда

Экспериментальный стенд (рис. 2) для исследований процессов тепломассопереноса представляет собой два смежных разомкнутых гидравлических контура, через которые прокачивается специально-подготовленная вода. В состав экспериментального стенда входят: экспериментальная модель; сетчатый датчик; насосы; генератор измерительного сигнала; измерительный комплекс; блок управления.

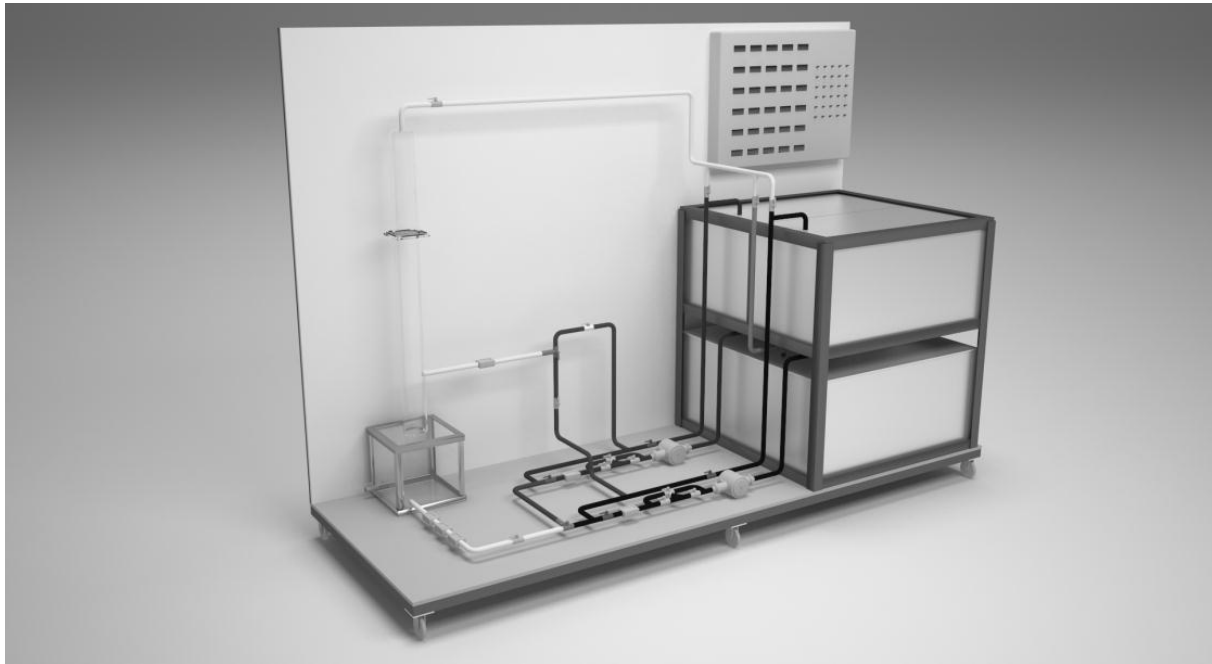


Рис. 2. Общий вид стенда

Схема стенда приведена на рис. 3. Экспериментальная модель представляет собой канал определенных геометрических параметров, которые выбраны с учетом выполнения условия геометрического подобия с реальными тепловыделяющими сборками ядерного реактора.

