

УДК 621.039

А.А. Баринов¹, С.М. Дмитриев¹, Е.Д. Игнатов¹, А.А. Табекин¹,
А.А. Хлюнев², А.Е. Хробостов¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ СРЕДЫ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА МАТРИЧНОЙ КОНДУКТОМЕТРИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ООО «ВЗОР»², г. Н. Новгород

Проведены экспериментальные исследования гидродинамических процессов течения среды в каналах с помощью метода матричной кондуктометрии. Выявлены оптимальные параметры работы измерительной схем. Получены основные гидродинамические характеристики турбулентного потока среды в канале круглого сечения. Проведен анализ полученных результатов на предмет применимости метода матричной кондуктометрии к исследованию гидродинамических процессов.

Ключевые слова: ядерный реактор, гидродинамика, турбулентные пульсации, кондуктометрия, сетчатый датчик.

Введение

Гидродинамические процессы, происходящие при движении теплоносителя, оказывают существенное влияние на работу оборудования ядерных энергетических установок. В этой связи возникает необходимость проведения комплекса экспериментальных исследований по выявлению закономерностей и особенностей течения среды в элементах ЯЭУ [1]. Ввиду сложности протекающих процессов подобные исследования требуют использования методов, обеспечивающих высокое пространственное и временное разрешение. Этим требованиям удовлетворяет метод матричной кондуктометрии. Отработку данного метода целесообразно выполнять на каналах простой геометрии ввиду наличия точных и представительных результатов предыдущих исследований.

Экспериментальный стенд

В НГТУ им. Р.Е. Алексеева был создан экспериментальный стенд для исследования теплообменных процессов в каналах различной формы, представляющий собой два независимых гидравлических контура, через которые прокачивается специально подготовленная вода. Основными элементами гидравлического контура являются: экспериментальная модель (ЭМ); сетчатый датчик; ресивер; насосы; питательные баки, дренажный бак, трубопроводы и арматура. В состав стенда также входят: измерительный комплекс; блок управления. Схема стенда приведена на рис. 1.

Принудительная циркуляция среды в обоих контурах обеспечивается вихревыми центробежными насосами. Значение максимального расхода по основному потоку выбрано из условия обеспечения турбулентного режима движения среды в модели. Для удаления механических загрязнений в каждой ветке трубопровода установлены фильтры грубой очистки.

Существует возможность организовать следующие режимы циркуляции:

- 1) циркуляция через модель со сливом в дренажный бак;
- 2) циркуляция через модель с возвратом в питательный бак запаса пресной воды;
- 3) циркуляция через модель с возвратом в питательный бак запаса соленой воды;
- 4) циркуляция с возвратом в питательные баки по байпасной ветке, минуя модель (режим используется в пуско-наладочных работах, при ремонте-обслуживании).

Расход среды в основном потоке контролируется с помощью крыльчатого расходомера.

ра, частота вращения которого однозначно связана с расходом среды. Регулировка и контроль расхода трассера осуществлялись с помощью малорасходного ротаметра с верхним пределом измерений 0,0025 л/ч.

Питательные баки расположены на определенной высоте для обеспечения необходимого геометрического подпора насосов.

Контроль параметров сред основного потока и трассера осуществлялся с помощью двуканального кондуктометра, позволяющего одновременно измерять проводимость и температуру. Измерительные датчики закреплены на трубопроводе вблизи от места подачи сред в экспериментальную модель.

