

УДК 621.039

Экспериментальные исследования гидродинамики стратифицированного течения спутных смешивающихся потоков

С.М. Дмитриев, А.Е. Хробостов, М.А. Легчанов, С.С. Бородин, А.А. Баринов, И.А. Коновалов, А.А. Чесноков, М.А. Макаров

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

E-mail: iliakonowaloff@yandex.ru

В работе представлены результаты серии экспериментальных исследований турбулентных потоков, проведенных при помощи кондуктометрической измерительной системы. В результате обработки экспериментальных данных получены оценки осредненных значений концентраций примеси в измерительных ячейках кондуктометрического датчика, дисперсии реализаций, а также автокорреляционные функции и гистограммы распределения плотности вероятности реализаций измерительного сигнала. Сравнение полученных экспериментальных данных с результатами аналогичного по своей постановке бенчмарка GEMIX, направленного на исследование процессов изотермического и неизотермического смешений, в котором регистрация исследуемых характеристик осуществлялась при помощи PIV-метода, дает хорошее соответствие характерных длин волн упорядоченных структур, возникающих на границе раздела потоков. Также наблюдается соответствие профилей кинетической энергии турбулентности для центральных областей экспериментальной модели, в то время как для периферийных зон результаты демонстрируют значительное расхождение с данными GEMIX, что объясняется различием физических принципов используемых методов измерений, а также повышенным пространственным разрешением PIV по сравнению с кондуктометрическим методом.

Ключевые слова: спутные потоки, стратификация, пространственная кондуктометрия.

Введение

В атомной энергетике широко известны проблемы, возникающие в результате смешения потоков жидкости с различными плотностями. Примером могут служить термоциклические и вибрационные нагрузки конструкционных материалов, возникающие в трубопроводах первого контура реакторных установок (РУ) с водяным теплоносителем, а также при подаче борного раствора в теплоноситель первого контура [1]. При этом характеристики турбулентности, возникающей в результате смешения потоков, играют определяющую роль при формировании термоциклических нагрузок в элементах РУ.

На современном этапе развития атомного машиностроения для прогнозирования явлений турбулентности при проектировании РУ широко применяется вычислительная гидродинамика (computational fluid dynamics, CFD). В то же время результаты численного эксперимента могут иметь значительный разброс, возникающий вследствие возрастающей сложности используемых моделей, которые очень чувствительны к неопределенным граничным условиям [2]. Таким образом, являясь современным инструментом

© Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Легчанов М.А., Бородин С.С., Баринов А.А., Коновалов И.А., Чесноков А.А., Макаров М.А., 2021

для обоснования надежности энергетического оборудования, CFD-коды требуют валидации используемых физических моделей на широком спектре бенчмарков [3, 4]. Имеет место и обратная взаимосвязь: корректность проведения эксперимента может быть обоснована путем сравнения с результатами численного моделирования.

Подобные вопросы рассматривались, в том числе, в рамках международного эксперимента GEMIX, в котором исследовались процессы изотермического и неизотермического смешения двух спутных потоков в канале квадратного сечения 50×50 мм с применением метода определения скорости по изображениям частиц (Particle Image Velocimetry, PIV). Однако подобные измерительные системы могут быть ограничены по частоте дискретизации регистрируемых показаний, а также требуют наличия оптически прозрачного экспериментального участка, что значительно сужает возможности использования режимных параметров экспериментальной установки. Более предпочтительным в данном случае является применение кондуктометрических измерительных систем, частота дискретизации показаний которых существенно выше, а чувствительные элементы могут быть установлены в непрозрачных экспериментальных моделях.

С учетом вышеизложенного цель настоящей работы состоит в сравнении результатов серии экспериментальных исследований процессов смешения спутных изотермических потоков с данными, полученными при проведении аналогичных численных и натуральных тестов [5].

Экспериментальный стенд

Общая схема стенда (рис. 1) предполагает организацию экспериментального режима с изотермическим смешением в разомкнутом контуре циркуляции (для исследований с использованием потоков с различной концентрацией примесей) и с неизотермическим смешением при использовании потоков с различными температурами [6].