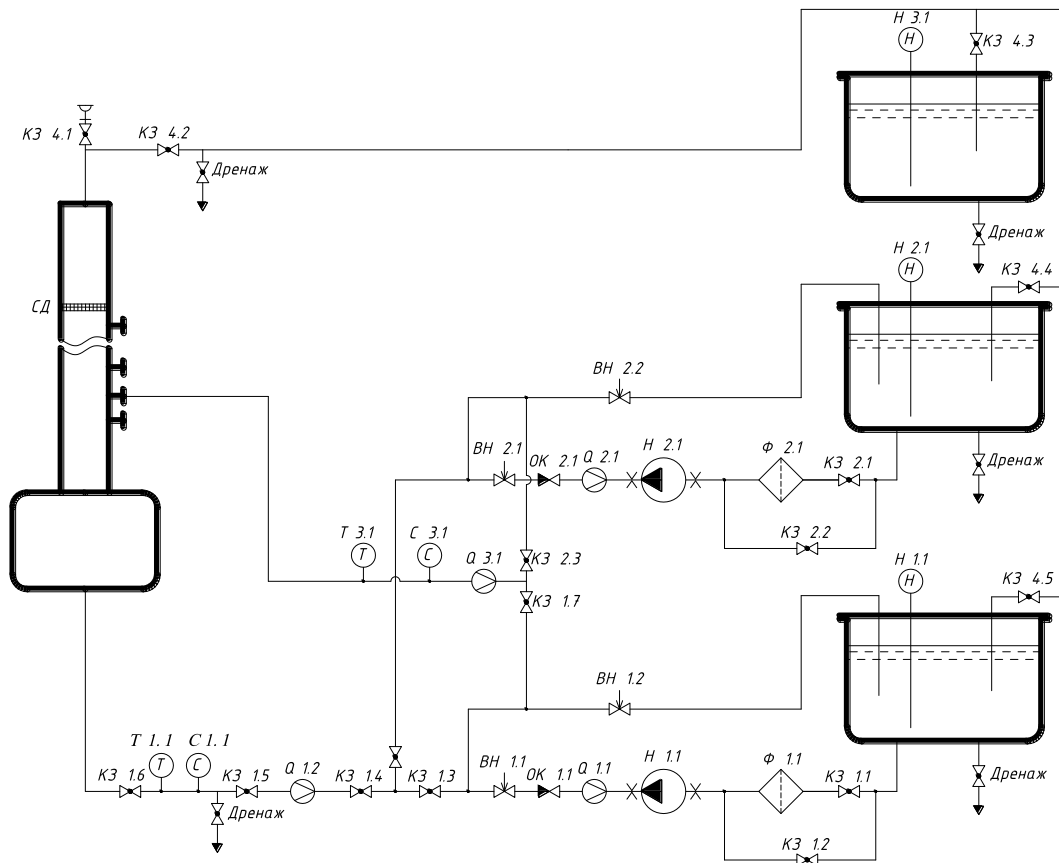


Рис. 3. Общая схема стенда

Модели имеют универсальные присоединительные фланцы, объединенные с трубными досками, в которых закрепляются стержни. Их конструкция позволяет вносить изменения в расположение и компоновку стержневого пучка. К настоящему моменту были созданы модели круглого и квадратного поперечного сечения (рис. 4).

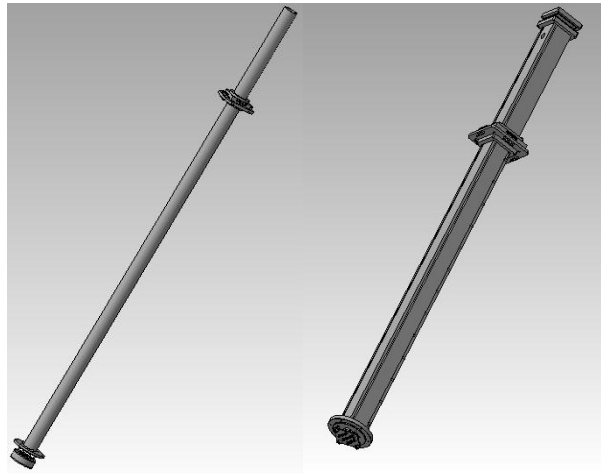


Рис. 4. Общий вид экспериментальных моделей

Конструкция датчика (рис. 5) позволяет изменять взаимное расстояние между слоями групп электродов. На нижнем фланце СД помещена система клемм для возможности оперативного подключения измерительной схемы к блоку обработки сигнала. Струны СД изготовлены из NiCr сплава, диаметр струн 0,5 мм, такой размер не вносит серьезных возмущений в поведение крупных структур в турбулентном потоке. В корпусе датчика предусмотрена система натяжения электродов, так как набегающий поток среды приводит к деформации струн, что искажает результаты.

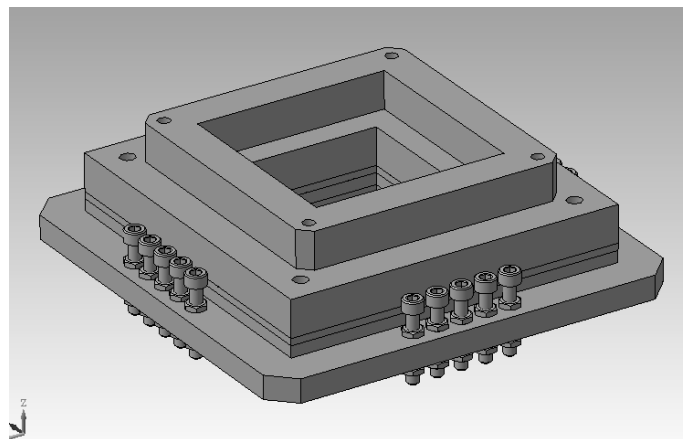


Рис. 5. Конструкция датчика

Циркуляция среды в контурах обеспечивается насосами, которые имеют ступенчатую регулировку частоты вращения ротора. В совокупности с регулировкой гидравлического сопротивления контура существует возможность изменять режим течения среды в модели в широких диапазонах чисел Рейнольдса. На циркуляционном трубопроводе закреплены технологические датчики, контролирующие параметры среды.

Генератор измерительного сигнала предназначен для подачи на ячейки датчика переменного напряжения заданной частоты и амплитуды. Схема генератора разработана с учетом необходимости усиления по току и стабильности амплитуды колебаний при различной мощ-

ности нагрузки (датчика). Возможности генератора позволяют изменять параметры подаваемого сигнала по амплитуде и частоте.

Для проведения экспериментальных исследований с использованием матричного зонда необходима электронная автоматизированная многоканальная система сбора и обработки сигналов.