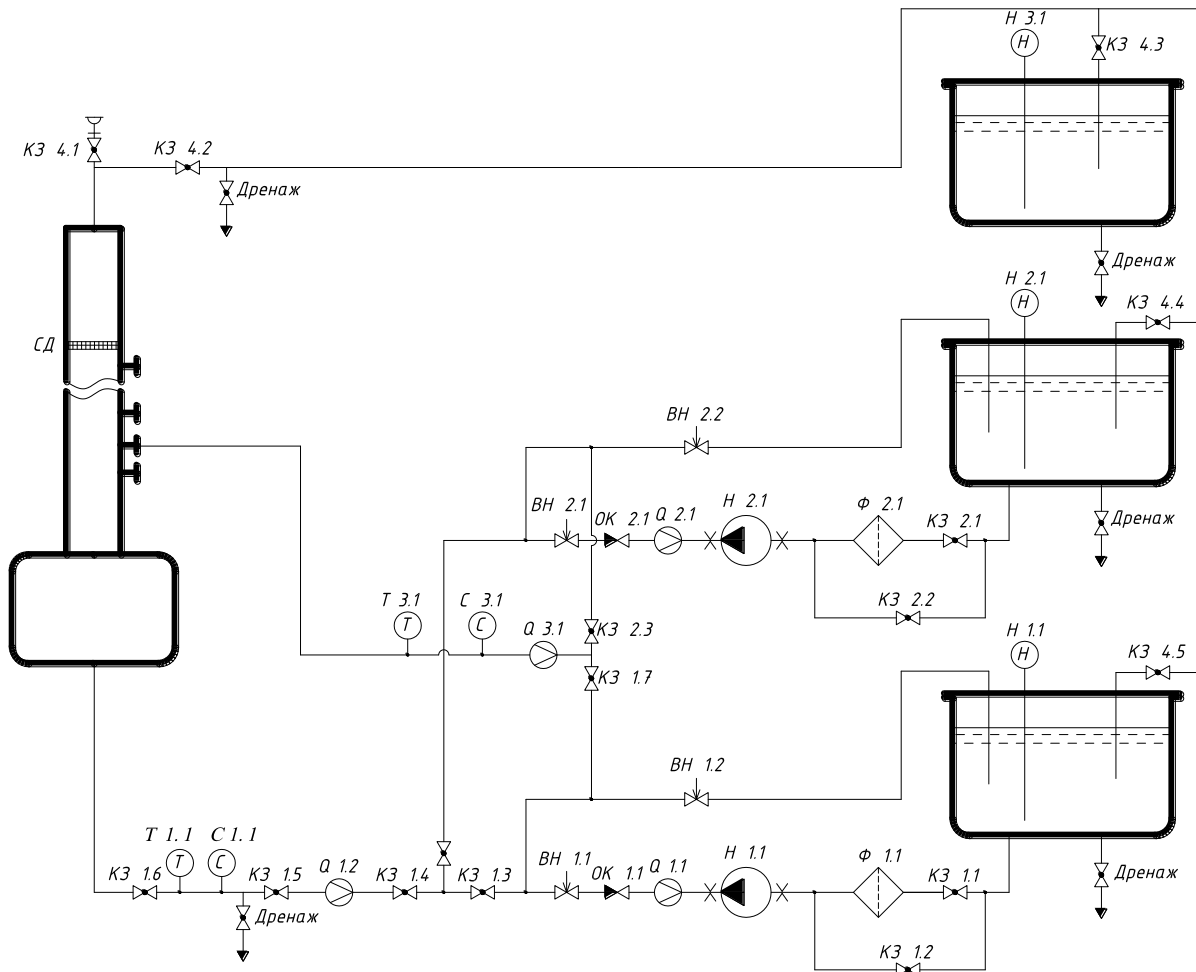


Рис. 1. Гидравлическая схема стенда

Экспериментальная модель представляет собой канал круглого поперечного сечения, с внутренним диаметром 60 мм. Длина модели выбрана с учетом протяженности участка гидродинамической стабилизации потока. Предусмотрена возможность подачи трассера на различных расстояниях от плоскости сетчатого датчика. Крепление модели к ресиверу и сетчатому датчику осуществляется с помощью фланцевого соединения с резиновым уплотнением. В верхней крышки модели предусмотрен штуцер воздухоудаления.