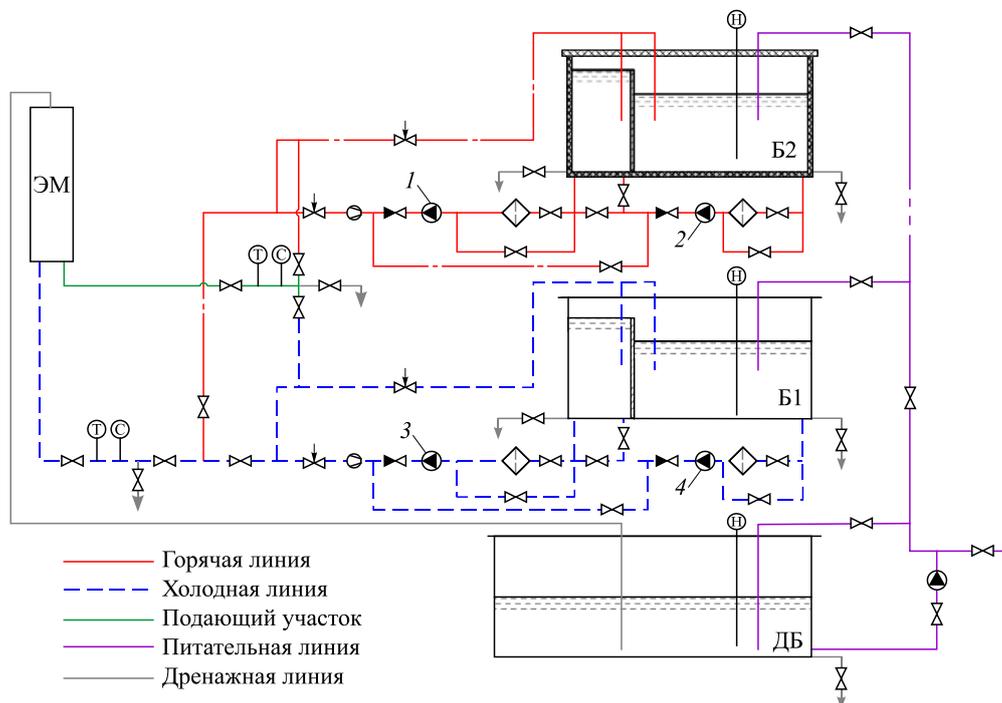


Рис. 1. Гидравлическая схема экспериментального стенда.

1 — циркуляционный насос горячей линии, 2 — подпиточный насос горячей линии, 3 — циркуляционный насос холодной линии, 4 — подпиточный насос холодной линии, Б1 — холодный питательный бак, Б2 — горячий питательный бак, ДБ — дренажный бак, ЭМ — экспериментальная модель.

Рабочая среда смешиваемых потоков с постоянным уровнем подается подпиточными насосами (2 и 4) в зоны, откуда поступает на всас циркуляционных насосов (1 и 3). Такое решение позволяет обеспечить постоянное гидростатическое давление на входе в циркуляционные насосы, что служит одним из основных критериев поддержания стационарности процесса смешения. Далее среда прокачивается по подводной трассе через экспериментальный участок и поступает в дренажный бак. Арматура подводной 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 до 20000) течения при различных температурах, расходах и концентрациях примесей в потоке теплоносителя. Основные характеристики стенда приведены в табл. 1.

Измерительная система

Для измерения физических характеристик в области турбулентного смешения используется метод матричной кондуктометрии [7], в основе которого лежит измерение удельной электропроводимости (УЭП) среды в исследуемых точках. В качестве пассивной примеси, создающей градиент проводимости среды, используется незначительная концентрация раствора соли ($NaCl$ или Na_2SO_4). При этом турбулентные пульсации скорости, возникающие на границе раздела двух спутных струй, пропорциональны фиксируемым пульсациям УЭП.

Используемая кондуктометрическая измерительная система состоит из электроимпедансного измерительного комплекса ЛАД-36, разработанного в НГТУ им. Р.Е. Алексеева совместно с Институтом теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН [8] и пространственных кондуктометров сетчатой конструкции с разрешением 8×8 ячеек и шагом между центрами соседних ячеек 5 мм [9].

Описание проводимых экспериментов

Исследование процессов смешения проводилось в модели, аналогичной описанной в [2]. Она представляет собой канал квадратного сечения 50×50 мм, выполненный из оргстекла. На входном участке устанавливались хонейкомбы, предназначенные для получения ровного профиля скорости на входе в модель. Раздельное движение потоков во входных участках осуществлялось при помощи разделительной перегородки, за которой начиналась зона смешения. Сетчатые кондуктометрические датчики (СД, в англоязычной литературе — wire mesh sensor, WMS) в экспериментах устанавливались на расстояниях 70, 250 и 450 мм от разделительной перегородки. Геометрия экспериментальной модели представлена на рис. 2. Параметры экспериментальных режимов сведены в табл. 2.

