

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО СМЕШЕНИЯ ВСТРЕЧНЫХ ПОТОКОВ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ТРОЙНИКОВОМ УЗЛЕ

Р.Р. Рязанов, А.Е. Соборнов, С.М. Дмитриев, Н.В. Мацин, А.В. Котин

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24*



Процессы неизотермического смешения потоков теплоносителя в элементах энергетического оборудования водоохлаждаемых реакторных установок сопровождаются термопульсациями, интенсивность которых может достигать значений, приводящих к усталостному разрушению. Получение необходимых для оценки ресурса оборудования характеристик термопульсаций возможно с применением численных методов. Однако результаты расчетов нуждаются в валидации на основе экспериментально полученных полей тепловых и гидродинамических параметров среды. Для получения представления о механизме возникновения и характеристиках термопульсаций проведено экспериментальное исследование структуры потока при неизотермическом смешении в тройниковом узле.

Экспериментальный стенд представляет собой гидравлически замкнутый контур. В качестве теплоносителя применена вода. Экспериментальная модель выполнена геометрически подобной участку, входящему в состав высокотемпературного стенда для исследования влияния термоциклических нагрузок на ресурсные характеристики конструкционных материалов энергетического оборудования. Модель представляет собой тройниковый узел типа «встречный впрыск», состоящий из основной и расположенной под углом периферийной труб. Коэффициент геометрического подобия $K = 4/3$. Материал модели – прозрачное органическое стекло. Визуализация структуры потока осуществлялась путем инъекции в поток контрастного трассера, обладающего схожей со смешиваемыми средами плотностью. Введение трассера проводилось последовательно в четырех точках с видеофиксацией процесса смешения с частотой 30 Гц. Для измерения температуры применены термодпары.

Получены фрагменты видеозаписи процесса смешения, а также синхронные с ними экспериментальные реализации температуры. Отслежено образование вихревых потоков в зоне смешения, определены масштабы вихрей, осредненные по времени профили температуры потока, профили интенсивности термопульсаций. Совместный анализ структуры и температурного состояния потока позволил объяснить характер термопульсаций во фронтальной относительно периферийной трубы области.

Ключевые слова: пульсации температуры, термопульсации, неизотермическое смешение, ресурс, долговечность, трассер, теплоноситель, энергетическая установка, тройниковый узел.

Рязанов Р.Р., Соборнов А.Е., Дмитриев С.М., Мацин Н.В., Котин А.В. Экспериментальное исследование процессов неизотермического смешения встречных потоков несжимаемой жидкости в тройниковом узле. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 1. – С. 57-69. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.1.05> .

ВВЕДЕНИЕ

Опыт эксплуатации объектов использования атомной энергии показывает, что термические напряжения оказывают существенное влияние на ресурсные характеристики конструкционных материалов оборудования водоохлаждаемых РУ [1 – 14]. Причиной этих напряжений могут служить интенсивные пульсации температуры потока теплоносителя, обусловленные неизотермическим смешением рабочих сред. Очевидно, что амплитуда термопульсаций тем выше, чем больше температурный напор между смешиваемыми средами. В этих условиях при проектировании теплонапряженного оборудования его ресурс следует оценивать, принимая во внимание термопульсации. Производительность современных компьютеров позволяет расчетным методом учесть влияние термопульсаций при оценке долговечности. Однако полученные таким образом результаты требуют процедуры валидации на основе экспериментальных полей теплофизических параметров.

В настоящее время в НГТУ проводится исследование влияния случайных термопульсаций на ресурсные характеристики ЯЭУ в условиях неизотермического смешения потоков теплоносителя при высоком градиенте температур. Результаты исследования используются для разработки технологии оценки усталостной прочности оборудования реакторных установок при нестационарных термоциклических нагрузках [15]. Технология основана на подходе, при котором численными методами с применением аттестованных программных средств решается так называемая «связная» задача: «теплогидравлика – теплопроводность – НДС – поврежденность».

В ходе экспериментов получены локальные характеристики поля температуры теплоносителя в тройниковом узле при различных теплогидродинамических параметрах смешиваемых потоков [16, 17]. Определены режимные параметры эксперимента, обеспечивающие максимальные темпы накопления усталостных повреждений в материале экспериментальных моделей. При данных параметрах проводятся ресурсные испытания трубных образцов, изготовленных из стали аустенитного класса марки 08X18N10T с разной технологией изготовления. Установлено, что на внутренней поверхности образцов, изготовленных из стали по ГОСТ 9941-81, в зоне термоциклирования возникают макродефекты в виде усталостных продольных и поперечных трещин при наработке в среднем 580 часов. Для образцов, изготовленных из стали по ТУ 14-ЗР-197-2001, разрушение наступает при наработке около 1300 часов. К настоящему времени предельные состояния в виде термоусталостных трещин достигнуты на девяти образцах, изготовленных по ГОСТ 9941-81, и на четырех образцах, изготовленных по ТУ 14-ЗР-197-2001.

Имеющиеся экспериментальные данные не дают исчерпывающего представления о протекающих процессах неизотермического смешения в тройниковом узле. Для проведения адекватного количественного и качественного анализа расчетных данных возникает необходимость наряду с температурным состоянием исследовать гидродинамические характеристики (структуру) потока. Данное обстоятельство актуализирует тему этой работы.

В открытой печати встречается большое количество публикаций, посвященных исследованию смешения потоков теплоносителя в Т-образном [18 – 21] и других

тройниковых соединениях различных конструкций [22 – 25]. Большинство работ объединяет применение бесконтактных и полевых методов измерения скорости, таких как цифровая трассерная визуализация (английская аббревиатура PIV), кондуктометрический метод и др. Более простым и наименее затратным методом получения представления о структуре потока является метод «подкрашенных струй». Этот метод предусматривает введение в поток контрастного трассера для визуализации линий тока жидкости и областей локализации вихревых структур. Следует отметить, что визуальные методы имеют существенные ограничения на режимные параметры исследований, что приводит к необходимости снижения величин рабочего давления и температуры, применения оптически проницаемых материалов при изготовлении экспериментальных моделей. Однако в ряде случаев подобные меры оправданы необходимостью получения уточняющих данных о протекающих процессах.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА И МОДЕЛИ

Экспериментальное исследование проводилось на учебно-исследовательском теплофизическом стенде, принципиальная схема которого приведена на рис. 1. Стенд представляет собой гидравлически замкнутый контур. В качестве теплоносителя используется вода из центральной системы холодного водоснабжения, очищенная с помощью механического фильтра с размером фильтрующей ячейки 5 мкм.