Сетчатый датчик состоит из двух групп проволочных электродов, лежащих в параллельных плоскостях. Слои электродов разнесены на определенное расстояние и повернуты друг относительно друга на угол 90° . Первая группа проволочных электродов является возбудителями (генераторами опорных сигналов), а вторая – приемниками сигнала. Область, расположенная между генерирующим и приемным электродом в месте их видимого пересечения, образует электрохимическую ячейку. Электрические параметры этой ячейки зависят от таких факторов, как: материал проволочных электродов, геометрия ячейки, характери-

ки заполняющей ячейку среды и параметры измерительного сигнала. Измерительная область сетчатого датчика формируется совокупностью электрохимических ячеек, образованных парой электродов генератор-приемник. Изображение датчика приведено на рис. 2.

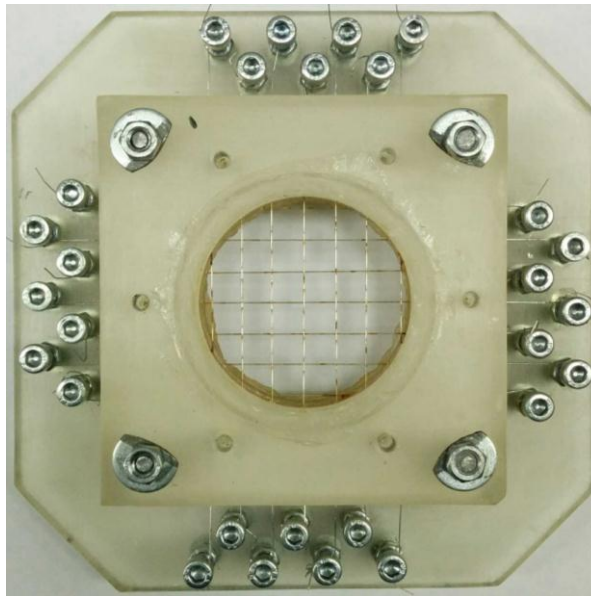


Рис. 2. Сетчатый датчик

При эмпирическом исследовании гидродинамических процессов удобно использовать двухкомпонентные среды, в которых изменение некоторого характерного параметра, вызванное конвективным и диффузионным обменами вещества, будет определять тепломассообмен. Таким характерным показателем может выступать температура, концентрация, электропроводность [2].

Работа сетчатого датчика связана с измерением электрических параметров среды, а именно, составляющих полной комплексной проводимости. Эквивалентную схему замещения измерительной ячейки можно представить в виде параллельно соединенных емкости и сопротивления (рис. 3).

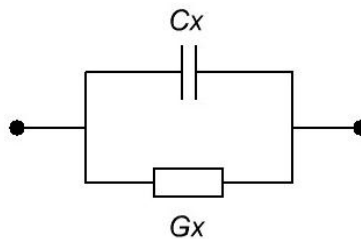


Рис. 3. Эквивалентная схема замещения

При исследовании однофазного потока определяемой величиной является удельная электрическая проводимость λ , которая однозначно связана с солесодержанием в среде, заполняющей ячейку датчика. При этом используется измерительный сигнал частотой порядка десятков кГц, что делает вклад емкостной составляющей проводимости пренебрежимо малым. Проводимость ячейки в таком случае целиком определяется активной составляющей, связанной с удельной электрической проводимостью среды представленным соотношением.

$$G_x = \lambda / k_r, \quad (1)$$

где k_r [1/см] – геометрический фактор ячейки.

Измеряемой величиной являлся уровень напряжения сигнала, снимаемого с приемных электродов сетчатого датчика, который затем пересчитывался в удельную электрическую проводимость среды. Стоит отметить, 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 пересчета измеренных значений напряжения в удельную проводимость среды для каждой измерительной ячейки.

В состав измерительного комплекса входят генератор измерительного сигнала, универсальный блок коммутации и измерений Agilent 34980A, осциллограф, плата нормирующих преобразователей, ЭВМ с программным обеспечением.

Использовался синусоидальный измерительный сигнал частотой 40 кГц, амплитудой 1 В. Данные параметры являются оптимальными с точки зрения работы измерительной системы. Контроль значений параметров измерительного сигнала осуществлялся с помощью осциллографа.

