

УДК 621.039

А.Е. Хробостов, М.А. Легчанов, Д.Н. Солнцев, А.А. Баринов,
И.А. Коновалов, А.А. Чесноков, М.А. Макаров

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ ДЛЯ ВАЛИДАЦИИ РАСЧЕТНЫХ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБОРУДОВАНИИ ЯЭУ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проведена серия экспериментов, направленных на отработку методики исследования смешения в стратифицированном потоке теплоносителя. Эксперименты проводились при использовании солевого трассера и кондуктометрической измерительной системы. Обработка экспериментальных данных позволила получить динамические оценки реализаций сигналов, позволяющие судить о характерных масштабах вихрей в зоне смешения для диапазона чисел Re от 10^3 до $15 \cdot 10^3$.

Ключевые слова: гидродинамика, пространственная кондуктометрия, процессы смешения потоков в ЯЭУ.

Введение

Обеспечение надежности и безопасности современных реакторных установок (РУ) является одной из приоритетных задач атомного машиностроения. Проведение крупномасштабных натурных экспериментов для обоснования безопасности РУ требует колоссальных ресурсных и временных затрат, а в ряде случаев практически нереализуемо. Благодаря высокому уровню развития компьютерных технологий, широкое распространение получили расчеты сложных процессов в оборудовании, частично заменяющие проведение дорогостоящих экспериментов. Вычислительная гидродинамика (computational fluid dynamics, CFD) является одним из современных инструментов расчетного обоснования конструкции. Однако, чтобы применять CFD-коды для задач обоснования безопасности элементов ЯЭУ, необходимо подтверждать достоверность получаемых результатов расчетов. Существует определенный класс задач, характерный для атомной энергетики – процессы смешения неизотермических потоков, и одной из проблем, где эти процессы играют ключевую роль, являются термоциклические нагрузки на конструкционные материалы. Уточненный расчет температурных полей и их пульсаций в потоке является необходимой частью обоснования ресурса термоциклируемых элементов. CFD-коды позволяют детально моделировать процессы гидродинамики в условиях специфической геометрии. Вследствие этого, для верификации программ вычислительной гидродинамики представляется актуальной отработка метода исследования смешения потоков при стратифицированном течении на основе матричного кондуктометрического метода с использованием датчиков разрешением 8×8 точек, ввиду его точности, информативности и наглядности полученных результатов.

Экспериментальный стенд

Экспериментальное изучение гидродинамики стратифицированных потоков производилось на стенде, созданном в лаборатории «Реакторная гидродинамика» НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Общая схема стенда (рис. 1) предполагает организацию экспериментального режима с изотермическим смешением в разомкнутом контуре циркуляции (для иссле-

дований с использованием потоков с различной концентрацией примесей) и неизотермическим смешением при использовании потоков с различными температурами. Основными элементами стенда являются: насосы (Н); питательные баки (Б1, Б2); дренажный бак (ДБ); трубопроводы и арматура; экспериментальная модель (ЭМ); контрольно-измерительные приборы.