Для исключения общих и систематических погрешностей при проведении измерений выполнялась предварительная калибровка кондуктометрических датчиков посредством нормировки регистрируемых показаний [10]:

$$\varphi = \frac{\lambda_{\text{изм}} - \lambda_{\text{min}}}{\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}},$$

Таблица 1
Основные параметры экспериментального стенда

Параметр	Значение
Мощность нагревателей (суммарная), кВт	12
Расход через экспериментальную модель, м ³ /час	до 2,9
Температура смешиваемых потоков, °С	10–60

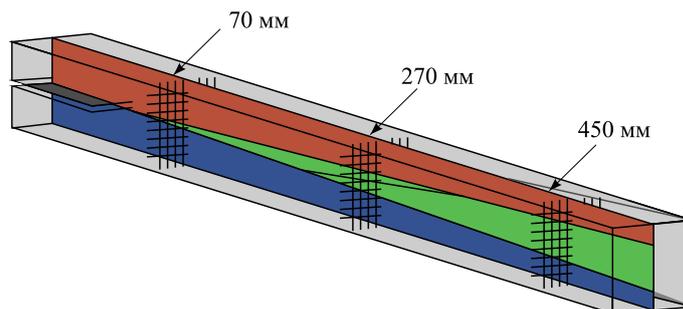


Рис. 2. Геометрия экспериментальной модели с указанием положений СД.

Таблица 2

Параметры экспериментальных режимов

Число Рейнольдса, $Re \cdot 10^{-3}$	Скорость потока, м/с	Температура, °С	УЭП, мкСм/см		Длительность реализации, с
			Пресный поток	Солёный поток	
3,0	0,03	38,2	789,6	1005,0	240,0
10,0	0,20	20,6	639,8	854,0	120,0
20,0	0,22	47,5	814,0	1065,0	120,0

где λ_{\min} — удельная проводимость пресного потока (удельная проводимость в Б1 (см. рис. 1), λ_{\max} — удельная проводимость солёного потока (удельная проводимость в Б2), $\lambda_{\text{изм}}$ — удельная проводимость, измеренная соответствующей ячейкой кондуктометрического датчика.

В качестве характеристик исследуемого процесса смешения при анализе принимались:

- осредненные значения концентрации в измерительных ячейках датчика;
- дисперсии реализаций измерительного сигнала;
- автокорреляционные функции и гистограммы распределения реализаций измерительного сигнала.

Анализ результатов

Для сравнения полученных результатов с результатами международного эксперимента GEMIX был выбран режим, аналогичный [2], [5], с $Re = 10^4$ (N116), который по совокупности режимных параметров наиболее полно соответствует экспериментам, проведенным в рамках данной работы.

Осредненные профили концентраций в измерительных ячейках СД для различных расстояний от кромки разделительной пластины до измерительной плоскости датчика в режимах с $Re = 10000$ представлены на рис. 3. Уменьшение крутизны профиля концентрации при удалении от входного участка свидетельствует о росте степени смешения потоков. При этом различие концентраций, полученных авторами настоящей работы, со значениями, полученными в работе [2], обусловлено различиями в геометрии и допуске на изготовление разделительной перегородки: при отрыве потока от оргстеклянной округлой кромки, использованной в представленной работе, среда перемешивается интенсивнее, чем при использовании металлической кромки клиновидной формы.

По полученным значениям УЭП в измерительных ячейках СД были построены картограммы распределения безразмерной пассивной скалярной функции (рис. 4) (примеси),