В состав Agilent 34980A входит базовый блок с 8 гнездами для установки сменных измерительных или коммутационных модулей, встроенный 6,5 разрядный мультиметр, позволяющий выполнять 11 видов измерений со скоростью до 2000 отсчетов в секунду. Одновременно в Agilent 34980A может быть установлено до 8 различных сменных модулей, каждый из которых может быть индивидуально сконфигурирован. Кроме того, существует возможность индивидуального конфигурирования каждого канала в пределах измерительного модуля. Взаимодействие блока измерения с ЭВМ осуществлялось с помощью стандартного интерфейса Ethernet.

Плата нормирующих преобразователей предназначена для согласования работы датчика с блоком коммутации и измерений. Архитектура платы выполнена на основе операционных усилителей.

Разработанный программный комплекс «Кондуктометрия» представляет собой компьютерный интерфейс для управления и постоянного мониторинга данных, получаемых с сетчатого датчика. В программном комплексе реализованы возможности построения распределения измеряемого сигнала, записи значений в файл, построение энергетических спектров, расчет автокорреляционных функций.

Методика исследований

Метод матричной кондуктометрии основан на отслеживании динамики переноса и распространения электрически контрастного трассера. В качестве трассера используется водный раствор соли NaCl, его кинематическая вязкость и плотность слабо зависят от соледержания в широком диапазоне температур. Этот факт дает возможность считать влияние эффекта плавучести пренебрежимо малым, что положительно сказывается на точности результатов.

Сильное размытие среды в поперечном сечении турбулентного потока обуславливает необходимость использования высокопроводящих растворов в качестве трассера [3]. Из условий обеспечения необходимой чувствительности измерительной системы были выбраны следующие значения удельной электрической проводимости сред: для основного потока – 450 мкСм/см; для трассера – 20 000 мкСм/см.

Методика проведения исследований гидродинамических процессов течения среды заключалась в следующем: солевой трассер через инъекционный капилляр изокинетически подавался в центр канала соосно направлению потока. С помощью сетчатого датчика проводился замер уровня напряжения в каждой измерительной ячейке в характерных сечениях (рис.4) по длине экспериментальной модели.

В качестве величины, характеризующей концентрацию среды-трассера в ячейках датчика, удобно использовать безразмерную относительную концентрацию - измерительный скаляр $\varphi_{i,j}$ [4]:

$$\varphi_{i,j} = \frac{U_{i,j} - U_{\text{фон}i,j}}{\frac{\lambda_{\text{трассер}}}{\lambda_{\text{опорн}}} * U_{\text{опорн}i,j} - U_{\text{фон}i,j}} \quad (2)$$

где $U_{i,j}$ – измеряемый сигнал ячейки i, j ; $U_{\text{фон}i,j}$ – сигнал, снимаемый с ячейки датчика, за-

полненного средой основного потока с некоторым балансным (фоновым) солесодержанием; $\lambda_{\text{трассер}}$ – удельная проводимость трассера; $\lambda_{\text{опорн}}$ – удельная проводимость калибровочного (опорного) раствора; $U_{\text{опорн},j}$ – сигнал, снимаемый с ячейки датчика, заполненного калибровочным раствором. В результате калибровки находятся значения; $U_{\text{опорн},j}$ для всех ячеек датчика.