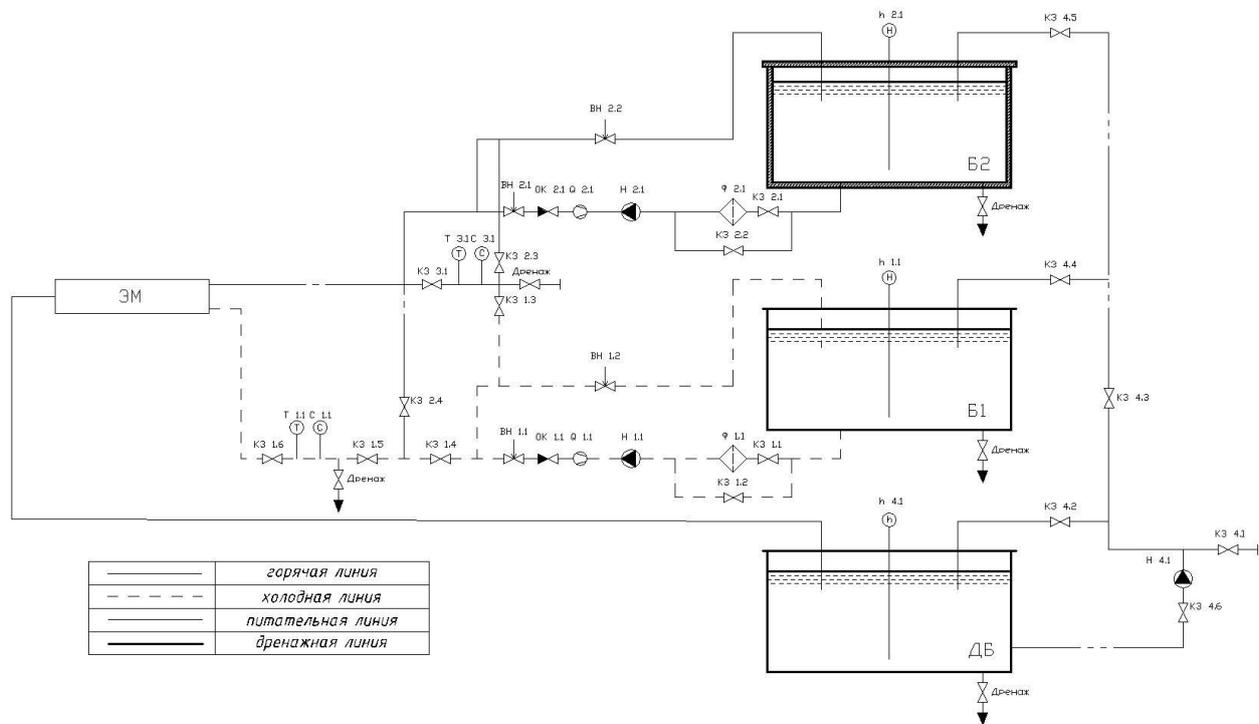


Рис. 1. Гидравлическая схема экспериментального стенда

Рабочая среда смешиваемых потоков поступает на всас насосов, прокачивается по подводящей трассе через экспериментальную модель и поступает в дренажный бак. Арматура подводящей трассы предполагает возможность поступления среды каждого бака, как в верхний, так и в нижний патрубки модели, либо поступление среды из одного бака в оба патрубка.

Оборудование стенда позволяет создать как ламинарные, так и турбулентные режимы (при числах Re от 10^3 до $15 \cdot 10^3$) течения при различной температуре, расходах и концентрации примесей в потоке теплоносителя. Основные характеристики стенда приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры экспериментального стенда

Параметр	Значение
Мощность нагревателей (суммарная), кВт	6
Расход через экспериментальную модель, м ³ /час	До 2,9
Температура смешиваемых потоков, °С	10 - 80

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 смещения потоков, разработанной совместно с Институтом теплофизики им. С.С. Кутагеладзе Сибирского отделения РАН (ЛАД-36) [1].

Исследования проводились при помощи метода кондуктометрии с использованием сетчатого датчика (СД) с разрешением 8×8 ячеек и шагом между центрами соседних ячеек 5 мм, что позволило повысить информативность экспериментальных данных [2]. Общий вид датчика представлен на рис. 2.

