
**ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ**

**ПЕРЕМЕШИВАНИЕ РАЗНОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОТОКОВ
ЖИДКОГО НАТРИЯ В ТРУБОПРОВОДЕ ЗА ТРОЙНИКОМ**

© 2023 г. **И. В. Колесниченко^а, Р. И. Халилов^а, А. В. Шестаков^а, А. Н. Крылов^б, В. В. Пахолков^б,
А. М. Павлинов^а, А. Д. Мамыкин^а, *, А. Ю. Васильев^а, С. А. Рогожкин^б, П. Г. Фрик^а**

^а*Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Академика Королева, д. 1, г. Пермь, 614013 Россия*

^б*Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова,
Бурнаковский проезд, д. 15, г. Нижний Новгород, 603074 Россия*

*e-mail: mad@icmm.ru

Поступила в редакцию 29.06.2022 г.

После доработки 16.08.2022 г.

Принята к публикации 30.08.2022 г.

Выполнены экспериментальные исследования процесса смешения двух разнотемпературных потоков натриевого теплоносителя в Т-образном соединении цилиндрических каналов (тройнике). Измерения проведены для двух сочетаний расходов и температур горячего и холодного натрия. Основным результатом экспериментов являются характеристики пульсаций температуры как в потоке натрия, так и на наружной поверхности труб тройника. Спектральный анализ сигналов термопар, расположенных на оси трубы в зоне смешения, показал, что поток во всех случаях является турбулентным. Средняя температура поверхности трубы в режиме 1 (расход холодного натрия составляет приблизительно половину расхода горячего) в зоне наблюдений монотонно возрастает по мере удаления от бокового (холодного) патрубка вниз по потоку, как и интенсивность пульсаций температуры. В режиме 2 (расход холодного натрия сопоставим с расходом горячего) имеется небольшой провал температуры в середине области наблюдений, свидетельствующий о наличии в данной области стационарного возвратного вихря. В режиме 2 уровень пульсаций ниже, чем в режиме 1, и сохраняется во всей области измерений. Амплитуда пульсаций температуры на поверхности тройника существенно ниже, чем в потоке, но структура спектров Фурье подобна. С помощью тепловизора визуализированы вариации поля температуры на поверхности тройника, проявляющиеся в виде возникающих и мигрирующих с потоком областей с повышенной амплитудой пульсаций температуры. Процесс не является регулярным и не свидетельствует о наличии на стенке периодических колебаний температуры. Пространственно-временная структура поля пульсаций температуры проанализирована методами вейвлет-анализа, позволяющими идентифицировать нестационарные квазипериодические пульсации в определенной области канала и в определенном интервале частот.

Ключевые слова: жидкометаллический теплоноситель, реактор на быстрых нейтронах, натриевый контур, смешение разнотемпературных потоков, тройник, тепловизор, турбулентность, теплообмен, термоциклическая усталость

DOI: 10.56304/S0040363623030025

Повышение безопасности эксплуатируемых и проектируемых реакторных установок является одной из основных задач в отрасли. Несмотря на действующие консервативные подходы к обеспечению безопасности при проектировании и изготовлении оборудования, во время эксплуатации реакторной установки на быстрых нейтронах (РУ БН) были зафиксированы случаи разгерметизации оборудования и трубопроводных систем, приводящие к истечению натриевого теплоносителя.

В октябре 1993 г. на РУ БН-600 на Белоярской АЭС произошла течь натрия в тройнике системы

очистки теплоносителя I контура [1]. Причиной послужило воздействие на тройник пульсаций температур, возникших в результате смешения разнотемпературных потоков натрия. Термоциклическая усталость материала стенок тройника привела к его разгерметизации. С аналогичной проблемой столкнулись и на французском реакторе Phenix, где после 90000 ч работы произошла разгерметизация главных трубопроводов двух из трех петель II контура в месте расположения сварного соединения [2]. На расстоянии 160 мм от сварного соединения в главный трубопровод

был врезан патрубок меньшего диаметра, по которому подавался натрий, имеющий температуру на 90 К выше, чем в основном потоке. Попеременное воздействие более нагретого (горячего) и менее нагретого (холодного) теплоносителя привело к появлению течи. Данные инциденты свидетельствуют о недостаточной изученности процесса смешения неизотермических потоков натриевого теплоносителя в Т-образных соединениях труб и необходимости уделять особое внимание этому явлению при проектировании и эксплуатации РУ БН. Опасность течи из натриевых контуров связана с одной из особенностей натрия, а именно его высокой химической активностью по отношению к воздуху и воде. В мировой практике насчитывается немалое количество экспериментальных исследований по смешению разнотемпературных потоков, проводившихся в основном на воде [3–5]. Есть примеры экспериментов на сплаве Розе [6].

