

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.039

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_1_54

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

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ПЕРЕНОСА ТРАССЕРА ЗА СЧЕТ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИФфуЗИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ВНУТРИРЕАКТОРНЫХ ПОТОКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты серии экспериментов с целью определения влияния переноса трассера в потоке за счет молекулярной диффузии при исследованиях гидродинамики турбулентных потоков. Опыты проводились в модели квадратного сечения при использовании солевого трассера и кондуктометрической измерительной системы: пространственных кондуктометров сетчатой конструкции. Обработка экспериментальных данных позволила получить осредненные профили проводимости в измерительных плоскостях датчиков, построить картограммы распределения относительной концентрации трассера, а также получить относительные значения потока трассера через границу раздела двух спутных потоков. Данная методика позволяет получить соотношения переноса трассера в потоке за счет молекулярной и турбулентной диффузии.

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

Введение

В атомной энергетике широко известны проблемы, возникающие в результате смешения потоков жидкости с различными плотностями. В качестве примера могут быть приведены 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 растущей сложности используемых моделей, очень чувствительных к неопределенным граничным условиям [2]. Таким образом, являясь современным инструментом для обоснования надежности энергетического оборудования, CFD-коды требуют валидации используемых физических моделей на широком спектре бенчмарков [3,4], что подчеркивает актуальность исследований, проводимых в НГТУ с использованием кондуктометрической измерительной системы [5].

В основе кондуктометрического метода, применяемого для исследования гидродинамики внутриреакторных потоков, лежит использование трассера, создающего градиент проводимости среды, в качестве которого используется незначительная концентрация раствора соли (NaCl или Na₂SO₄). Распространение трассера в потоке осуществляется за счет турбулентной и молекулярной диффузии, при этом влиянием последней обычно пренебрегают.

Таким образом, целью данной работы является экспериментальная оценка влияния переноса трассера за счет молекулярной диффузии на результаты экспериментальных исследований.

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 неизотермическим смешением при использовании потоков с различными температурами [6].