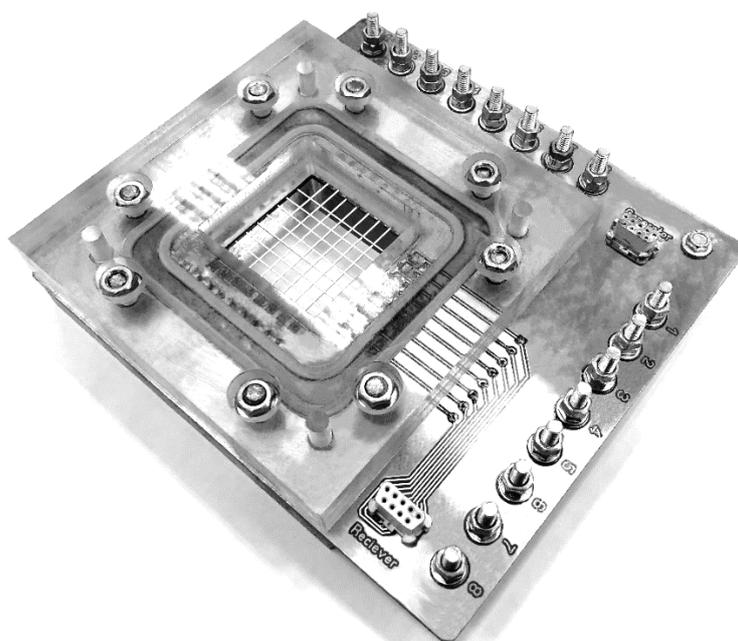


Рис. 2. Сетчатый кондуктометрический датчик

В использованной измерительной системе реализуется принцип частотного разделения сигналов.

В ходе измерения каждый генератор напряжения постоянно подключен к соответствующему электроду возбуждения СД (вертикально расположенные струны), при этом все генераторы настроены на различные точно заданные частоты. Синхронный опрос выходных сигналов приемных электродов (приемников), производимый многоканальным аналого-цифровым преобразователем ЛАД-36ММ, дает для каждого приемника (горизонтально расположенные струны) сумму разночастотных сигналов генераторов, взвешенных с учетом констант измерительной цепи и удельной электропроводности (УЭП) соответствующих кондуктометрических ячеек. Определенные в ходе калибровки константы можно считать постоянными, в то время как УЭП ячеек определяет уровень сигнала определенной частоты в каждый момент времени измерения. Полученные реализации сигналов на приемных электродах подвергаются частотному разделению с получением амплитудно-частотной характеристики в диапазоне рабочих частот. Далее определяются амплитуды сигналов, соответствующих известным частотам настройки генераторов, которые и используются для определения величины УЭП в каждой ячейке.

Описание проводимых экспериментов

Для проведения исследований и изучения процессов смешения была использована экспериментальная модель квадратного сечения 50x50 мм, на входных участках которой установлены хонейкомбы, предназначенные для получения ровного профиля скорости на входе в модель без крупных вихрей. Раздельное движение потоков во входных участках осуществляется при помощи разделительной перегородки, за которой начинается зона смешения спутных потоков. Также в модели предусмотрена возможность установки сетчатого датчика в двух зонах: сразу после входных участков (для контроля профиля УЭП на входе в модель) и в зоне интенсивного перемешивания, на расстоянии 650 мм от входных участков (рис. 3). Конструкция экспериментальной модели предусматривает применение проставок разной длины, что дает возможность установки датчика на различных расстояниях от входных участков.