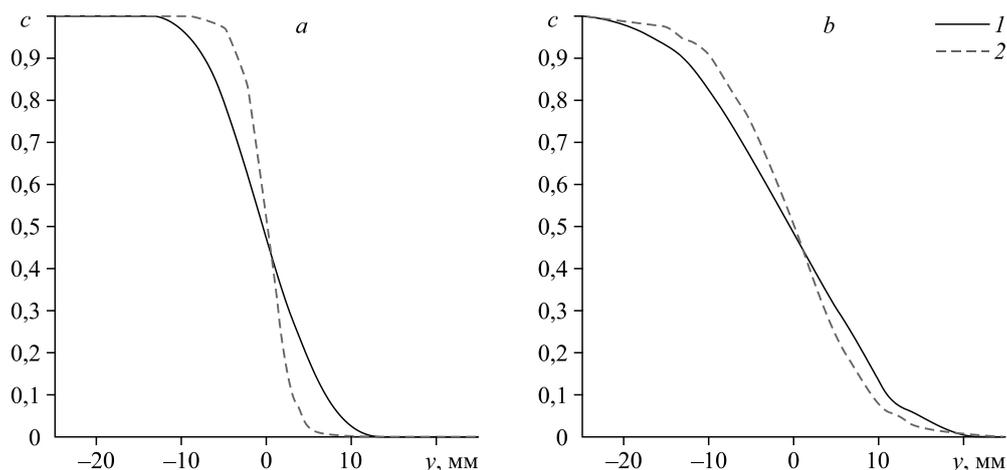


Рис. 3. Осредненные профили концентраций, полученные при помощи СД в настоящей работе (1) и данные работы [2] (2).
 $x = 70$ мм (а), 450 мм (б).

позволяющие судить о толщине слоя смешения на различных расстояниях от входной кромки.

На рис. 5 приведены статистические распределения показаний СД, расположенного на расстоянии 450 мм от разделительной перегородки, в сравнении Гауссовым распределением (красная линия) для различных режимов. Как видно из приведенных графиков, для центральных ячеек, расположенных в турбулизированном ядре потока, для всех режимов, за исключением $Re = 3 \cdot 10^3$, который является переходным, показания соответствуют нормальному закону распределения, в то время как для ячеек, расположенных на периферии, распределение имеет отклонение от нормального, что объясняется влиянием асимметрии потока в этих ячейках.

В режиме с $Re = 3 \cdot 10^3$ распределение для центральных ячеек имеет два выраженных максимума — следствие гармонических колебаний, возникающих на границе раздела спутных струй в режимах с низкими Re , в которых не происходит интенсивного перемешивания, но образуются неустойчивости при движении потоков.

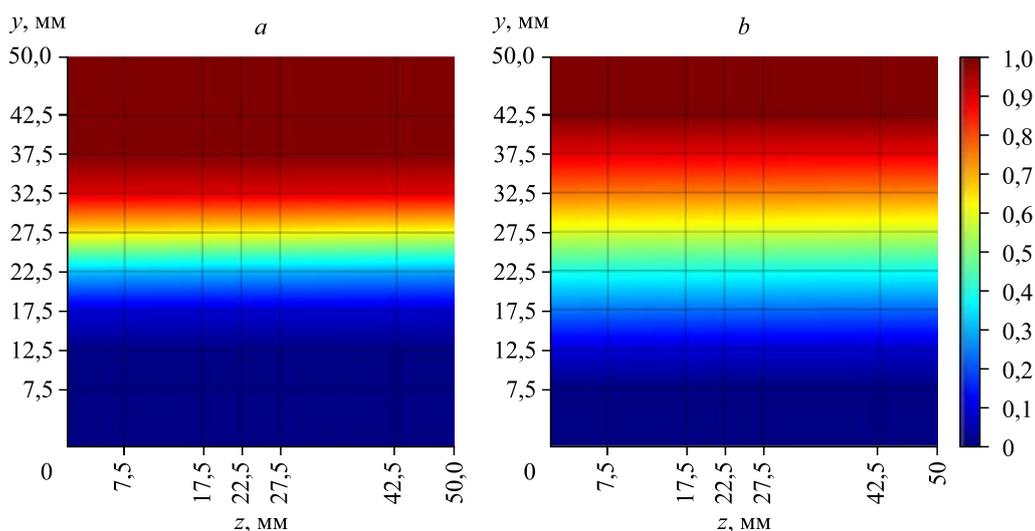


Рис. 4. Картограмма распределения осредненных значений УЭП в измерительных ячейках СД.
 $x = 70$ мм (а), 450 мм (б).