Гидродинамика и теплообмен натрия в условиях, характерных для РУ БН, имеют свои существенные особенности и отличия. К числу специфических свойств, присущих натриевому теплоносителю, относится его высокая теплопроводность, намного превышающая теплопроводность теплоносителей других типов, при сравнительно небольшом коэффициенте кинематической вязкости. Это означает, что молекулярный перенос тепла в жидком металле протекает интенсивнее, чем молекулярный перенос количества движения. Молекулярная теплопроводность в турбулентном потоке натрия дает основной вклад в поперечный перенос тепла не только в пристенном слое, но и в ядре потока [7]. Высокая теплопроводность натрия также обеспечивает значительные, по сравнению с водой или газом, коэффициенты теплоотдачи и малые перепады температуры между теплоносителем и поверхностью, что приводит к проникновению пульсаций температур в глубь стенки.

Исследование процесса теплопереноса в жидкометаллическом теплоносителе на эксплуатиру-

емых РУ не представляется возможным по следующим причинам: малое количество точек измерения, трудности по установке новых датчиков, опасность появления течи. Наиболее полную информацию о трехмерных процессах теплообмена можно получить с помощью методов вычислительной гидродинамики (CFD-коды), возможности которых расширились с появлением современных компьютерных технологий [8]. При таком подходе важным является вопрос верификации кодов на адекватность реализованных в них моделей реальным физическим процессам. Опыт создания экспериментальной базы данных для верификации CFD-кодов на задачах свободной конвекции натриевого теплоносителя [9–11] подтвердил значимость экспериментальных данных, полученных именно в экспериментах с натрием. Наиболее представительные для верификации CFD-кодов экспериментальные данные по перемешиванию разнотемпературных потоков теплоносителя возможно получить только на натриевых стендах, что и послужило причиной проведения данного исследования.

ЭСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования проводились на модели тройника. Модель представляла собой Т-образное перпендикулярное соединение прямых труб из нержавеющей стали (рис. 1), толщина стенки труб 1.45 мм, внутренний диаметр 39.5 мм. Горячий натрий циркулирует на проход, холодный натрий подводится через боковой подводящий трубопровод. Нестационарное турбулентное перемешивание разнотемпературных потоков жидкометаллического теплоносителя приводит к появлению температурных пульсаций в ядре потока, но отдельные вихри горячего и холодного натрия достигают внутренней поверхности трубопровода, что, в свою очередь, вызывает пульсации температуры в металлоконструкции тройника.

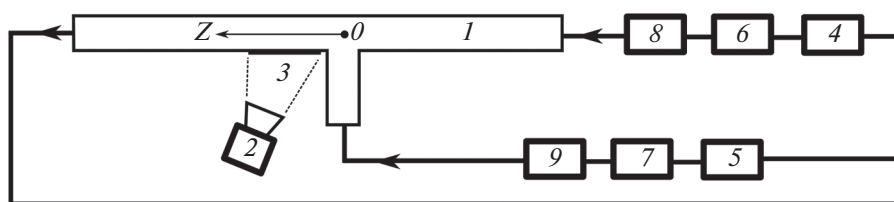


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки.

1 – тройник; 2 – тепловизор; 3 – область для измерения пульсаций температуры наружной поверхности тройника; 4 – нагреватель; 5 – холодный теплообменник; 6 – насос горячей ветки; 7 – насос холодной ветки; 8 – электромагнитный расходомер на горячей ветке; 9 – электромагнитный расходомер на холодной ветке; 0 – точка пересечения трубопроводов тройника

Значения параметров двух изученных режимов

Параметр	Режим 1	Режим 2
Расход, $\text{дм}^3/\text{с}$:		
в горячей ветке Q_{Γ}	1.04	0.92
в холодной ветке Q_{χ}	0.49	0.83
Число Рейнольдса Re в зоне смешения	48000	54000
Температура, К:		
в горячей ветке T_{Γ}	477	459
в холодной ветке T_{χ}	424	414
Среднесмешанная температура натрия $T_{\text{сс}}$, К	460	438