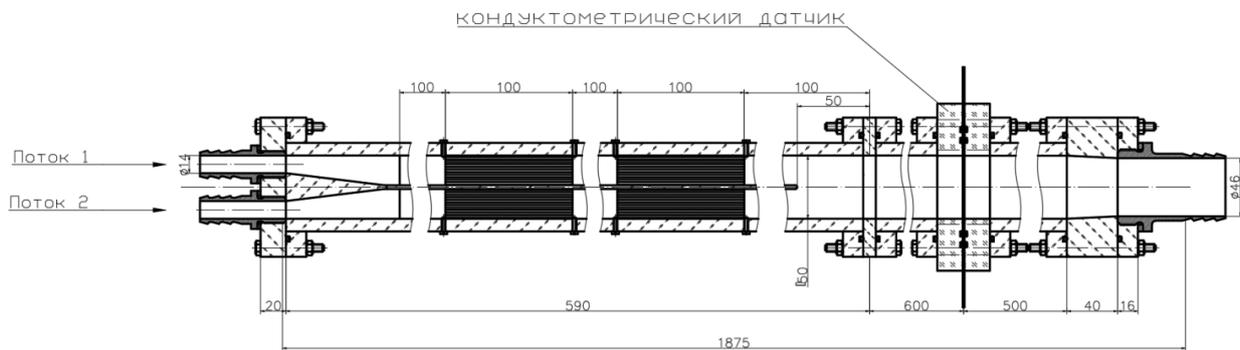


Рис. 3. Экспериментальная модель

Для организации стратифицированных потоков в экспериментальной модели применялись расходомеры повышенной точности, для каждого из которых была проведена индивидуальная градуировка [3]. Расход среды в экспериментах изменялся от 0,12 м³/час ($Re = 10^3$) до 2,9 м³/час ($Re = 15 \cdot 10^3$). Экспериментальные данные включают в себя режимные параметры, профиль относительных концентраций в зоне смешения, длительные нестационарные реализации кондуктометрического датчика. В качестве характерных выбраны точки на пересечении генератора 3 и приемников 1, 3, 4, 7. Параметры экспериментальных режимов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры экспериментальных режимов

Число Рейнольдса, $Re \cdot 10^{-3}$	Расход через экспериментальную модель, л/мин	УЭП, мкСм/см (температура, °С) потоков		Длительность реализации, с
		Пресный поток	Соленый поток	
1	2,4	480 (14,2)	943 (15,6)	20
3	9,8	498 (15,7)	841 (15,5)	180
5	17,0	481 (15,7)	837 (15,5)	180
10	32,8	635 (16,0)	1243 (16,1)	180
15	44,3	634 (16,0)	1238 (16,1)	120

Калибровка кондуктометрического датчика проводилась при равномерно распределенной солености в контуре. Режим с $Re = 10^3$ является ламинарным [4], и позволяет произвести оценку разрешающей способности кондуктометрического датчика, так как при данном режиме потоки являются строго стратифицированными и наблюдается четкая граница их раздела (рис. 4).

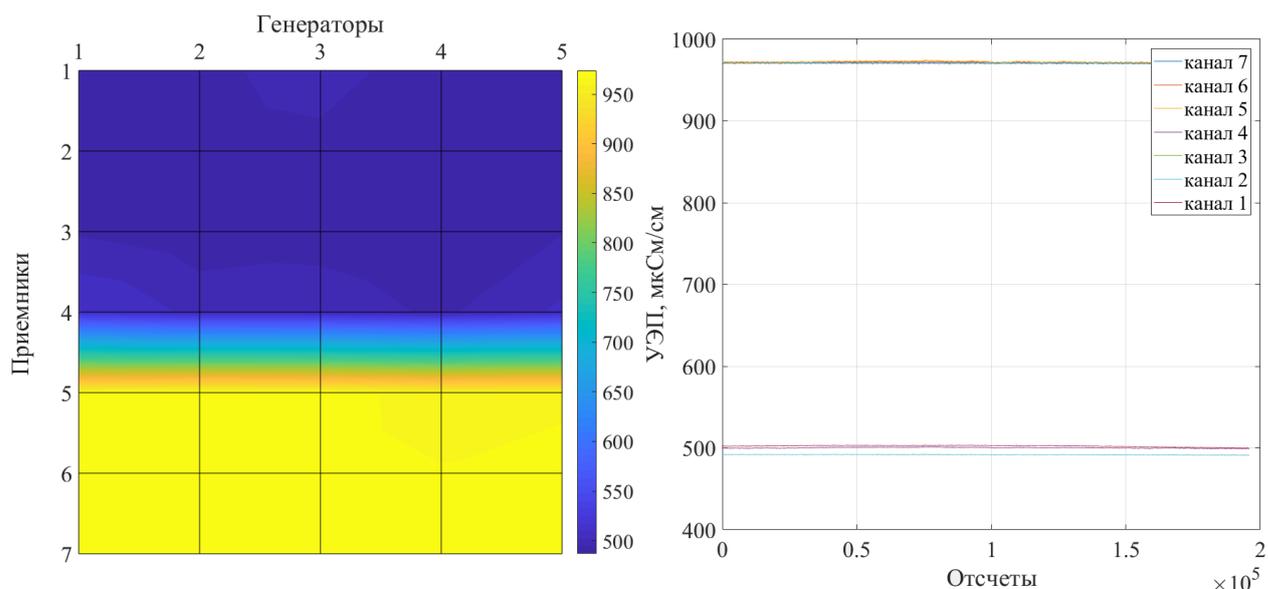


Рис. 4. Визуализация реализаций сетчатого датчика при $Re = 10^3$, шаг между ячейками 5 мм

В экспериментах были задействованы 5 генераторов и 7 приемников. Приемники 1 и 7 соответствуют крайним верхним и нижним ячейкам датчика, соответственно. В качестве характеристик исследуемого процесса смешения при анализе принимались:

- средние значения концентрации в измерительных ячейках датчика;
- дисперсии реализаций измерительного сигнала;
- графики спектральной плотности мощности, автокорреляционные функции и гистограммы распределения реализаций измерительного сигнала.