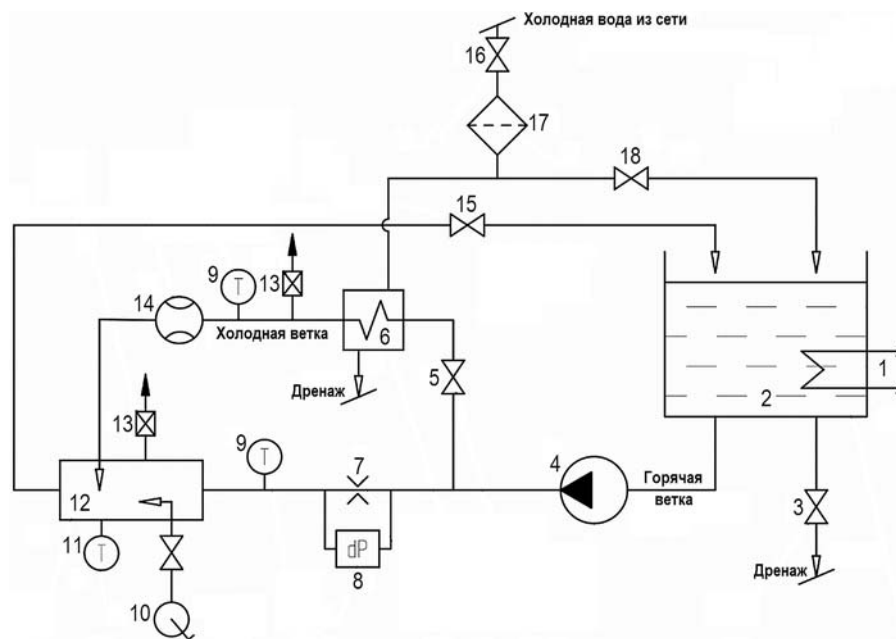


Рис. 1. Гидравлическая схема экспериментального стенда; 1 – трубчатый электронагреватель (ТЭН); 2 – бак со свободным уровнем жидкости; 3, 5, 15, 16, 18 – вентиль; 4 – насос; 6 – холодильник; 7 – СУ; 8 – датчик перепада давления; 9 – термомпара; 10 – дозатор трассера; 11 – блок термопар; 12 – экспериментальная модель; 13 – воздушник; 14 – ротаметр; 17 – фильтр механический

Теплоноситель, нагретый трубчатым электронагревателем (поз. 1) в баке (поз. 2) до требуемой температуры, поступает на всас насоса (поз. 4). Двигаясь по напорному трубопроводу, поток теплоносителя разделяется на «холодный» и «горячий». «Холодный» поток последовательно проходит регулирующий вентиль (поз. 5), холодильник (поз. 6) и поступает в экспериментальную модель (поз. 12). «Горячий» поток, попадая в экспериментальную модель, смешивается с «холодным», после чего, пройдя регулирующий вентиль (поз. 15), направляется в бак.

Измерение температуры на входе «горячего» и «холодного» потоков теплоносителя в модель осуществлялось хромель-алюмелевыми термопарами КТХА-02.01 с диаметром чувствительной части 1 мм. Погрешность измерения $\pm 1^\circ\text{C}$. Для измерения расхода «холодного» потока применен ротаметр LZM-8Т с диапазоном измерения 0,1 – 2 л/мин и точностью $\pm 5\%$. Регистрация расхода «горячего» потока осуществляется методом измерения перепада давления на сужающем устройстве (СУ). В качестве первичного преобразователя применен датчик EJX110А. Приведенная погрешность данного метода во всем диапазоне исследованных расходов не превышает 1,5%.

Экспериментальная модель (рис. 2) представляет собой тройниковый узел, состоящий из основной (поз. 2) и периферийной (поз. 3) труб, направляющего (поз. 1) и выходного (поз. 5) фланцев, крепежных и прочих элементов. Исследуемая часть модели изготовлена из оргстекла. В направляющем фланце выполнен диффузор с углом раскрытия 40° . Расстояние от диффузора до передней кромки периферийной трубы составляет $140 \pm 0,5$ мм. Угол наклона периферийной трубы по отношению к основной – 18° . Расстояние от среза периферийной трубы до внутренней стенки основной – 9,3 мм. По результатам контрольных измерений абсолютная погрешность установки периферийной трубы составила 0,5 мм.

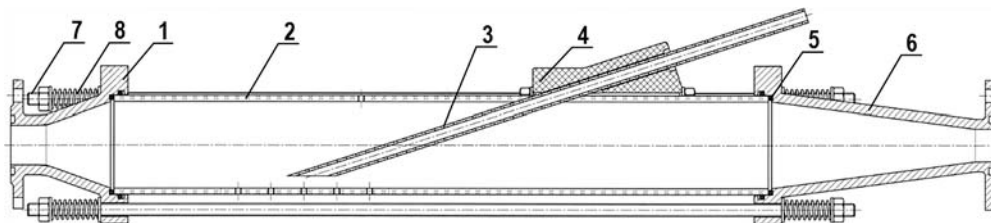


Рис.2. Экспериментальная модель: 1 – направляющий фланец; 2 – основная труба; 3 – периферийная труба; 4 – бандаж; 5 – прокладка; 6 – выходной фланец; 7 – шпилька; 8 – пружина

Проточная часть экспериментальной модели геометрически подобна объекту исследования высокотемпературного стенда НГТУ. Коэффициент геометрического подобия $K = 4/3$. В дальнейшем под «натурным» объектом и «натурными» теплофизическими параметрами следует понимать объект исследования и параметры высокотемпературного стенда [16, 17].