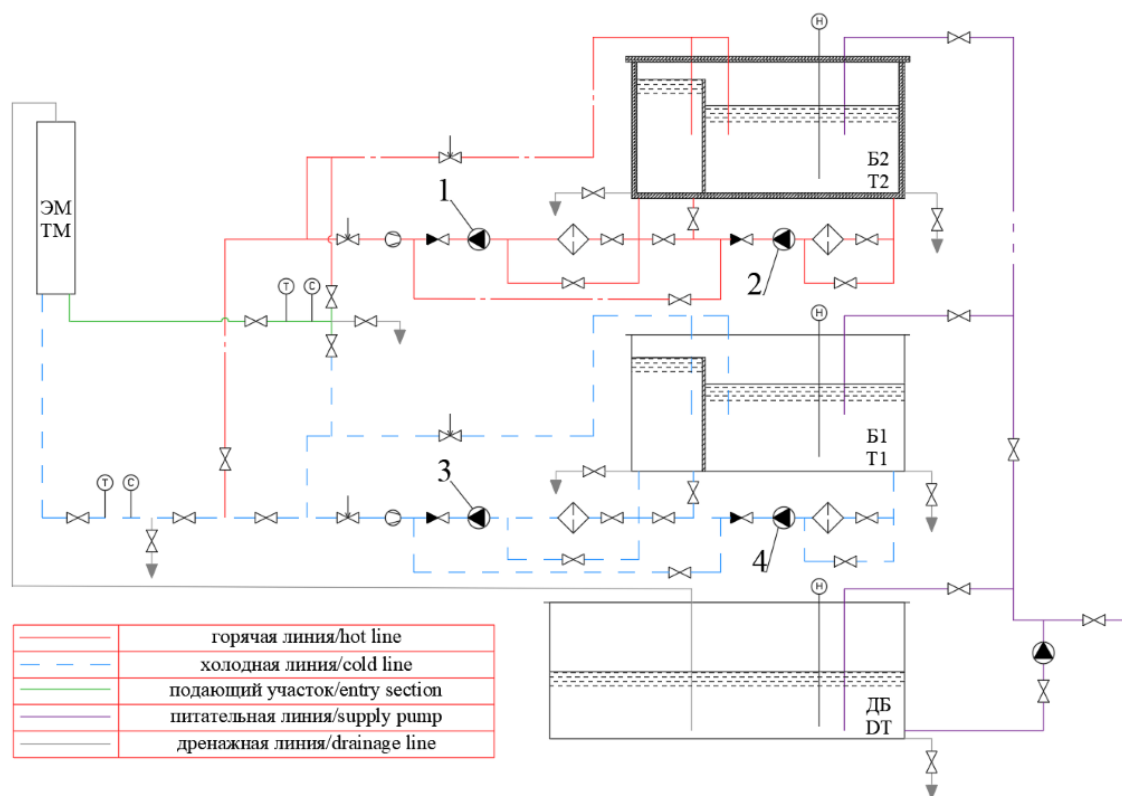


Рис. 1. Гидравлическая схема экспериментального стенда:

- 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 подается подпиточными насосами (2 и 4) в зоны с постоянным уровнем, откуда поступает на всас циркуляционных насосов (1 и 3). Данное решение позволяет обеспечить постоянное гидростатическое давление на входе в основные насосы, что служит одним из основных критериев поддержания стационарности процесса смешения. Далее среда прокачивается по подводящей трассе через экспериментальный участок 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 до $20 \cdot 10^3$) 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	12
Расход через экспериментальную модель, м ³ /час	до 2,9
Температура смешиваемых потоков, °С	10-60

Измерительная система

Измерительная система стенда состоит из технологической части, необходимой для контроля режимных параметров работы установки, и 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 (ЛАД-36) [7]. Измерения проводились при помощи метода кондуктометрии с использованием двух последовательно установленных сетчатых кондуктометрических датчиков (СД) с разрешением 8×8 ячеек и шагом между центрами соседних ячеек 5 мм. Общий вид датчика представлен на рис. 2.

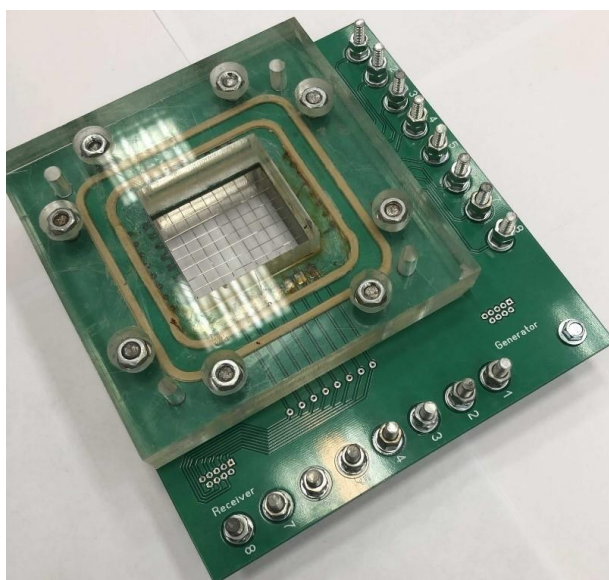


Рис. 2. Сетчатый кондуктометрический датчик

Выходной токовый сигнал измерительной системы пропорционален удельной электропроводности (УЭП), которая, в свою очередь, зависит от содержания в измерительных ячейках СД. Для исключения общих и систематических погрешностей при измерении УЭП перед проведением измерений проводилась тарировка ячеек СД. В качестве пассивной примеси, создающей градиент проводимости среды, регистрируемый измерительной системой, используется незначительная концентрация раствора соли.

Описание проводимых экспериментов

Для проведения исследований и изучения процессов смешения была использована экспериментальная модель квадратного сечения 50х50 мм (рис. 3). На входных участках 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 сме-

шения спутных потоков. Геометрия экспериментальной модели выполнена аналогично использованной в международном эксперименте GEMIX [3].