Нормировка полученных значений концентрации (для исключения общих систематических погрешностей и обеспечения сравнимости результатов) производилась в виде (1):

$$\phi = \frac{\lambda_{изм} - \lambda_{min}}{\lambda_{max} - \lambda_{min}} \quad (1)$$

где λ_{min} – удельная проводимость пресного потока (удельная проводимость в Б1),

λ_{max} – удельная проводимость соленого потока (удельная проводимость в Б2),

$\lambda_{изм}$ – удельная проводимость, измеренная данной ячейкой кондуктометрического датчика.

Математические ожидания и среднеквадратичные отклонения режимов сведены в табл. 3.

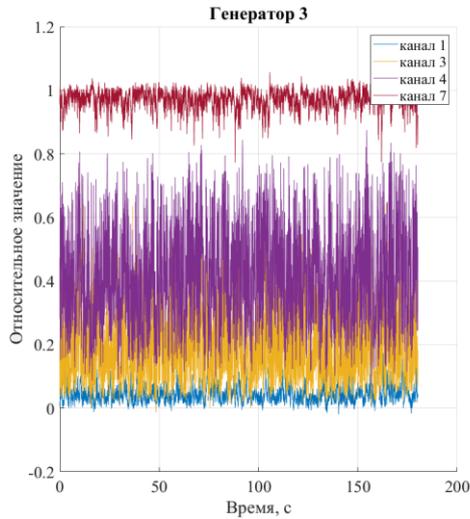
Таблица 3

Сводные статистические данные режимов

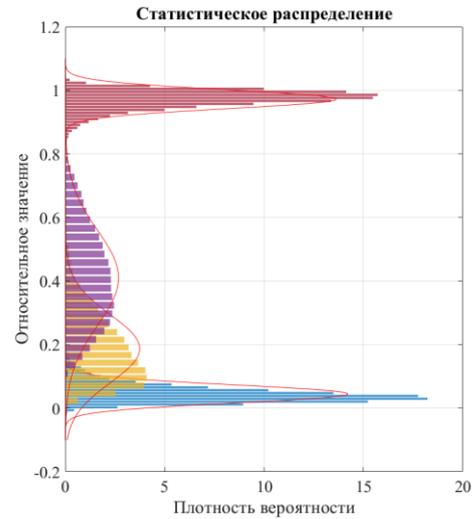
№ приемника	Математическое ожидание, M					Среднеквадратичное отклонение, σ			
	Число Рейнольдса, $Re \cdot 10^{-3}$					Число Рейнольдса, $Re \cdot 10^{-3}$			
	1	3	5	10	15	3	5	10	15
1	0,02	0,05	0,07	0,08	0,07	0,03	0,04	0,03	0,03
3	0,01	0,19	0,29	0,29	0,30	0,11	0,10	0,09	0,10
4	0,03	0,41	0,44	0,43	0,44	0,15	0,12	0,10	0,11
7	1,02	0,97	0,97	0,92	0,91	0,03	0,03	0,04	0,03

На рис. 5 представлены распределения плотности вероятности реализаций измерительного сигнала.