ЭКСПЕРИМЕНТ

Экспериментальное исследование структуры потока осуществлялось визуальным методом посредством точечного впрыска контрастного трассера в основную и периферийную трубы. В качестве трассера применены канцелярские чернила, разведенные водой в соотношении 1:1. Видеофиксация осуществлялась с помощью камеры NikonCoolpixP600. Разрешение видеосъемки составило 1920×1080 точек (пикселей) с частотой 30 кадров в секунду. Видеосъемка производилась в затемненном помещении с подсветкой исследуемой области экспериментального участка рассеянным светом.

Впрыск трассера осуществлялся последовательно в четырех точках с помощью капилляра наружным диаметром 0,9 мм. Рабочий конец капилляра длиной 1 мм согнут под прямым углом. Выходное отверстие ориентировано по направлению потока. В модели реализованы два способа инъекции трассера:

- точечный впрыск в основную трубу Ду70 (точки впрыска совпадают с местами установки термопар $t_{f1} - t_{f3}$);
- точечный впрыск в периферийную трубу за пределами исследуемой области экспериментальной модели (точка впрыска совпадает с местом установки термопары t_{fx}). При этом способе трассер доставляется в зону смешения полным сече-

нием периферийной трубы.

Подача трассера осуществлялась автоматически с постоянным расходом при помощи устройства-дозатора, разработанного авторами. Приняв плотность инжестируемых в модель чернил, равную $1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, можно заключить, что расчетный массовый расход трассера лежал в диапазоне от $1,1 \cdot 10^{-5}$ до $7,9 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}$ при продолжительности впрыска до 100 с. Отношение расхода трассера к расходу теплоносителя ($G_{\text{Тр}} / G_{\text{Т}}$) составило от $7 \cdot 10^{-3}$ до $1,2 \cdot 10^{-1}\%$. Данное обстоятельство позволяет не принимать во внимание влияние инжестируемой массы трассера на изучаемые процессы гидродинамики и теплообмена.

Одновременно с визуализацией процесса смешения осуществлялась регистрация пульсаций температуры. Схема расположения термопреобразователей и точек впрыска трассера в модели приведена на рис. 3. Затеснение проходного сечения при этом не превышало 0,2%.

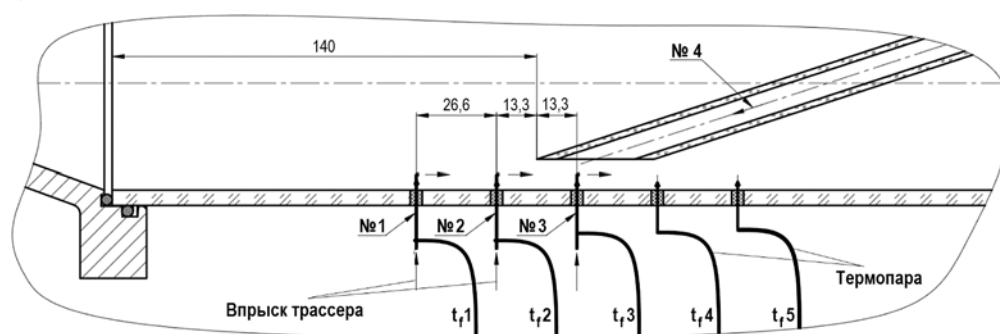


Рис. 3. Точки впрыска трассера

Измерение температурного состояния модели в зоне смешения потоков теплоносителя осуществлялось с применением малоинерционных хромель-алюмелевых термопар, изготовленных из кабеля КТМС с диаметром чувствительной части 0,5 мм. Погрешность измерения температуры данными датчиками составляет $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Общая погрешность эксперимента, полученная на основании оценки погрешностей всех основных параметров потока и погрешности изготовления отдельных элементов установки, составила 9,5%.

Применение оргстекла в составе экспериментальной модели ограничивает температуру теплоносителя, что обусловлено прочностными характеристиками данного материала. Поэтому верхней границей температуры принята величина 80°C . Низкая температура «горячего» потока затрудняет выполнение вязкостного подобия при выборе скоростей смешиваемых потоков. Для моделирования используется число Струхаля Sh в записи для неперiodических процессов

$$Sh = D_{\Gamma} / (T \cdot w), \quad (1)$$

в котором D_{Γ} – гидравлический диаметр; T – характерное время процесса; w – характерная скорость потока. Тогда

$$\langle w_{\text{м}} \rangle / \langle w_{\text{н}} \rangle = [D_{\Gamma\text{м}} / (Sh_{\text{м}} \cdot T)] / [D_{\Gamma\text{н}} / (Sh_{\text{н}} \cdot T)] = D_{\Gamma\text{м}} / D_{\Gamma\text{н}} = K, \quad (2)$$

где $\langle w \rangle$ – среднерасходная скорость потока (индексы «м» и «н» относятся к «модельному» и «натурному» эксперименту соответственно). Таким образом, с учётом соотношения (2) и осредненных величин скоростей потоков теплоносителя в «натурном» эксперименте, определены диапазоны режимных параметров исследования: температура «горячего» потока ($t_{\text{г}}^{\text{I}}$) $70 - 80^\circ\text{C}$; температура «холодного» потока ($t_{\text{х}}^{\text{I}}$) $20 - 23^\circ\text{C}$; массовая скорость «горячего» потока ($\rho w_{\text{г}}$) $174,4 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$. Величина

массовой скорости «холодного» потока (ρw_x) варьировалась в диапазоне от 198,5 до 330,9 кг/(с·м²) с шагом 33,1 кг/(с·м²).