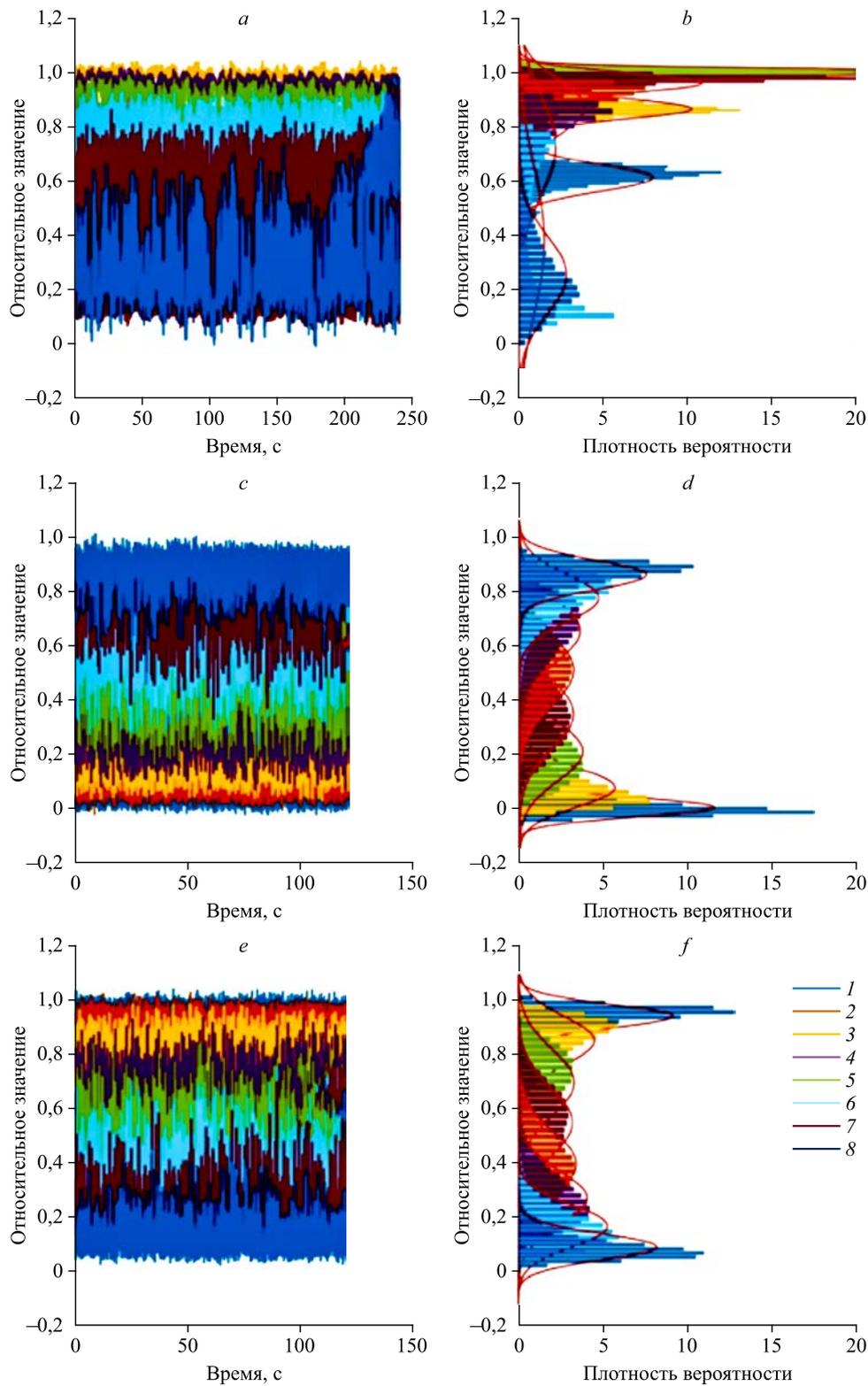
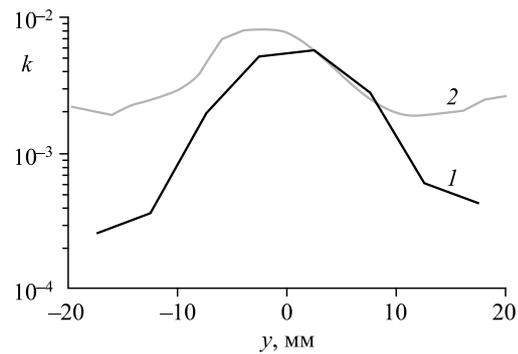


Рис. 5. Распределение плотности вероятности в режимах с различными Re .
 $x = 450$ мм; $Re = 3000$ (*a, b*), 10000 (*c, d*), 20000 (*e, f*);
a, c, e — нормированные реализации, *b, d, f* — распределение плотности вероятности;
 1–8 — приёмники 1–8 соответственно.