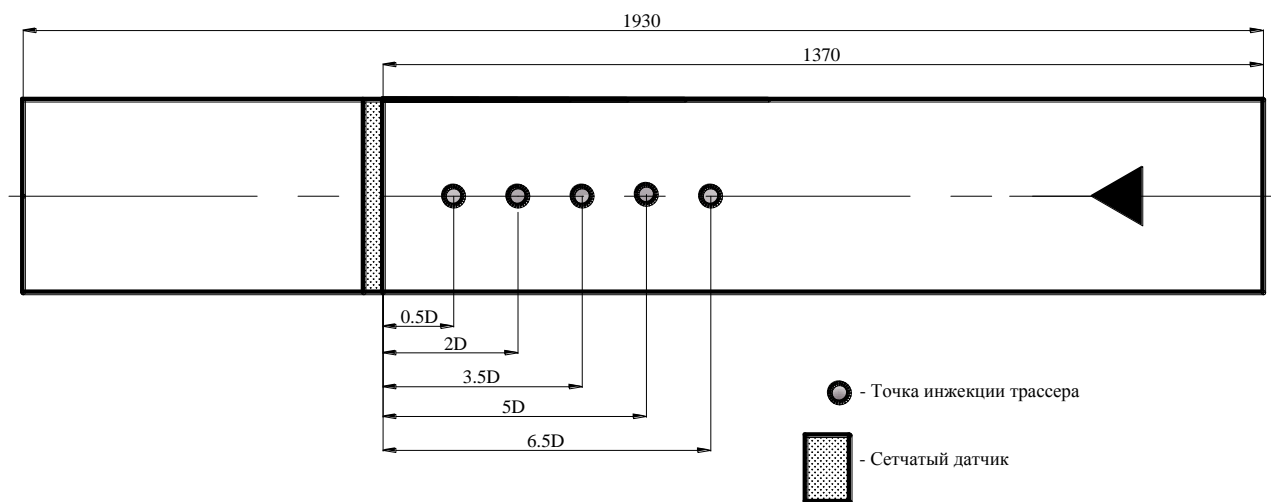


Рис. 4. Продольное сечение ЭМ

На основе полученных данных строились картограммы и графики зависимости радиального распределения концентрации трассера от координаты впускного зонда.

Турбулентное движение жидкости сопровождается возникновением неупорядоченных турбулентных структур – вихрей. Такого рода процессы наиболее эффективно описываются статистически. Важнейшими статистическими характеристиками турбулентности являются средние масштабы вихревых структур и интенсивность турбулентных пульсаций [5]. Для их определения использовался частотно-энергетический спектр пульсаций, который был построен на основе колебаний значений концентрации трассера. С целью определения характерных размеров вихрей, полученные значения энергетического спектра умножались на соответствующие значения волновых чисел.

Результаты исследования гидродинамических процессов течения среды

На основе анализа экспериментальных данных были получены следующие результаты:

1. Определена зависимость измерительного скаляра от времени (рис. 5) для центральной ячейки датчика (расстояние от инъекционного капилляра до сечения датчика $3,5D$).

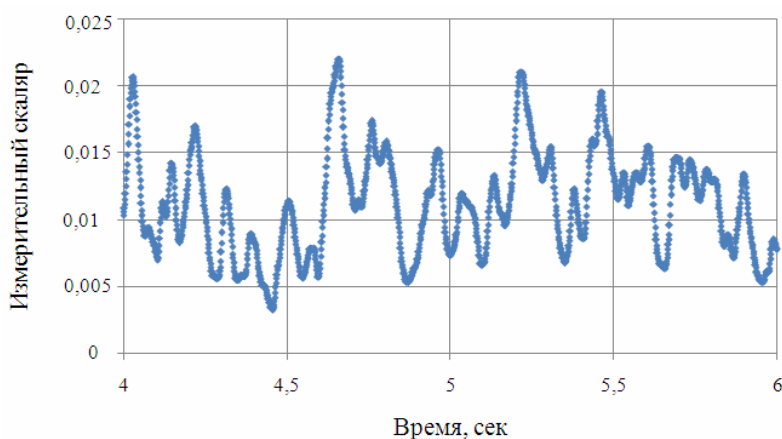


Рис. 5. Зависимость измерительного скаляра от времени

Из полученных зависимостей определялись средние по времени значения, а также пульсационные составляющие измерительного скаляра для каждой ячейки сетчатого датчика. Усредненные значения использовались для построения распределения измерительного скаляра, а на основе пульсационных составляющих строился частотно-энергетический спектр.

2. Получено распределение измерительного скаляра по сечению ЭМ при различных положениях инжекционного капилляра (рис. 6).