Методики планируемых экспериментов

Процесс теплоотвода от твэлов активной зоны ядерного реактора определяется многими факторами [6]. В первую очередь к ним относятся локальные гидродинамические характеристики потока. Применение метода сетчатой диагностики, основанного на регистрации пространственного распределения комплексной проводимости жидкости, позволяет выполнить детальное исследование этих параметров.

В настоящий момент разработаны методики для исследования локальных характеристик потока. Перечислим планируемые эксперименты.

1. Исследование по изучению перемешивания потока в экспериментальной модели (ЭМ) на различных режимах течения среды.

После выбора режима течения среды согласно матрице испытаний, солевой трассер через впускной зонд, расположенный по направлению движения потока, подается в начальный участок ЭМ до сетчатого датчика. Далее производится замер концентрации трассера во всех исследуемых ячейках. По полученным данным строятся картограммы и графики зависимости распределения концентрации трассера от числа Рейнольдса.

2. Исследование по изучению перемешивания потока ЭМ при различных положениях впускного зонда.

Устанавливается положение впускного зонда по высоте ЭМ и режим течения среды согласно матрице испытаний. Солевой трассер через впускной зонд, расположенный по направлению движения потока, подается в ЭМ. Далее с помощью сетчатого датчика производится замер концентрации трассера во всех исследуемых ячейках. Устанавливается следующее положение впускного зонда по высоте ЭМ, и производятся соответствующие замеры для всей матрицы испытаний. По полученным данным строятся картограммы и графики зависимости распределения концентрации трассера от координаты впускного зонда.

3. Исследование по изучению осевого профиля скорости потока в ЭМ.

Устанавливается режим течения среды согласно матрице испытаний. Солевой трассер через впускной зонд равномерно подается в сечение ЭМ, расположенное на определенном расстоянии от сетчатого датчика. Далее с помощью сетчатого датчика производится замер концентрации трассера во всех исследуемых ячейках последовательно в течение определенного интервала времени. После этого прекращается подача солевого трассера. Устанавливается следующий режим течения среды, и производятся соответствующие замеры для всей матрицы испытаний. По полученным данным строится осевой профиль скорости потока.

Разработан комплекс мер, направленных на апробацию и представительность результатов, также оценена погрешность экспериментальных данных.

Заключение

Гидродинамические процессы, характеризующие движение теплоносителя, оказывают существенное влияние на функционирование оборудования ЯЭУ. Их детальное исследование с применением современных методов детектирования будет способствовать более корректной оценке работоспособности как отдельных элементов и систем, так и самого ядерного реактора в целом.

В настоящее время создан лабораторный стенд для отработки и апробации методик по использованию метода сетчатой кондуктометрии в исследовании процессов реакторной гидродинамики. Определены условия работы датчика, производится анализ физико-химических явлений, оказывающих влияние на работу измерительной системы в целом. Полученные ре-

зультаты будут являться базисом, на основе которого обеспечивается дальнейшее развитие данного метода исследований применительно к реальным условиям течения теплоносителя.

Использование матричного сетчатого датчика обеспечит высокую точность и наглядность экспериментальных данных, стенд планируется использовать в учебных целях для подготовки будущих специалистов в области атомной энергетики.

Библиографический список

1. Исследование массообмена теплоносителя за перемешивающими решетками ТВС реакторов ВБЭР-300 с целью обоснования их эффективности / С.М. Дмитриев [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2010. №3. С. 197–206.
2. **Графов, Б.М.** Электрохимические цепи переменного тока / Б.М. Графов, А.М. Укше. – М.: Наука, 1973. – 128 с.
3. **Prasser, H.-M.** Novel experimental measuring techniques required to provide data for CFD validation // Nuclear Engineering and Design. 2008. № 238. P.744-770.
4. **Kwak, G.** The effects of salt type and salinity on formation water viscosity and NMR response / H. Kwak, G. Zhang, S. Chen // International Symposium of the Society of Core Analyst. – Toronto, Canada, 2005.
5. Электрохимия / Ф. Миомандр [и др.]. – М.: Техносфера, 2008. – 360 с.
6. К вопросу о методологии обоснования теплотехнической надежности активных зон водяных энергетических реакторов / С.М. Дмитриев [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. №2. С. 98–108.

*Дата поступления
в редакцию 28.01.2015*

**A.A. Barinov, V.E. Borodina, S.M. Dmitriev, E.D. Ignatov, A.A. Tabekin,
A.E. Khrobostov**

IMPLEMENTATION THE METHOD OF MATRIX CONDUCTOMETRY IN STUDY HYDRODYNAMIC PROCESSES OF COOLANT FLOW IN EQUIPMENT NPS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Development of a method for research of hydrodynamic processes using a wire-mesh sensor.

Methodology/approach: Wire-mesh sensor enables to measure the concentration field of the salt solution in the flow, due to the difference of electric conductivity. The analysis of these distributions enables to make a conclusion about the intensity of heat exchange processes.

Originality/value: The technique enables to estimate more correctly the operability of the equipment of a nuclear reactor.

Key words: nuclear reactor, hydrodynamics, heat and mass transfer, conductometry, wire-mesh sensor.