Выбранная толщина стенки модели тройника (меньшая, чем толщина стенок натриевых трубопроводов в стенде и реальных реакторах) обеспечивает пониженную тепловую инерционность, что позволяет получить достаточно контрастное поле температуры на внешней поверхности трубы. Тройник, как и основные трубопроводы натриевого контура, окружен воздушным тепловым кожухом, который прогревает контур перед заполнением и снижает тепловые потери при работе контура. Тепловой кожух представляет собой короб прямоугольного сечения 300×300 мм с трехслойными стенками металл – минеральная вата – металл толщиной 50 мм (металл – оцинкованная сталь толщиной 1 мм). В кожухе размещены два окна из селенида цинка, обеспечивающие пропускание инфракрасного (ИК) излучения и возможность использовать тепловизор для измерения пульсаций температуры в области на наружной поверхности тройника. Наружная поверхность каналов тройника и внутренняя поверхность кожухов покрыты термостойкой краской для повышения точности определения температуры. Конструкция кожухов и выбранный угол зрения позволяют изучать с помощью тепловизора конкретную область выходного патрубка тройника. Для исследования эволюции поля температуры на поверхности труб с натрием использовался тепловизор модели FLIR SC5000 со стандартным объективом для работы в ИК-диапазоне.

Тройник встроен в натриевый контур, разработанный в ИМСС УрО РАН [12] (см. рис. 1). В состав контура входят: нагреватель, конструктивно объединенный со своим расширительным баком, холодный теплообменник с воздушным охлаждением, конструктивно объединенный со своим расширительным баком. Течение жидкого натрия обеспечивалось коаксиальными электромагнитными насосами бегущего поля (горячей и холодной ветки) [13]. Расход жидкого натрия в каждой

ветке определялся электромагнитными расходомерами [14]. Температура натрия контролировалась погружными датчиками, установленными на входах в тройник, где также были размещены выравниватели потока (хонейкомбы).

Основной контур выполнен без механических клапанов и вентиляей, что позволило снизить его гидравлическое сопротивление. Элементы контура соединены трубопроводами из нержавеющей стали внутренним диаметром 68 мм. Вся регулировка расхода по каждой ветке контура осуществлялась с помощью электромагнитных насосов, обеспечивающих более устойчивое управление расходом в широком диапазоне значений. Контур окружен тепловым кожухом с системами термостабилизации и пожаротушения, а также снабжен системами хранения, заливки и очистки натрия, вакуумной и аргоновой системами.

В качестве датчиков температуры использовались термопары КТХА 02.01-062-к1-Н-Т310-1-1000/4000, произведенные ООО “Тесей” и представляющие собой кабель термопарный хромель-алюмелевый с неизолированным спаем в минеральной изоляции и стальной оболочке наружным диаметром 1 мм. Предел допускаемых отклонений от номинальной статической характеристики датчиков составлял 1.1 К, что дает неопределенность по типу Б 0.63 К, или 0.15%, для минимальной температуры натрия в экспериментах (410 К). Показатель тепловой инерции датчиков составлял $\tau_{0.63} = 0.05$ с.

Тепловизор выдает последовательность двумерных изображений размером 320×256 пикселей с разрешением 0.1 мм и глубиной 14 бит. Во время эксперимента достигается стационарное состояние с выбранными значениями расходов Q_{Γ} , Q_{χ} и температур T_{Γ} , T_{χ} в горячей и холодной ветке соответственно (см. таблицу). Затем производится съемка поля температуры в течение 30 мин с частотой кадров 50 Гц. Эти данные поз-