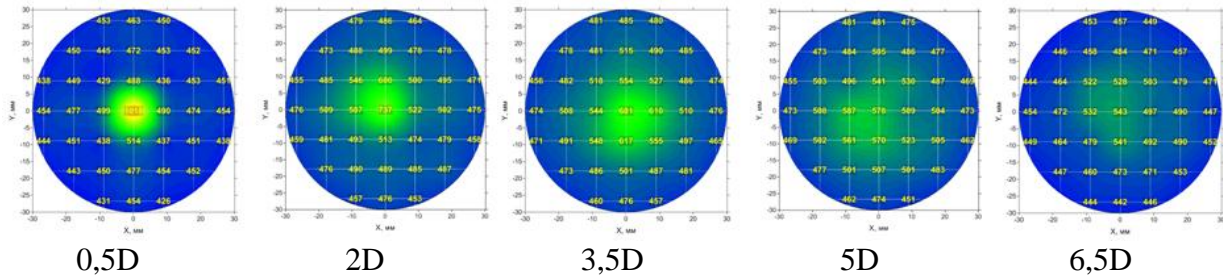


Рис. 6. Картограммы распределения измерительного скаляра по сечению ЭМ

Наблюдается характерное для турбулентного потока размытие трассера с увеличением расстояния от точки подачи.

3. Построены графики радиальной дисперсии трассера для характерных сечений ЭМ (рис.7). Наилучшим образом полученные результаты аппроксимируются кривой, близкой по форме к графику функции Гаусса вида:

$$\varphi(r) = A * e^{\frac{-r^2}{2\sigma^2}} + B, \quad (3)$$

где φ – безразмерный измерительный скаляр, r – относительное расстояние, A, B – коэффициенты, значения которых зависят от условий эксперимента.

Форма графика согласуется с теорией Тейлора, согласно которой распределение частиц трассера в турбулентном потоке подчиняется модели «случайного блуждания» [6].

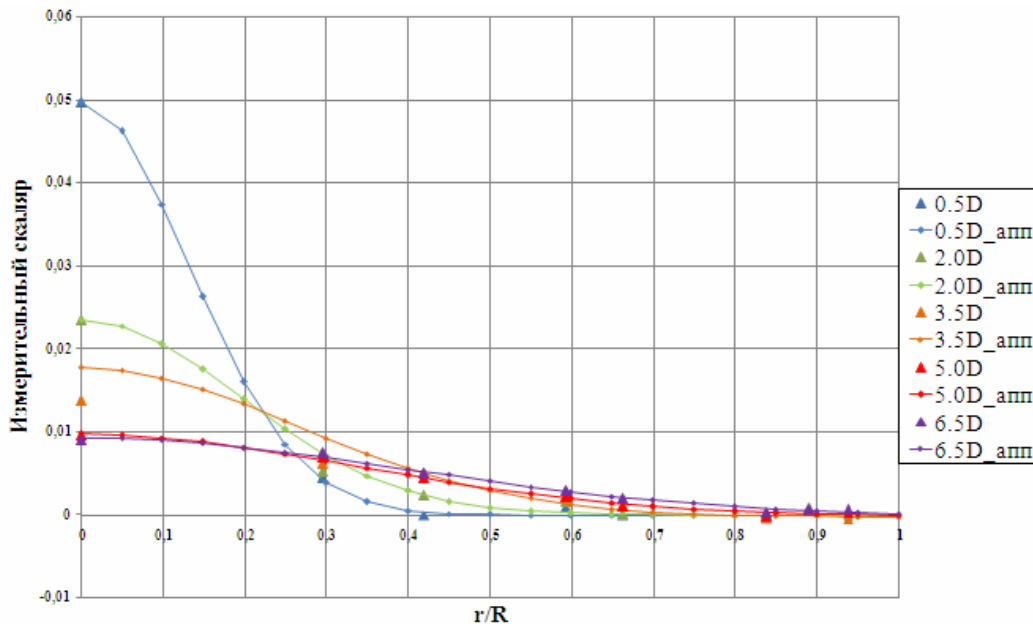


Рис. 7. Радиальная дисперсия трассера для характерных сечений ЭМ

4. В области центральной ячейки происходит снижение концентрации трассера с увеличением расстояния от места подачи до плоскости датчика. В периферийных ячейках наблюдается, соответственно, увеличение концентрации трассера (рис. 8).