Относительная проводимость в характерных точках

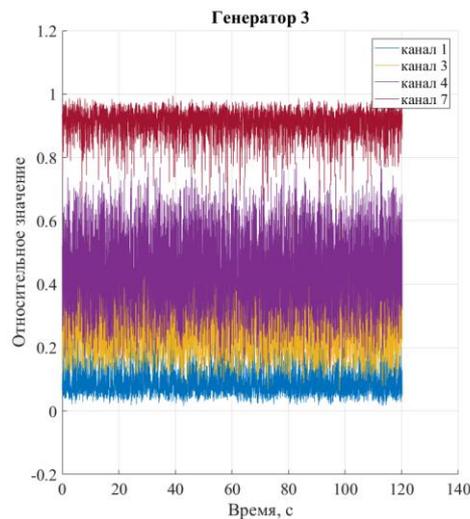


Распределение плотности вероятности в характерных точках

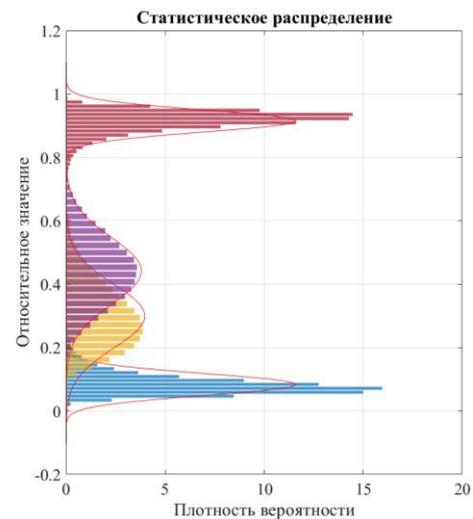


$Re = 3 \cdot 10^3$

Относительная проводимость в характерных точках



Распределение плотности вероятности в характерных точках



$Re = 15 \cdot 10^3$

Рис. 5. Распределение плотности вероятности в характерных точках

Как видно из приведенных выше статистических данных, для ламинарного режима $Re = 10^3$ имеет место систематическая положительная погрешность порядка 2 %, она распространяется на все режимы вплоть до $Re = 15 \cdot 10^3$ и может быть объяснена нагреванием потоков непосредственно в трассе от питательных баков до экспериментальной модели, и, как следствие этого, увеличением удельной электропроводимости проводимости среды.

В режимах с $Re = 10 \cdot 10^3$ и $Re = 15 \cdot 10^3$ наблюдается систематическое снижение проводимости в центре солёного потока и повышение проводимости в центре пресного потока, свидетельствующего о значительной интенсификации турбулентного перемешивания в этих режимах, которое вызывает падение концентрации соли в соленом потоке, и повышение ее в пресном. Нормированная автокорреляционная функция реализаций (рис. 6) может быть использована для вычисления интервала корреляции, как «времени жизни» наиболее крупных вихрей [5] (2):

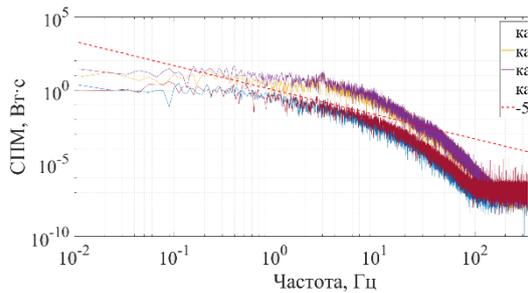
$$\tau_{cor} = \int_0^{\infty} |R(\tau)| d\tau \quad (2)$$

При этом величина, обратная интервалу корреляции, будет соответствовать характерной частоте наиболее крупных вихрей (3):

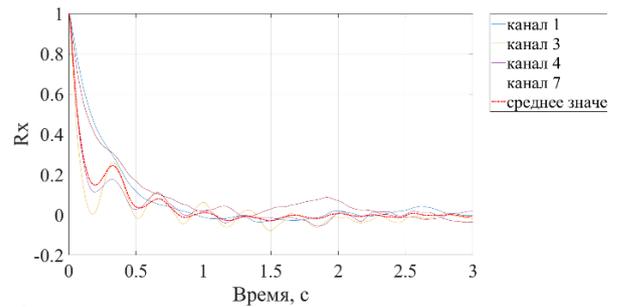
$$f = \frac{1}{\tau_{cor}} \quad (3)$$

Для получения оценок спектральной плотности мощности использовались нормированные центрированные реализации проводимостей в зоне смешения. Сравнительно большая длительность реализации (180 сек.) позволила провести осреднение данных оценок по методу модифицированной периодограммы Уэлча. На приведенных ниже графиках видно, что при низких числах Рейнольдса ($Re = 3 \cdot 10^3$) в центральных точках канала экспериментальной модели (канал 3 и 4) наблюдаются периодические пульсации, соответствующие пику на графике спектральной плотности мощности (СПМ), что объясняется наличием неустойчивости, подобной по характеру неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. При более высоких числах Рейнольдса ($Re = 15 \cdot 10^3$), вследствие воздействия сил инерции характерная частота неустойчивости «размывается» и пик на графике СПМ пропадает.