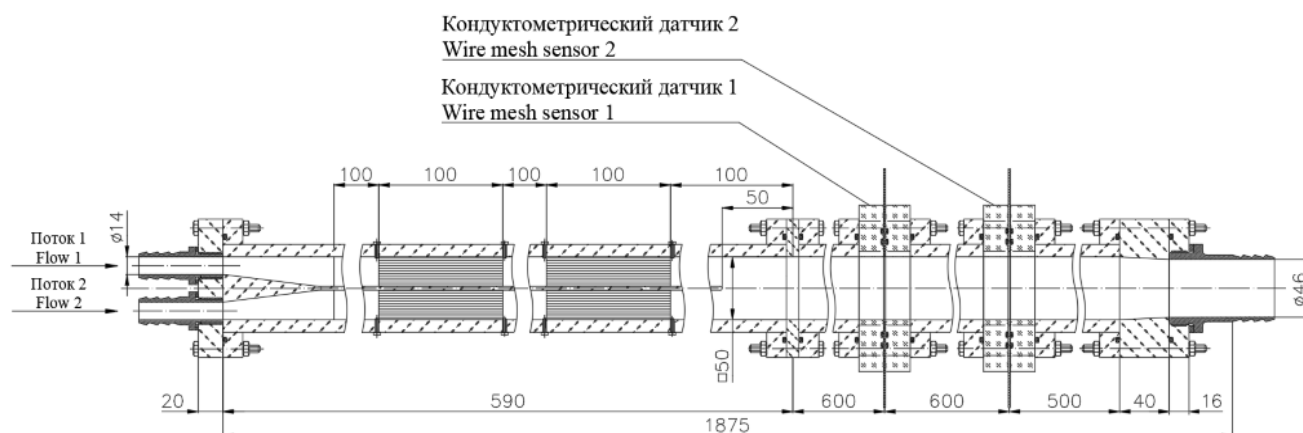


Рис. 3. Экспериментальная модель

Организация стратифицированных потоков в экспериментальной модели проводилась за счет использования расходомеров повышенной точности, для каждого из которых была проведена индивидуальная градуировка [8]. Для оценки величины потока трассера за счет молекулярной диффузии был организован ламинарный режим течения среды через экспериментальную модель ($Re \approx 10^3$), при котором отсутствует перенос трассера за счет турбулентных пульсаций (турбулентная диффузия). При этом сетчатые датчики устанавливались следующим образом: СД 1 на расстоянии 70 мм от входной кромки; СД 2 на расстоянии 640 мм от СД 1. Такая конфигурация (удаление от входной кромки) позволила избежать возникновения возмущений на СД 1 при отрыве потока от входной кромки. Измерения в случае ламинарного режима производились при параллельно работающих СД с задействованием лишь центральных ячеек. Турбулентный режим ($Re \approx 20 \cdot 10^3$) был использован для оценки вклада молекулярной диффузии трассера в показания СД при исследованиях гидродинамики турбулентных потоков. В этом случае регистрация показаний осуществлялась только первым датчиком (установленным на расстоянии 570 мм от входной кромки) с задействованием всех доступных ячеек.

Экспериментальные данные включают в себя режимные параметры и реализации УЭП кондуктометрического датчика. 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 потоков		Длительность реализации, с
		Пресный поток	Соленый поток	
1	2,46	480,0	943,0	120
3	4,23	789,6	1005,0	120
20	32,88	814,0	1065,0	120

Методика обработки экспериментальных данных

При обработке экспериментальных данных принималось направление оси x вдоль потока. Начало отсчета ($x = 0$ мм) принималось для ламинарного режима на измерительной плоскости СД 1, для турбулентного режима – на входной кромке (рис. 4).