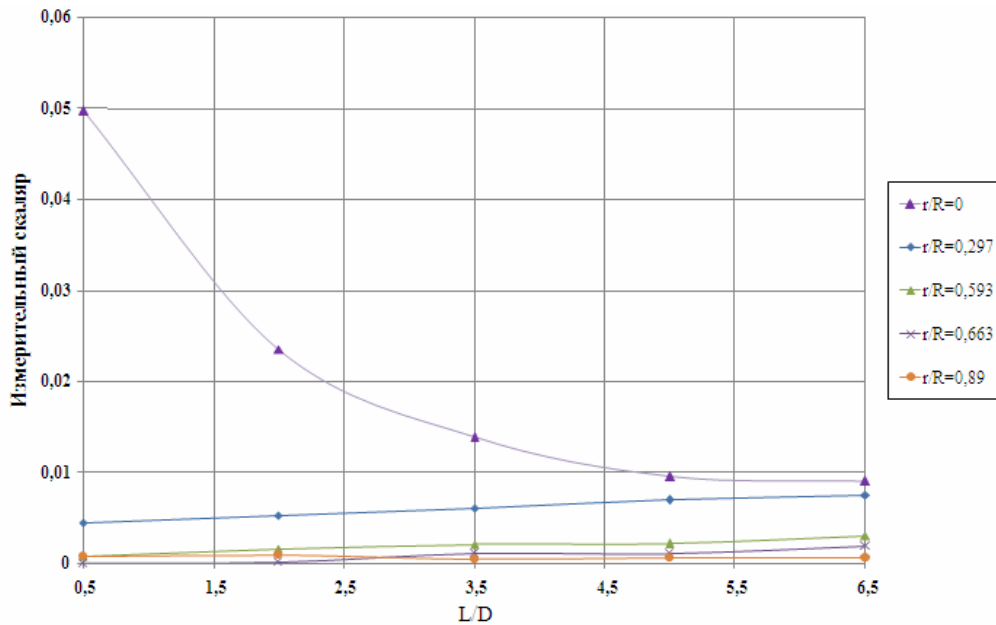


Рис. 8. Распределение безразмерной концентрации трассера по длине модели

4. Построен частотно-энергетический спектр пульсаций трассера (рис. 9) в центральной измерительной ячейке. Анализ графика позволяет выделить диапазон волновых чисел основных энергонесущих вихрей: $k = 20 \dots 75 \text{ м}^{-1}$ (что соответствует характерным размерам 13-50 мм). Полученная оценка размера крупных вихрей в потоке соответствует диаметру гидравлического канала. Частота основных энергосодержащих вихрей находится в диапазоне от 3 до 10 Гц.