Регистрация и обработка сигналов датчиков температуры и расхода в ходе эксперимента осуществлялась измерительно-вычислительным комплексом (ИВК) на базе блока коммутации и измерения Agilent 34980Аи ЭВМ. Функционирование ИВК обеспечивает программный комплекс «Дата процессор 4.1 ИЯЭиТФ», разработанный коллективом авторов. Программный комплекс позволяет осуществлять мониторинг и управление процессом эксперимента, запись временных реализаций требуемых параметров в файл, а также расчет статистических и спектрально-корреляционных характеристик измеряемых динамических параметров в режиме реального времени. Для оперативной обработки изображений (в части поиска вихревых структур) разработан и апробирован алгоритм на основе технологии нейронных сетей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате экспериментального исследования получены фрагменты видеозаписи процесса неизотермического смешения потоков теплоносителя в тройниковом узле типа «встречный впрыск». Каждый фрагмент продолжительностью до 200 секунд покадрово анализировался с целью обнаружения вихревых структур в зоне смешения. Изображения, содержащие вихри, были отобраны и использованы для обучения нейронной сети. Применение программного средства на основе данного инструмента позволило существенно снизить время обработки большого массива визуальной информации. Релевантность поиска изображений, содержащих вихри, при дальнейшей обработке фрагментов видеозаписи составила в среднем более 80%.

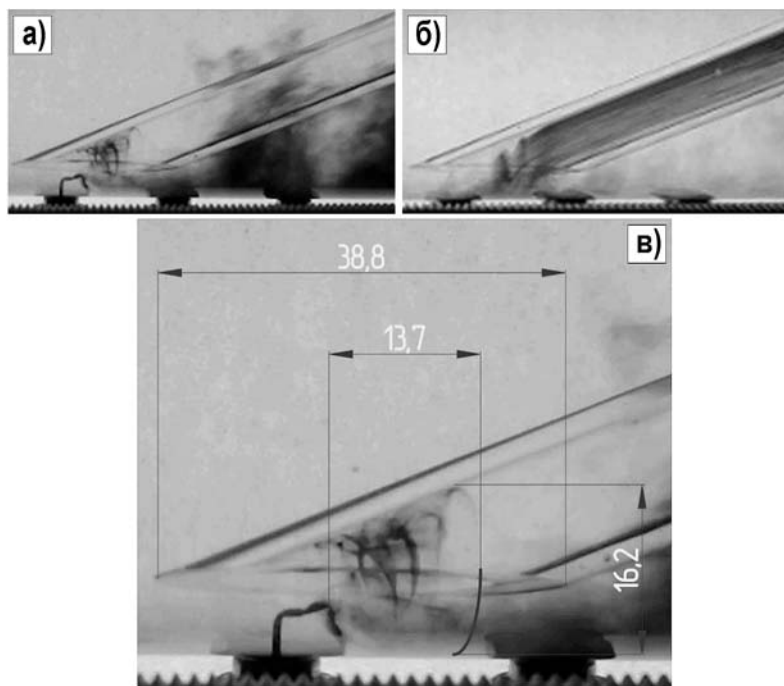


Рис. 4. Визуализация процесса смешения: а) – впрыск трассера в точке 3; б) – впрыск трассера в точке 4; в) – геометрические характеристики вихревых структур

Анализ изображений, полученных при вариантах инъекции трассера в точках № 1 и № 2, не позволил установить каких-либо значимых характеристик структуры потока. По мере движения от точки впрыска в зону размещения среза периферийной трубы кон-

трастность трассера в потоке существенным образом снижалась за счет активного смешения с основным потоком теплоносителя. Наиболее показательными с точки зрения обнаружения вихревых структур оказались эксперименты, в которых впрыск трассера осуществлялся в точках № 3 и № 4 (рис. 4 а,б). Установлено, что под срезом периферийной трубы образуется каскад вихрей, состоящий из трёх – пяти вихревых колец. Плоскость тороидальных вихревых структур перпендикулярна направлению движения основного потока теплоносителя. Характерные геометрические характеристики вихревых структур приведены на рис. 4в.