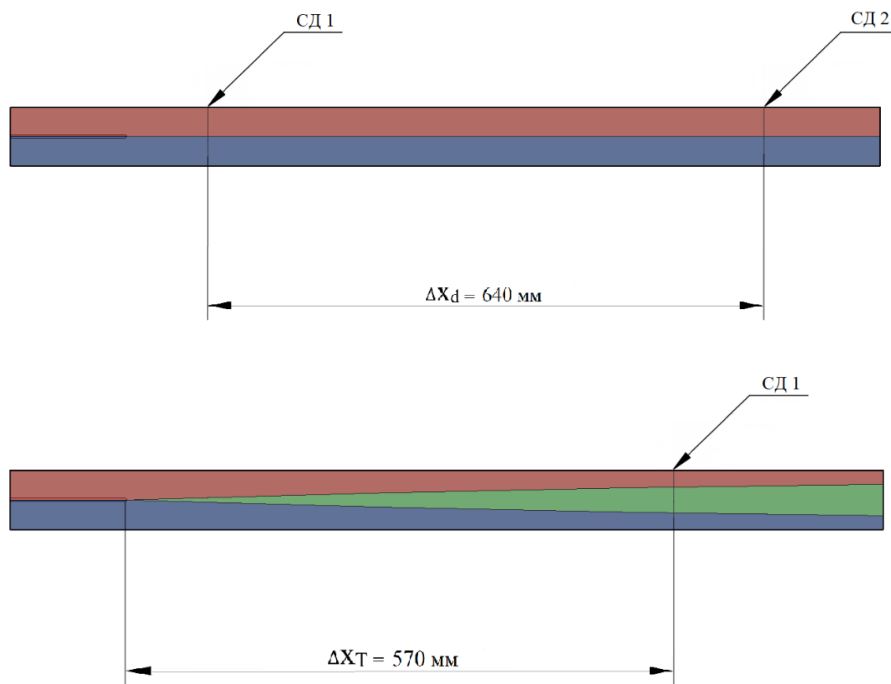


Рис. 4. Взаимное расположение сетчатых датчиков

Нормировка осредненных значений УЭП (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 (при $x = 0$), λ_{max} – удельная проводимость соленого потока солёного потока (при $x = 0$), $\lambda_{изм}$ – удельная проводимость, измеренная данной ячейкой кондуктометрического датчика.

Нормированные осредненные значения УЭП в измерительной плоскости СД 1 для турбулентного режима с $Re \cdot 10^3$ представлены на рис. 5.

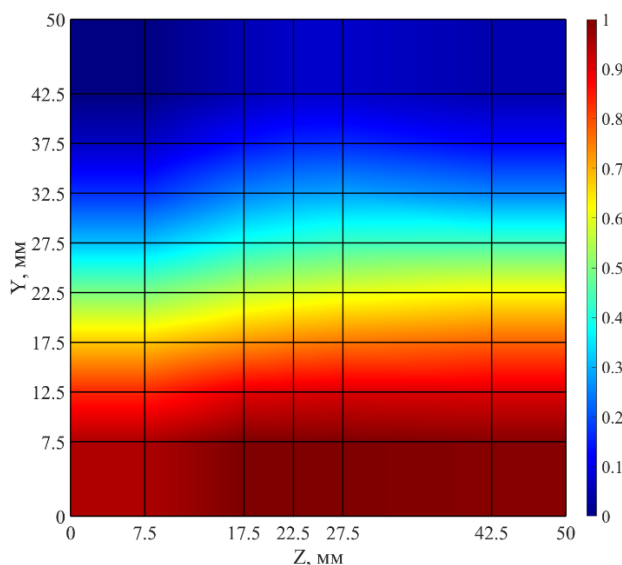


Рис. 5. Картограмма распределения осредненной нормированной УЭП в режиме с $Re \cdot 10^3$

Оценка величины потока трассера (в $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$) через границу раздела, пролегающую между приемниками с координатами $y = 22,5$ мм и $y = 27,5$ мм, производилась в соответствии с соотношением (2):

$$J = \frac{\Delta C}{S \cdot \Delta t}, \quad (2)$$

где ΔC – разность безразмерных концентраций в точках с координатами $x = 0$ и $x = \Delta x$; S – площадь контакта потоков, определяемая как $S = \Delta x \cdot b$, м^2 ; Δt – время прохождения расстояния Δx потоком, с.

Вклад молекулярной диффузии трассера в показания СД оценивался в соответствии с соотношением (3):

$$\chi = \frac{J_t}{J_l} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где J_t – поток трассера при турбулентном режиме, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; J_l – поток трассера при ламинарном режиме, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Анализ результатов

Обработка экспериментальных данных позволила получить профили осредненных нормированных значений проводимости в измерительных ячейках кондуктометрических датчиков (далее приводятся значения УЭП, осредненные по координатам $y = 22,5$ мм и $y = 27,5$ мм). График распределения проводимостей для режимов с $\text{Re } 10^3$ и $\text{Re } 20 \cdot 10^3$ приведен на рис. 6.