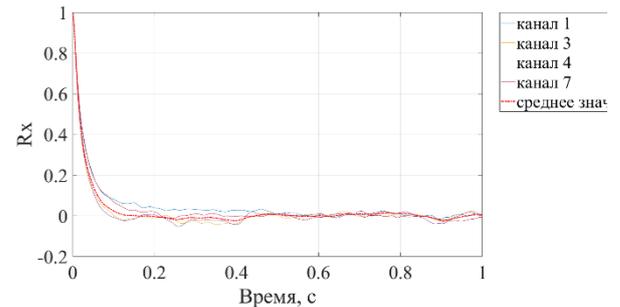
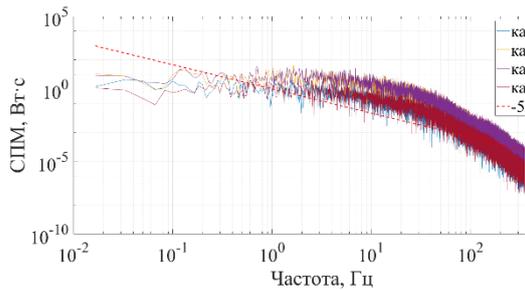
Спектральные плотности мощности в характерных точках



Автокорреляционные функции



$Re = 3 \cdot 10^3$



$Re = 15 \cdot 10^3$

Рис. 6. Оценки спектральной плотности мощности и автокорреляционные функции для $Re = 3 \cdot 10^3$ и $Re = 15 \cdot 10^3$ в характерных точках

Для наглядного представления результатов оценки спектральной плотности мощности, на рис. 7 представлен сводный график СПМ для режимов с $Re = 10^3$, $Re = 3 \cdot 10^3$, $Re = 15 \cdot 10^3$, полученный в результате обработки реализаций измерительного сигнала на пересечении генератора 3 и приемника 3.

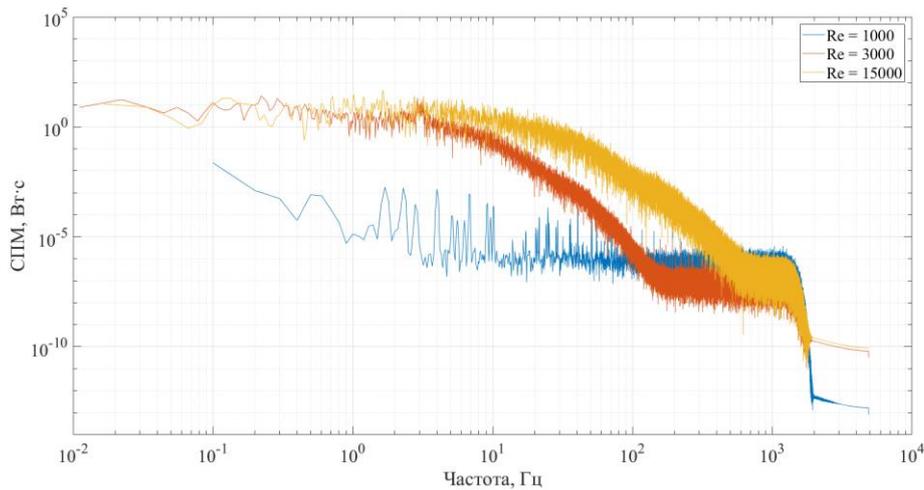


Рис. 7. Сводный график оценок спектральной плотности мощности для режимов с различными числами Рейнольдса

Результаты расчетно-экспериментальных исследований сведены в табл. 4.