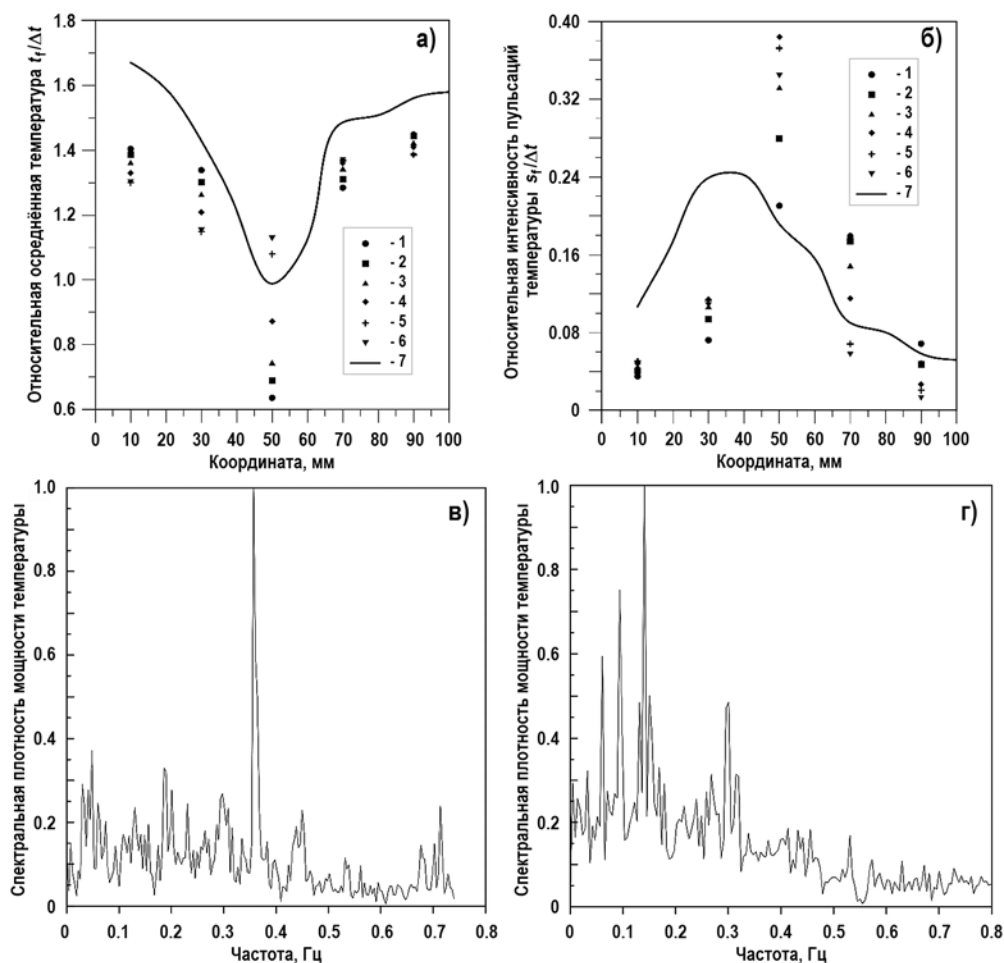


Рис. 5. Статистические и спектральные характеристики температурного поля: а) – профиль относительной температуры потока $t_f/\Delta t$; б) – профиль относительной интенсивности температурных пульсаций в потоке теплоносителя $s_f/\Delta t$; [1 – 6 – модельный эксперимент при различных ri_x (в порядке убывания); 7 – натуральный эксперимент при $t_f^I = 285^\circ\text{C}$, $t_f^X = 35^\circ\text{C}$, $\rho_{fI} = 99,7 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$, $\rho_{fX} = 137,5 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$]; в) – характерная спектральная плотность мощности температуры (натурный эксперимент); г) – характерная спектральная плотность мощности температуры (модельный эксперимент)

В ходе исследования получены экспериментальные реализации температуры, зарегистрированные термопарами $t_{f1} - t_{f5}$. Определены осредненный во времени профиль температуры потока (рис. 5а) в зоне смешения, профиль интенсивности пульсаций температуры (рис. 5б), спектральная плотность термопульсаций.

Из представленных на рис. 5а,б статистических характеристик видно качественное, а в ряде случаев и количественное совпадение данных с результатами экспериментов при значительно более высоких значениях градиента температуры. Спектральная плот-

ность мощности пульсаций температуры непосредственно под периферийной трубой в зоне интенсивного вихреобразования для натурального и модельного экспериментов имеет вид, показанный на рис. 5в,г. Основная энергия спектра сгруппирована в полосе частот от 0 до 1 Гц и имеет характерные пики в области частот от 0,15 до 0,4 Гц.

Реализации температуры потока перед передней кромкой периферийной трубы имеют характерные «провалы» относительно превалирующего среднего значения. Похожий характер пульсаций наблюдается и в эксперименте на высокотемпературном стенде. Величина провалов и их частота указывают на то, что наблюдаемые пульсации обусловлены внутренними причинами протекающих процессов, а не шумовым загрязнением сигналов датчиков. Подобный эффект, как показала визуализация процесса смешения, связан с «забросом» «холодного» потока из периферийной трубы во фронтальную относительно передней кромки трубы область. Частота провалов на реализации температуры совпадает с частотой вовлечения части холодного потока в обозначенную область.

Анализ взаимно корреляционной функции пульсаций расхода «холодного» потока теплоносителя и термопульсаций не позволил установить взаимосвязь между этими процессами. Данное явление обусловлено гидродинамической неустойчивостью основного потока теплоносителя в рассмотренной области, например, флуктуациями зоны отрывного течения на выходе из диффузора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование теплогидравлических характеристик потока однофазного теплоносителя в модели тройникового узла на экспериментальном стенде. На основании визуального наблюдения установлены особенности процесса смешения потоков теплоносителя при неизотермических условиях посредством точечного введения контрастного трассера. Определены масштабы вихревых структур, необходимые для количественной и качественной оценок результатов численного моделирования.

Исследованы пульсации температуры потока, обусловленные смешением теплоносителей в условиях градиента температуры, осредненные статистические характеристики температурного поля. Проведен сравнительный анализ результатов экспериментального исследования с результатами экспериментов на высокотемпературном теплофизическом стенде НГТУ. Показано количественное и качественное совпадение данных.

По результатам исследования можно сделать вывод о том, что вопрос наблюдения вихревых структур в зоне смешения неизотермических потоков теплоносителя остается на сегодняшний день актуальным и требует дальнейшего изучения. Внимания заслуживает определение частотных характеристик вихревых структур. Видеофиксацию процесса смешения теплоносителей при этом необходимо производить с использованием высокоскоростных исследовательских видеокамер.

Перспективным шагом дальнейших исследований является моделирование процесса смешения с соблюдением равенства чисел Рейнольдса и проведение сравнительного анализа с результатами настоящего исследования. Интерес вызывает проверка влияния угла раскрытия отрывного диффузора на частоту образования вихрей, а также исследование течения с безотрывным диффузором.

Следует отметить, что для анализа экспериментальных данных ввиду их колоссального массива рационально применять технологии машинного обучения на основе нейронных сетей.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2021-0008).