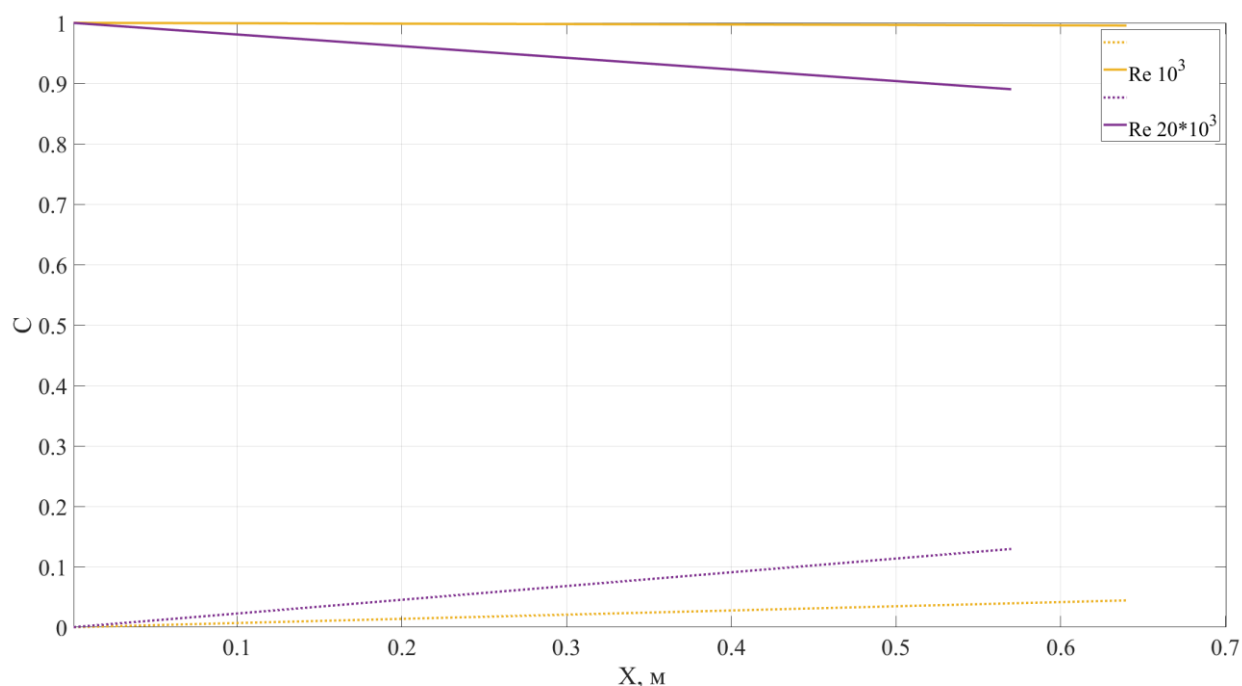


Рис. 6. График осредненной нормированной УЭП при ламинарном и турбулентном режимах: сплошная линия – УЭП соленого потока; пунктирная линия – УЭП пресного потока.

Очевидно, что с возрастанием числа Re происходит увеличение турбулентной составляющей диффузии, в то время как молекулярную диффузию можно принять равной константе (при сохранении температуры смешиваемых потоков). Вследствие этого, с ростом числа Re в высокорейнольдсовых режимах, представляющих наибольший интерес с точки зрения исследования внутриреакторных потоков, происходит значительное снижение вклада моле-

кулярной диффузии в распространение трассера. Полученные значения потоков трассера, а также вклад молекулярной составляющей диффузии, сведены в табл. 3.

Таблица 3.

Сводная таблица результатов

Параметр	Re · 10 ⁻³		
	1	10	20
Поток трассера, м ⁻² · с ⁻¹	0,04	1,54	1,75
Вклад молекулярной диффузии в перенос трассера, %	100,00	2,60	2,03

На основании данных видна экспоненциально убывающая зависимость вклада молекулярной диффузии в показания сетчатых датчиков от числа Рейнольдса.