воляют изучить характер распределения и динамику поля температуры и пульсаций. Наиболее достоверные значения температуры могут быть получены на образующей цилиндра канала, находящейся на кратчайшем расстоянии от тепловизора, что обусловлено криволинейностью поверхности канала. Поэтому исследование температуры производилось в точках, последовательно расположенных на этой образующей. Координаты этих точек из системы координат, связанной с изображением тепловизора, переводятся в систему координат, связанную с тройником, центр которой находится в точке пересечения трубопроводов тройника, а ось Z направлена вдоль течения потока смещения (см. рис. 1). Предел допускаемой систематической погрешности тепловизора в измеряемом диапазоне температур 420–450 К составляет 0.3 К, что дает неопределенность по типу Б 0.17 К. Неопределенность по типу А составила в эксперименте 0.4 К. Таким образом, суммарная неопределенность тепловизионных измерений была 0.43 К, или 0.1%, для нижнего значения температуры измеряемого диапазона.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе экспериментов изучен процесс смешения при разных наборах параметров. В таблице приведены значения параметров для двух характерных режимов, которые, если следовать классификации, предложенной в работе [4], обеспечивают генерацию малого вихря рециркуляции вблизи стенки (wall jet – режим 1) либо более крупную структуру струйного течения (re-attached jet – режим 2), которая обеспечивает менее стабильную зону рециркуляции большего масштаба. Значения числа Рейнольдса, определен-

ного по диаметру трубы D и расходу в выходной трубе, находятся в интервале

$$Re = 4(Q_T + Q_X)/(\pi Dv) = (4.8 - 5.4) \times 10^4,$$

где v – кинематический коэффициент вязкости.

Температура на поверхности тройника исследованной области меньше среднесмешанной температуры T_{cc} натрия в среднем на 24 К для режима 1 и на 10 К для режима 2:

$$T_{cc} = (T_T Q_T + T_X Q_X)/(Q_T + Q_X).$$

Отношение расходов горячего и холодного натрия для режима 1 составляет 2.1, для режима 2 – 1.1, поэтому можно предположить, что характерный размер области потока, в которой происходит интенсивное перемешивание, в режиме 1 существенно больше, чем в режиме 2. Этим объясняется качественное отличие распределений температуры на поверхности тройника (рис. 2, а).

Наблюдается монотонный рост средней температуры поверхности тройника от координаты вдоль образующей для режима 1 и неравномерный рост с провалом в центральной части для режима 2 (см. рис. 2, а). В последнем случае именно туда попадает струя с более холодным натрием. При этом среднеквадратические отклонения в режиме 1 нарастают вдоль потока, а в режиме 2 существенно не изменяются. Такое распределение пульсаций температуры по поверхности подтверждают и спектры Фурье, приведенные на рис. 3 для точек $z = 58$ мм, $z = 124$ мм, $z = 205$ мм исследуемой области. В режиме 2 графики спектральной плотности для трех точек практически совпадают, в то время как в режиме 1 спектральная плотность энергии пульсаций в первой точке (линия 1) существенно меньше, чем в точках, рас-

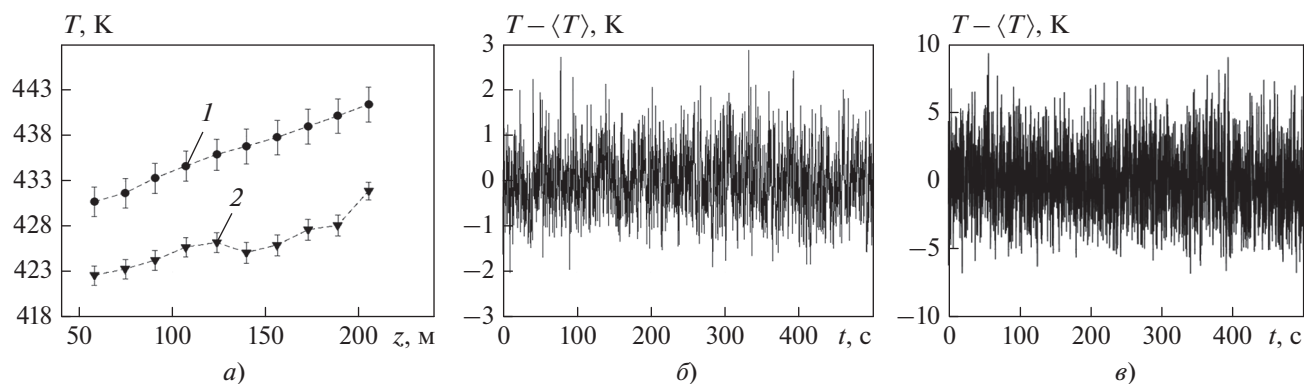


Рис. 2. Распределение усредненной за время эксперимента температуры $\langle T \rangle$ на поверхности тройника вдоль продольной координаты z для режимов 1 (1) и 2 (2) (а) (вертикальные отрезки соответствуют значениям среднеквадратических отклонений температуры) и графики временных температурных сигналов $T(t)$ за вычетом среднего по времени значения $\langle T \rangle$ для внешней поверхности стенки трубы (б) и в потоке натрия (на оси трубы) (в) при $z = 150$ мм (режим 2)