Таблица 4

Сводная таблица аналитических параметров

Число Рейнольдса, $Re \cdot 10^{-3}$	Характерная частота вихрей f , Гц	Оценка характерной частоты по критерию Струхала $Sh \approx 0,2$, Гц	Период автокорреляции τ , с
3	0,39	0,25	2,51
5	0,58	0,45	1,74
10	0,91	0,88	1,27
15	1,22	1,18	0,82

Анализ результатов расчетно-экспериментальных исследований

В результате выполненных на данном этапе расчетных и экспериментальных исследований были построены осредненные поля концентрации в области смешения. Спектральный анализ сигналов датчиков позволил оценить диапазон частот основных энергонесущих вихрей и интенсивность каскадного процесса распада вихревых структур. Диапазон характерных частот наиболее крупных вихрей определяется от 0 до 1,22 Гц. Кроме того, с увеличением Re наблюдается увеличение характерных частот основных энергонесущих вихрей и расширение спектра плотности энергии. Показания кондуктометрического датчика, установленного на расстоянии 13 калибров от кромки разделителя, в режимах с Re от $3 \cdot 10^3$ до $15 \cdot 10^3$ позволяют судить о наличии турбулентного перемешивания потоков, которое в сравнении с результатами эксперимента GEMIX [6] (датчик установлен на расстоянии 6 калибров), носит более интенсивный характер. Для характерных турбулентных режимов была произведена оценка частот основных энергонесущих вихрей по критерию Струхала: $Sh \approx 0,2$, дающая хорошее согласование с экспериментальными данными.

Таким образом, выполненные расчетно-экспериментальные исследования позволили отработать методику проведения исследования смешения потоков с применением матричного кондуктометрического метода на примере стратифицированного течения. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для верификации программ вычислительной гидродинамики.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации в рамках научного проекта МК-2398.2018.8.

Библиографический список

1. **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.
2. **Prasser, H.M.** A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows / H.M. Prasser, A. Bottger, J. Zschau // Flow Meas. Instrum. – 1998. – No. 9. – P. 111-119.
3. **Баринов, А.А.** Методика повышения точности измерения расхода жидкости общепромышленными расходомерами / А.А. Баринов, И.А. Коновалов, А.А. Чесноков, М.А. Макаров // Будущее технической науки: сборник материалов XVIII Международной молодежной научно-техн. конф.; изд-во НГТУ им. Р.Е. Алексева. – Нижний Новгород, – 2019. – 513 с.
4. **Идельчик, И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
5. **Снегирёв, А.Ю.** Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений / А.Ю. Снегирёв. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 143 с.
6. Uncertainty quantification of the effect of random inputs on computational fluid dynamics simulations of the GEMIX experiment using metamodels / A. Badillo, B. Ničeno, J. Fokken and R. Kapulla / Paul Scherrer Institute, Switzerland, 2017.

*Дата поступления
в редакцию: 05.08.2019*

**A.E. Khrobostov, M.A. Legchanov, D.N. Solncev, A.A. Barinov, I.A. Konovalov,
A.A. Chesnokov, M.A. Makarov**

RESEARCH OF HYDRODYNAMICS OF STRATIFIED TURBULENT FLOWS FOR VALIDATION OF DESIGNATED APPROACHES TO MODELING THERMAL PROCESSES IN EQUIPMENT OF NUCLEAR POWER PLANTS

Nizhniy Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev

Purpose: Study of features of the spatial conductometry method for the research of stratified flows in the elements of nuclear power units.

Method of work: To work out the methodology for studying the mixing processes of stratified flows as applied to the calculations of mixing, a series of experiments were carried out using a mesh conductometric sensor.

Findings: Revealed the formation of a periodic instability of the stratification boundary with a pronounced frequency at average expenditures, which disappears with an increase in expenditures.

Conclusions: This work is an experimental basis for the development of methods for conducting computational and experimental studies using spatial conductometric systems. The results can be used to conduct validation experiments on the hydrodynamics of stratified flows.

Key words: hydrodynamics, spatial conductometry, flow mixing processes in nuclear power plants.