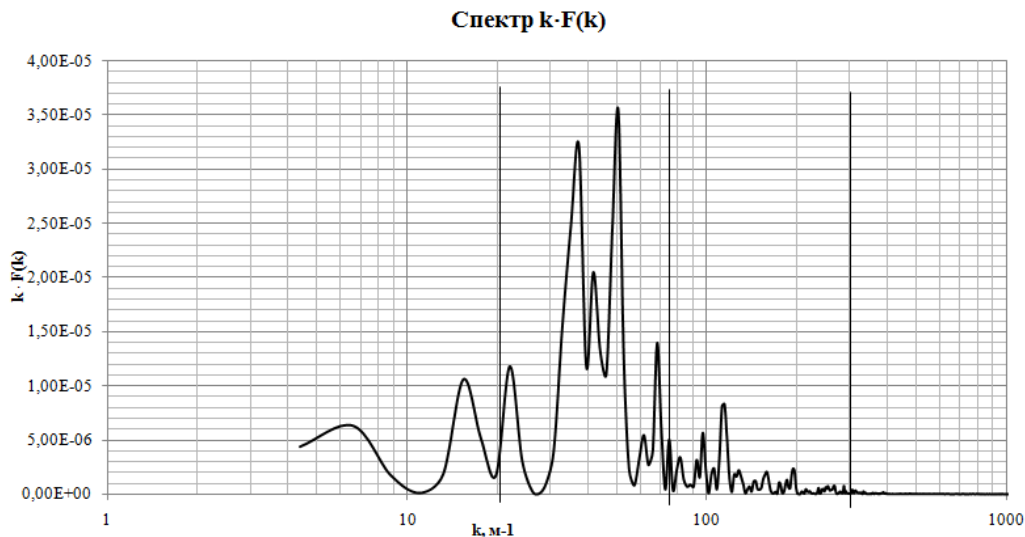


Рис. 9. Частотно-энергетический спектр (центральная ячейка, сечение 5D, $Re=10000$)

Выводы

Использование метода матричной кондуктометрии для исследования гидродинамических процессов движения потока жидкости позволяет получить результаты с высоким пространственным и временным разрешением.

В ходе исследований был доработан лабораторный стенд, установлены оптимальные условия и параметры работы измерительной схемы, оптимизирована конструкция сетчатого

датчика. Определено наиболее благоприятное, с точки зрения необходимой чувствительности, соотношение между проводимостью пресной воды и раствора.

На основе комплексного анализа экспериментальных данных по исследованию гидродинамических процессов течения среды сделаны следующие выводы:

1. Радиальная дисперсия трассера при турбулентном движении среды имеет вид функции Гаусса.

2. В области центральной ячейки происходит снижение концентрации трассера с увеличением расстояния от места подачи до плоскости датчика, в периферийных ячейках наблюдается обратный процесс.

3. Диапазон линейных масштабов основных энергонесущих вихрей составляет от 13 до 50 мм.

4. Частоты основных энергосодержащих вихрей заключены в диапазоне от 3 до 10 Гц.

Полученные результаты по исследованию гидродинамических процессов течения среды хорошо коррелируют с известными теоретическими зависимостями для канала круглого сечения.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от 3 декабря 2014 г. (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Библиографический список

1. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах: учебник / С.М. Дмитриев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2013. – 540 с.
2. **Баринов, А.А.** Внедрение метода матричной кондуктометрии в исследование гидродинамических процессов течения теплоносителя в оборудовании ЯЭУ / А.А. Баринов [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2015. №1. С. 139–145.
3. **Ylonen, A.T.** High-resolution flow structure measurements in a rod bundle / A.T. YLONEN. - Lappeenranta University of Technology, 173, 2013.
4. **Bulk, F.P.** An Experimental Study on Cross-Flow Mixing in a Rod-Bundle Geometry using a Wire-Mesh/ F.P. Bulk. - Delft University of Technology, 77, 2012.
5. Руслые процессы и динамика речных потоков на урбанизированных территориях / В.С. Боровков. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 286 с.
6. **Taylor, G.** The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe / G. Taylor. - Proceedings of the Royal Society of London, 223:446–468, 1954.

*Дата поступления
в редакцию: 29.04.2015*

**A.A. Barinov¹, S.M. Dmitriev¹, E.D. Ignatov¹, A.A. Tabekin¹,
A.A. Hljunev², A.E. Khrobostov¹**

RESEARCH OF HYDRODYNAMIC PROCESSES IN TURBULENT FLOW USING THE METHOD OF MATRIX CONDUCTOMETRY

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
LLC «Vzor»², Nizhny Novgorod

Purpose: Use of the method of the matrix conductometry for studying of hydrodynamic processes.

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 method of a matrix conductometry allows to conduct researches with high spatial and time resolution.

Key words: nuclear reactor, hydrodynamics, turbulent pulsations, conductometry, wire-mesh sensor.