Рис. 6. Профили кинетической энергии турбулентности, полученные в настоящей работе при помощи метода WMS (1) и данные PIV из работы [3] (2) при $x = 450$ мм.



На рис. 6 представлены профили кинетической энергии k пульсаций УЭП и пульсаций скорости для режима $Re = 10000$ [3], измеренные на расстоянии 450 мм от разделительной перегородки. Здесь и далее обозначение «WMS» на графиках используется для результатов, полученных в настоящей работе на осно-

ве показаний кондуктометрических датчиков. Как видно из представленного графика, кинетическая энергия турбулентности имеет максимум в центре канала, что подтверждается как данными PIV, так и WMS. Однако ближе к периферической части канала наблюдается значительное расхождение значений, рассчитанных по показаниям УЭП, с данными работы [3], что может быть объяснено различием принципов измерений кондуктометрического и PIV методов. В первом случае k определяется косвенно, на основе вида спектра измерительного сигнала, в то время как PIV позволяет измерить пульсационную составляющую поля скорости напрямую и получить значение k непосредственно из экспериментальных данных. Помимо этого, дополнительной причиной различий в значениях k может являться отличие интенсивности турбулентности в рассматриваемом сечении, которая в настоящем исследовании несколько ниже, чем в экспериментах GEMIX (рис. 3), что объясняется различием геометрии разделительной перегородки.

Для оценки взаимосвязи характеристик потока в разных точках пространства может быть использован корреляционный анализ. В работе [5] было проведено сравнение корреляционных функций скорости, полученных на основе экспериментальных данных (измерения проводились при помощи PIV-метода), с результатами численного моделирования, которое показало, что корреляционная карта на основе LES-модели турбулентности аналогична экспериментальным корреляционными функциями, однако структуры, представленные в моделировании, имеют больший размер.

Исходя из вышеизложенного, в рамках представленной работы был проведен корреляционный анализ измерительных сигналов СД. В результате обработки экспериментальных данных были получены нормированные автокорреляционные функции, которые сопоставлялись с пространственными корреляционными функциями, полученными авторами [5], с использованием соотношения

$$C_c(x_{lag}) = C_{cc}(x_{lag}/\bar{U}),$$

где C_c — пространственное отображение автокорреляционной функции, x_{lag} — координата, м, C_{cc} — автокорреляционная функция измерительного сигнала, \bar{U} — осредненная скорость потока, м/с.

Результаты корреляционного анализа реализаций УЭП (C_c), полученные в настоящей работе, а также одномерные горизонтальные пространственные корреляционные функции скорости (C_v), полученные в [5] для расстояния 450 мм, представлены на рис. 7. Характерная длина волны (ширина коррелированной области), определенная по показаниям УЭП (l_c) и по результатам PIV (l_v) [5], обозначена на графике штриховой линией. Как видно из приведенных графиков, в исследуемом режиме ($Re = 10000$) наблюдается появление упорядоченных структур, обусловленное регулярной неустойчивостью границы раздела, которая быстро развивается (спустя 2–3 гидравлических

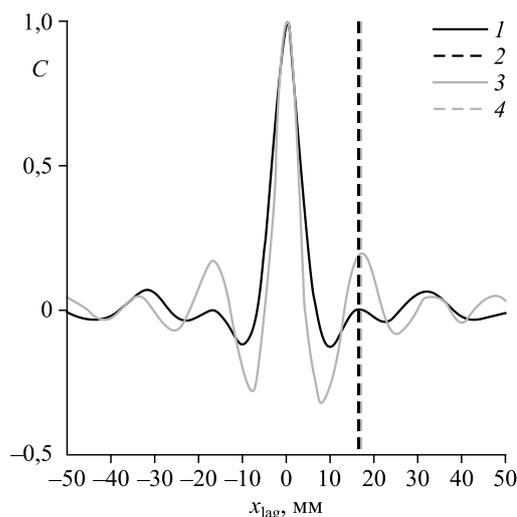


Рис. 7. Корреляционные функции, полученные методами WMS и PIV.

Данные WMS настоящей работы:

1 — C_c , 2 — λ_c (16,8901 мм);

данные PIV работы [5]:

3 — C_{xy} , 4 — λ_v (17,0699 мм).

диаметра) от начала области смешения и затем постепенно распадается вниз по течению. При этом ширина коррелированной области (высота волн) экспоненциально уменьшается по ходу движения. Абсолютное значение ширины также значительно зависит от режима течения (с увеличением Re ширина падает). Длина области корреляции поперечной скорости (длина волны на границе раздела), напротив, увеличивается по ходу

движения среды, а с ростом числа Рейнольдса такое увеличение приобретает большую интенсивность.