Литература

1. *Abib E., Bergholz S., Rudolph J.* German experiences in local fatigue monitoring. // *International Journal for Nuclear Power*. – 2013. – Vol. 58. – PP. 284-289.
2. *Chapuliot S., Gourdin C., Payen T., Magnaud J.P., Monavon A.* Hydro-thermal-mechanical analysis of thermal fatigue in a mixing tee. // *Nuclear Engineering and Design*. – 2005. – Vol. 235. – PP. 575-596. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2004.09.011>.
3. *Faidy C.* High Cycle Thermal Fatigue: Lessons Learned From Civaux Event. / In: *Materials Reliability Program: Second International Conference on Fatigue of Reactor Components (MRP-84)*, July 29-August 1, 2002, Snowbird, Utah. – 2002.
4. *Судаков А.В., Трофимов А.С.* Пульсации температур и долговечность элементов энергооборудования. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.
5. *Судаков А.В., Трофимов А.С.* Напряжения при пульсациях температур. – М.: Атомиздат, 1980. – 64 с.
6. *Будов В.М., Дмитриев С.М.* Форсированные теплообменники ЯЭУ. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 174 с.
7. НП-054-04. Нормы расчета на прочность элементов оборудования и трубопроводов для судовых атомных паропроизводящих установок с водо-водяными реакторами. – М.: Ростехнадзор России, 2004.
8. *Jhung M.J.* Assessment of thermal fatigue in mixing tee by FSI analysis. // *Nuclear Engineering and Technology*. – 2013. – Vol. 45. – PP. 99-106. DOI: <https://doi.org/10.5516/NET.09.2012.026>.
9. *Mahaffy J., Chung B., Dubois F., Ducros F., Graffard E., Heitsch M., Henriksson M., Komen E., Moretti F., Morii T., Muhlbauer P., Rohde U., Scheuerer M., Smith B. L., Song C., Watanabe T., Zigh G.* Best practice guidelines for the use of CFD in nuclear reactor safety applications. / NEA/CSNI/R(2007)5. – 2007. Электронный ресурс: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/037/44037877.pdf?r=1 (дата доступа 05.10.2022).
10. *Smith B. L.* Assessment of CFD codes used in nuclear reactor safety simulations. // *Nuclear Engineering and Technology*. – 2010. – Vol. 42. – PP. 339-364. DOI: <https://doi.org/10.5516/NET.2010.42.4.339>.
11. *Smith B. L., Andreani M., Bieder U., Ducros F., Graffard E., Heitsch M., Henriksson M., Hohne T., Houkema M., Komen E., Mahaffy J., Menter F., Moretti F., Morii T., Muhlbauer P., Rohde U., Scheuerer M., Song C.H., Watanabe T., Zigh G.* Assessment of CFD Codes for Nuclear Reactor Safety Problems – revision 2 / OECD/NEA/CSNI/R(2014) 12. – 2015. Электронный ресурс: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/46/066/46066598.pdf?r=1 (дата доступа 05.10.2022).
12. *Smith B. L., Bestion D., Hassan Y.* Experiments and CFD Code Applications to Nuclear Reactor Safety (XCFD4NRS). // *Special Issue: Nuclear Engineering and Design*. – 2010. – Vol. 240. – PP. 2075-2382. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.06.037>.
13. *Wakamatsu M., Nei H., Hashiguchi K.* Attenuation of temperature fluctuations in thermal striping. // *Journal of Nuclear Science and Technology*. – 1995. – Vol. 32. – PP. 752-762. DOI: <https://doi.org/10.1080/18811248.1995.9731770>.
14. *Beaufils R., Courtin S.* Analysis of the Father Experiment with an Engineering Method Devoted to High Cycle Thermal Fatigue. / In: *Proc. of the ASME 2011 Pressure Vessels & Piping Conference (PVP 2011)*, July 17-21, 2011, Baltimore, Maryland, USA. – 2011. DOI: <https://doi.org/10.1115/PVP2011-57630>.
15. *Бесчеров Д.Е., Большухин М.А., Козин А.В., Лебедев В.В., Панов В.А., Пахомов В.А., Свешников Д.Н., Шишулин Д.Н., Легчанов М.А., Рязанов Р.Р.* Верификация методики расчета усталостной прочности оборудования реакторных установок при нестационарных термоциклических нагрузках // *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. – 2019. – № 1 (124). – С. 81-91. DOI: https://doi.org/10.46960/1816-210X_2019_1_81.
16. *Дмитриев С.М., Мамаев А.В., Рязанов Р.Р., Соборнов А.Е., Котин А.В., Большухин*

М.А., Бесчеров Д.Е. Экспериментальные исследования температурных пульсаций при смешении неизотермических потоков теплоносителя в элементах оборудования ЯРУ // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2019. – № 2. – С. 117-127. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2019.2.10>.

17. Дмитриев С.М., Рязанов Р.Р., Мамаев А.В., Соборнов А.Е., Котин А.В., Легчанов М.А., Львов А.В. Измерение температурного и напряженно-деформированного состояний трубного образца при воздействии локальных стохастических температурных пульсаций. // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10. – № 1. – С. 53-60.

18. Courtin S. High Cycle Thermal Fatigue Damage Prediction in Mixing Zones of Nuclear Power Plants: Engineering Issues Illustrated on the FATHER Case. // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 66. – PP. 240-249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.079>.

19. Miyoshi K., Kamaya M., Utanohara Y., Nakamura A. An investigation of thermal stress characteristics by wall temperature measurements at a mixing tee. // Nuclear Engineering and Design. – 2016. – Vol. 298. – PP. 109 – 120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.12.004>.

20. Braillard O., Edelin D. Advanced experimental tools designed for the assessment of the thermal load applied to the mixing tee and nozzle geometries in the PWR plant. / In: Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications, ANIMMA 2009, June 7-10, 2009, Marseille, France. – 2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/ANIMMA.2009.5503718>.

21. Chen M.S., Hsieh H.E., Ferng Y.M., Pei B.S. Experimental observations of thermal mixing characteristics in T-junction piping. // Nuclear Engineering and Design. – 2014. – Vol. 276. – PP. 107-114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.03.052>.

22. Kamide H., Igarashi M., Kawashima S., Kimura N., Hayashi K. Study on mixing behavior in a tee piping and numerical analyses for evaluation of thermal striping. // Nuclear Engineering and Design. – 2009. – Vol. 239. – PP. 58-67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.09.005>.

23. Kuschewski M. Development and application of flow measurement methods for the investigation of near-wall temperature fields. – Doctoral Dissertation. – University of Stuttgart, 2015. – No: D93.