Заключение

По результатам проведенной серии экспериментов вклад молекулярной диффузии в результаты исследований высокорейнольдсовых внутриреакторных потоков с применением матричной кондуктометрической системы не превышает 3 %. Представленная методика обработки экспериментальных данных позволила получить осредненные нормированные поля удельной проводимости, построить картограммы распределения концентрации, а также получить соотношения вклада молекулярной и турбулентной диффузии в перенос пассивной скалярной примеси при использовании трассерного метода измерения.

Библиографический список

1. **Krpan, R.** Simulation of Turbulent Wake at Mixing of Two Confident Horizontal Flows / R. Krpan, B. Koncar // Hindawi, Science and Techonology of Nuclear Installations, 2018.
2. **Badillo, A.** The 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-hydraulics, NURETH-15 / A. Badillo, R. Kapulla, B. Niceno // Uncertainty quantification in CFD simulations of isokinetic turbulent mixing layers. Pisa. 2013.
3. **Fokken, J.** NEA Benchmark Exercise: Computational Fluid Dynamic Prediction and Uncertainty Quantification of a GEMIX Mixing Layer Test / J. Fokken, B. Krohn, R. Kapulla, B. Niceno, H.M. Prasser, A. Badillo // Nuclear energy agency committee on the safety of nuclear installations, JT03442730, 2019.
4. **Rohde, U.** The European project FLOMIX-R: Description of the slug mixing and buoyancy related experiments at the different test facilities (Final report on WP 2) / U. Rohde, S. Kleim, B. Hemstrom, T. Toppila, Y. Bezrukov // Rossendorf, ISSN 1437-322X, 2005.
5. **Баринов, А.А.** Внедрение метода пространственной кондуктометрии для экспериментального изучения процессов смешения внутриреакторных потоков в современных ЯЭУ / А.А. Баринов, В. Варенцов, В.Г. Главный, С.М. Дмитриев, М.А. Легчанов, А.В. Рязанов, А.Е. Хробостов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Vol. 117. – No. 2. – 2017. – P. 35-41.
6. **Konvalov, I.A.** Application of the Correlation Velocity Measurements for Hydrodynamic Investigations of Turbulent Coolant Flow in Nuclear Reactor Elements / I.A. Konvalov, A.E. Khrobostov, M.A. Legchanov, D.N. Solncev, A.A. Barinov, A.V. Ryazanov, A.A. Chesnokov, M.A. Makarov // Devices and Methods of Measurements. – Vol. 3, – No. 11. – 2020. – P. 196-203.
7. **Баринов, А.А.** Особенности применения пространственных кондуктометрических датчиков при моделировании смешения потоков теплоносителя в элементах оборудования ядерных энергетических установок / А.А. Баринов, С.М. Дмитриев, А.Е. Хробостов, В.Г. Главный // Приборы и методы измерений. – Vol. 7. – No. 3. – 2016. – P. 247-356.
8. **Коновалов, А.** Разработка методики повышения точности обработки показаний первичных преобразователей расходомерных устройств / А. Коновалов, А.А. Баринов, А.А. Чесноков, М.А. Макаров, С.В. Исаева // Молодой ученый, Vol. 40, No. 330, 2020. pp. 21-28.

*Дата поступления
в редакцию: 01.12.2020.*

**A.A. Chesnokov, I.A. Konovalov A.A. Barinov, A.E. Khrobostov, M.A. Legchanov,
S.S. Borodin, M.A. Makarov**

**ON THE ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF TRANSFER OF TRACER DUE TO
MOLECULAR DIFFUSION IN INVESTIGATIONS OF TURBULENT INTRA-REACTOR
FLOWS WITH THE APPLICATION OF A CONDUCTOMETRIC MEASURING SYSTEM**

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

Purpose: Estimation of influence of transfer of tracer due to molecular diffusion in turbulent flows.

Method of work: To work out the methodology for estimation of distortion of results of experiments, carrying out with conductometric measurement system, a series of experiments were carried out using a mesh conductometric sensor.

Findings: The influence of molecular diffusion in all experiments with high Reynolds were less than 3 %.

Conclusions: The method for processing experimental data presented in this work made it possible to obtain averaged normalized fields of specific conductivity, to construct cartograms of the concentration distribution, and to obtain the ratios of the contribution of molecular and turbulent diffusion to the transfer of a passive scalar tracer using the tracer measurement method.

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