Характерная длина волны пульсаций проводимости λ_c на границе раздела, полученная в рамках настоящей работы, хорошо согласуется с длиной волны пульсаций скорости λ_v , полученной при помощи PIV-метода.

Заключение

Результаты проведенных экспериментальных исследований позволяют судить о хорошем соответствии значений гидродинамических характеристик потока, полученных с помощью метода матричной кондуктометрии, значениям, полученным при численном моделировании и в эксперименте при помощи альтернативных методов измерений.

При обработке экспериментальных данных важное значение имеет кинетическая энергия турбулентности, рассматриваемая в качестве одной из основных характеристик потока при сравнении результатов натурных и численных экспериментов. Профили k для центральных ячеек, полученные в настоящей работе на основе данных сетчатых датчиков, показывают удовлетворительное соответствие с результатами, полученными PIV-методом [3], в то время как при приближении к стенкам канала отклонение увеличивается.

На основе вышеизложенного можно сделать обобщающий вывод о необходимости совершенствования методов обработки экспериментальных данных, получаемых при помощи кондуктометрических датчиков.

Список литературы

1. Krpan R., Koncar B. Simulation of turbulent wake at mixing of two confident horizontal flows // Hindawi, Sci. and Techonology of Nuclear Installations. 2018. Vol. 2018, No. 1. P. 1–12.
2. Badillo A., Kapulla R., Niceno B. Uncertainty quantification in CFD simulations of isokinetic turbulent mixing layers // The 15th Intern. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-hydraulics, NURETH-15. Pisa, 2013. Vol. 1, No. 1. P. 1–15.
3. Fokken J., Krohn B., Kapulla R., Niceno B., Prasser H.M., Badillo A. NEA benchmark exercise: computational fluid dynamic prediction and uncertainty quantification of a gemix mixing layer test // Nuclear Energy Agency Committee on the Safety of Nuclear Installations, JT03442730, 2019. Vol. 1, No. 1. 99 p.
4. Rohde U., Kleim S., Hemstrom B., Toppila T., Bezrukov Y. The European project FLOMIX-R: description of the slug mixing and buoyancy related experiments at the different test facilities (Final report on WP 2), Rossendorf, ISSN 1437-322X, 2005. Vol. 1, No. 1. 214 p.

5. Fokken J., Kapulla R., Kuhn S., Dyck C., Prasser H.M. Stably stratified isokinetic turbulent mixing layers: comparison of PIV-measurements and numerical calculations // Fachtagung «Lasermethoden in der Stromungsmesstechnik». Erlangen, 2009. Vol. 1, No. 1. P. 8–10.
6. Kononov I.A., Khrobotov A.E., Legchanov M.A., Solncev D.N., Barinov A.A., Ryazanov A.V., Chesnokov A.A., Makarov M.A. Application of the correlation velocity measurements for hydrodynamic investigations of turbulent coolant flow in nuclear reactor elements // Devices and Methods of Measurements. 2020. Vol. 3, No. 11. P. 196–203.
7. Prasser H.M., Bottger A., Zschau J. A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid // Flow Measurement and Instrumentation. 1998. Vol. 9. P. 111–119.
8. Баринов А.А., Дмитриев М., Хробостов А.Е., Главный В.Г. Особенности применения пространственных кондуктометрических датчиков при моделировании смешения потоков теплоносителя в элементах оборудования ядерных энергетических установок // Приборы и методы измерений. 2016. Т. 7, № 3. С. 247–356.
9. Хробостов А.Е., Легчанов М.А., Солнцев Д.Н., Баринов А.А., Коновалов И.А., Чесноков А.А., Макаров М.А. Особенности применения пространственных кондуктометрических датчиков при моделировании смешения потоков теплоносителя в элементах оборудования ядерных энергетических установок // Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. Т. 126, № 3. С. 111–119.
10. Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Баринов А.А., Главный В.Г. Разработка и адаптация вихреразрешающей измерительной системы для проведения верификационных экспериментов на крупномасштабной модели ядерного реактора // Приборы и методы измерений. 2017. Т. 8, № 3. С. 203–213.

*Статья поступила в редакцию 25 февраля 2021 г.,
после доработки — 17 мая 2021 г.,
принята к публикации 18 мая 2021 г.*