24. Большухин М.А., Знаменская И.А., Свешников Д.Н., Фомичев В.М. Термографическое исследование турбулентных пульсаций воды при неизотермическом смешении. // Автометрия. – 2014. – № 5. – С. 75-83. Электронный ресурс: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/50e/50ec77015b0e7a9a575e6f4ff3a24e00.pdf> (дата доступа 05.10.2022).

25. Знаменская И.А., Коротеева Е.Ю., Новинская А.М., Сысоев Н.Н. Особенности спектров турбулентных пульсаций струйных затопленных течений воды. // Письма в журнал технической физики. – 2016. – Т. 42, – № 13. – С. 51-57. Электронный ресурс: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/43399> (дата доступа 05.10.2022).

Поступила в редакцию 07.10.2022 г.

Авторы

Рязанов Ренат Рамильевич, младший научный сотрудник

E-mail: ryazapov.renat.r@yandex.ru

Соборнов Алексей Евгеньевич, младший научный сотрудник

E-mail: wisestjedi@mail.ru

Дмитриев Сергей Михайлович, ректор, профессор, д-р техн. наук

E-mail: dmitriev@nntu.ru

Мацин Никита Владимирович, аспирант

E-mail: lebron.09@mail.ru

Котин Андрей Валерьевич, инженер

E-mail: an.kotin@yandex.ru

UDC 621.039

EXPERIMENTAL STUDIES INTO THE NON-ISOTHERMAL MIXING OF INCOMPRESSIBLE LIQUID COUNTERFLOWS IN A Y-JUNCTION

Ryazapov R.R., Sobornov A.E., Dmitriev S.M., Matsin N.V., Kotin A.V.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
24 Minin Str., 603950 Nizhny Novgorod, Russia

ABSTRACT

The processes involved in non-isothermal mixing of coolant flows in the power equipment components at water-cooled reactor plants are accompanied by thermal pulsations, the intensity of which can reach values leading to fatigue failure. Using numerical methods allows one to obtain the thermal pulsation characteristics required to assess the equipment life. The calculation results, however, need to be validated based on the experimentally obtained fields of the fluid's thermal and hydrodynamic parameters. The flow structure during non-isothermal mixing in a Y-junction was studied experimentally to get an idea about the thermal pulsation occurrence mechanism and characteristics.

The experimental facility is a hydraulically closed circuit with water used as the coolant. The experimental model is geometrically similar to the section that forms part of a high-temperature test bench for investigation of the thermal cyclic load effects on the lifetime of the power equipment structural materials. The model is a Y-junction composed of the main pipe and an angled peripheral pipe with the "counter injection" of coolant flows. The geometrical similarity coefficient is 4/3. The model material is transparent organic glass. The flow structure was visualized through the injection into the flow of ink with the density similar to that of the coolant flow. The tracer was injected sequentially at four points with video records made of the mixing process with a frequency of 30 Hz. Thermocouples were used to measure the temperature.

The mixing process video records were synchronized with the experimental temperature field recording. The formation of the vortexes in the mixing zone was tracked. The vortex scales, the time-averaged flow temperature profiles, and the thermal pulsation intensity profiles were determined. A combined analysis of the flow structure and temperature fields made it possible to explain the nature of thermal pulsations in the frontal region relative to the peripheral pipe.

Key words: temperature pulsations, thermal pulsations, coolant, non-isothermal mixing, lifetime, durability, tracer, coolant, power facility, Y-junction.

Ryazapov R.R., Sobornov A.E., Dmitriev S.M., Matsin N.V., Kotin A.V. Experimental Studies into the Non-Isothermal Mixing of Incompressible Liquid Counterflows in a Y-junction. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023, no. 1, pp. 57-69; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.1.05> (in Russian).

REFERENCES

1. Abib E., Bergholz S., Rudolph J. German Experiences in Local Fatigue Monitoring. *International Journal for Nuclear Power*. 2013, v. 58, pp. 284-289.
2. Chapuliot S., Gourdin C., Payen T., Magnaud J.P., Monavon A. Hydro-Thermal-Mechanical Analysis of Thermal Fatigue in a Mixing Tee. *Nuclear Engineering and Design*. 2005, v. 235, pp. 575-596; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2004.09.011>.
3. Faigy C. High Cycle Thermal Fatigue: Lessons Learned From Civaux Event. In: *Materials Reliability Program: Second International Conference on Fatigue of Reactor Components (MRP-84)*, July 29-August 1, 2002, Snowbird, Utah. – 2002.

4. Sudakov A.V., Trofimov A.S. *Temperature Pulsations and Durability of Power Equipment Elements*. Leningrad. Energoatomizdat Publ., 1989, 176 p. (in Russian).
5. Sudakov A.V., Trofimov A.S. *Stresses at Temperature Pulsations*. Moscow. Atomizdat Publ., 1980, 64 p. (in Russian).
6. Budov V.M., Dmitriev S.M. *Forced Heat Exchangers of Nuclear Power Plants*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1989, 174 p. (in Russian).
7. NP-054-04. *Norms for Calculating the Strength of Equipment Elements and Pipelines for Ship Nuclear Steam Generating Plants with Pressurized Water Reactors*. Moscow. Rostekhnadzor Rossii Publ., 2004 (in Russian).
8. Jung M.J. Assessment of Thermal Fatigue in Mixing Tee by FSI Analysis. *Nuclear Engineering and Technology*. 2013, v. 45, pp. 99-106; DOI: <https://doi.org/10.5516/NET.09.2012.026>.
9. Mahaffy J., Chung B., Dubois F., Ducros F., Graffard E., Heitsch M., Henriksson M., Komen E., Moretti F., Morii T., Muhlbauer P., Rohde U., Scheuerer M., Smith B. L., Song C., Watanabe T., Zigh G. *Best Practice Guidelines for the Use of CFD in Nuclear Reactor Safety Applications*. NEA/CSNI/R(2007) 5. 2007. Available at: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/037/44037877.pdf?r=1 (accessed Oct. 05, 2022).
10. Smith B.L. Assessment of CFD Codes Used in Nuclear Reactor Safety Simulations. *Nuclear Engineering and Technology*. 2010, v. 42, pp. 339-364; DOI: <https://doi.org/10.5516/NET.2010.42.4.339>.
11. Smith B.L., Andreani M., Bieder U., Ducros F., Graffard E., Heitsch M., Henriksson M., Hohne T., Houkema M., Komen E., Mahaffy J., Menter F., Moretti F., Morii T., Muhlbauer P., Rohde U., Scheuerer M., Song C.H., Watanabe T., Zigh G. *Assessment of CFD Codes for Nuclear Reactor Safety Problems – Revision 2*. OECD/NEA/CSNI/R(2014) 12. 2015. Available at: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/46/066/46066598.pdf?r=1 (accessed Oct. 05, 2022).
12. Smith B.L., Bestion D., Hassan Y. Experiments and CFD Code Applications to Nuclear Reactor Safety (XCFD4NRS). *Special Issue: Nuclear Engineering and Design*. 2010, v. 240, pp. 2075-2382; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.06.037>.
13. Wakamatsu M., Nei H., Hashiguchi K. Attenuation of Temperature Fluctuations in Thermal Striping. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 1995, v. 32, pp. 752-762; DOI: <https://doi.org/10.1080/18811248.1995.9731770>.
14. Beaufils R., Courtin S. Analysis of the FATHER Experiment with an Engineering Method Devoted to High Cycle Thermal Fatigue. In: *Proc. of the ASME 2011 Pressure Vessels & Piping Conference (PVP 2011)*, July 17-21, 2011, Baltimore, Maryland, USA. 2011; DOI: <https://doi.org/10.1115/PVP2011-57630>.
15. Bescherov D.E., Bolshukhin M.A., Kozin A.V., Lebedev V.V., Panov V.A., Pakhomov V.A., Sveshnikov D.N., Shishulin D.N., Legchanov M.A., Ryazapov R.R. Verification of the Methodology for Calculating the Fatigue Strength of Reactor Plant Equipment Under Nonstationary Thermocyclic Loads. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2019, no. 1 (124), pp. 81-91 (in Russian).
16. Dmitriev S.M., Mamaev A.V., Ryazapov R.R., Sobornov A.E., Kotin A.V., Bescherov D.E., Bolshukhin M.A. Experimental Studies of Temperature Pulsations During the Process of Mixing Non-Isothermal Coolant Flows in Nuclear Reactor Equipment Components. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2019, no. 2, pp. 117-127; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2019.2.10> (in Russian).
17. Dmitriev S.M., Ryazapov R.R., Mamaev A.V., Sobornov A.E., Kotin A.V., Legchanov M.A., Lvov A.V. Measuring the Temperature and Stress-Strain States of a Tube Sample under the Local Stochastic Temperature Pulsations. *Pribory i Metody Izmerenij*. 2019, v. 10, no. 1, pp. 53-60; DOI: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2019-10-1-53-60> (in Russian).
18. Courtin S. High Cycle Thermal Fatigue Damage Prediction in Mixing Zones of Nuclear Power Plants: Engineering Issues Illustrated on the FATHER Case. *Procedia Engineering*. 2013, v. 66, pp. 240-249; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.079>.

19. Miyoshi K., Kamaya M., Utanohara Y., Nakamura A. An Investigation of Thermal Stress Characteristics by Wall Temperature Measurements at a Mixing Tee. *Nuclear Engineering and Design*. 2016, v. 298, pp. 109-120; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.12.004>.

20. Braillard O., Edelin D. Advanced Experimental Tools Designed for the Assessment of the Thermal Load Applied to the Mixing Tee and Nozzle Geometries in the PWR Plant. In: *Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications, ANIMMA 2009*, June 7-10, 2009, Marseille, France. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/ANIMMA.2009.5503718>.

21. Chen M.S., Hsieh H.E., Ferng Y.M., Pei B.S. Experimental Observations of Thermal Mixing Characteristics in T-junction Piping. *Nuclear Engineering and Design*. 2014, v. 276, pp. 107-114; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.03.052>.

22. Kamide H., Igarashi M., Kawashima S., Kimura N., Hayashi K. Study on Mixing Behavior in a Tee Piping and Numerical Analyses for Evaluation of Thermal Striping. *Nuclear Engineering and Design*. 2009, v. 239, pp. 58-67; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.09.005>.

23. Kuschewski M. *Development and Application of Flow Measurement Methods for the Investigation of Near-Wall Temperature Fields*. Doctoral Dissertation, University of Stuttgart, 2015. No: D93.

24. Bolshukhin M.A., Znamenskaya I.A., Sveshnikov D.N., Fomichev V.M. Thermographic Research of Turbulent Water Pulsations at Non-Isothermal Mixing. *Avtometriya*. 2014, no. 5, pp. 75-83. Available at: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/50e/50ec77015b0e7a9a575e6f4ff3a24e00.pdf> (accessed Oct. 05, 2022) (in Russian).

25. Znamenskaya I.A., Koroteeva E.Yu., Novinskaya A.M., Sysoev N.N. Features of Turbulent Pulsations Spectra of Submerged Jet Water Flows. *Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki*. 2016, v. 42, no. 13, pp. 51-57. Available at: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/43399> (accessed Oct. 05, 2022) (in Russian).

Authors

Rayzapov Renat Ramilievich, Junior Researcher Assistant
E-mail: ryazapov.renat.r@gmail.com

Sobornov Aleksey Evgenievich, Junior Researcher Assistant
E-mail: wisestjedi@mail.ru

Dmitriev Sergey Mikhaylovich, Rector, Professor, Dr.Sci. (Engineering)
E-mail: dmitriev@nntu.nnov.ru

Matsin Nikita Vladimirovich, PhD Student
E-mail: lebron.09@mail.ru

Kotin Andrey Valerievich, Engineer
E-mail: an.kotin@yandex.ru