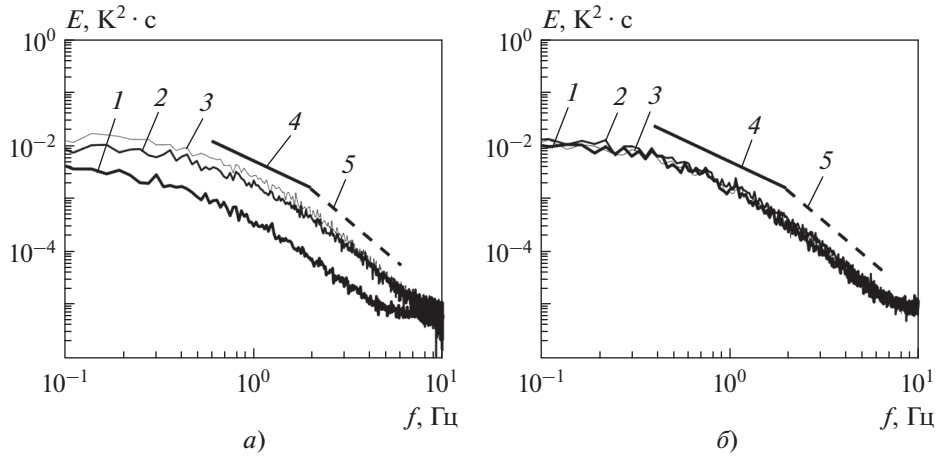


Рис. 3. Спектральная плотность энергии пульсаций температуры E в трех точках на внешней поверхности тройника в режиме 1 (а) и режиме 2 (б). 1 – точка $z = 58$ мм; 2 – точка $z = 124$ мм; 3 – точка $z = 205$ мм; 4 – наклон $-5/3$; 5 – наклон -3 (толщина линий убывает по мере удаления от тройника)

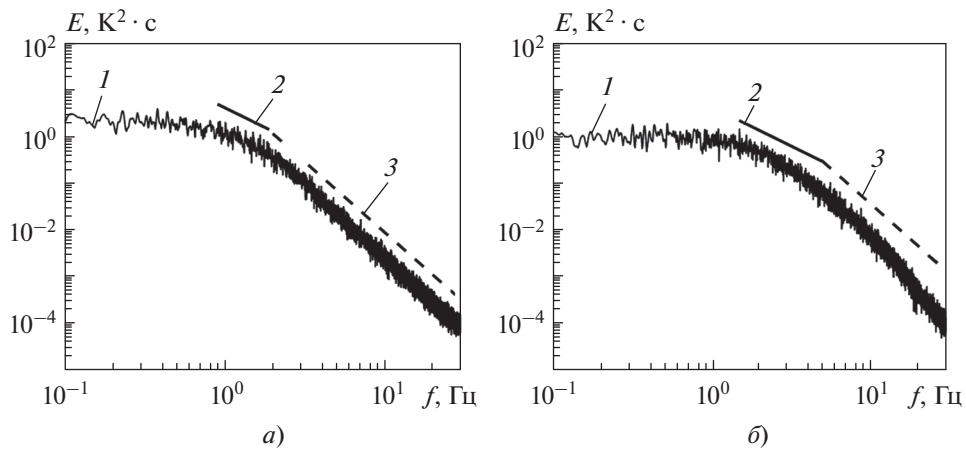


Рис. 4. Спектральная плотность энергии пульсаций температуры E на термопарах 1 (а) и 2 (б) внутри потока (режим 1). 1 – по показаниям термопар; 2 – наклон $-5/3$; 3 – наклон -3

положенных ниже по потоку (линии 2 и 3). На обоих рисунках штриховой линией для справки показан наклон спектра f^{-3} , чтобы подчеркнуть, что для частот $f > 1$ Гц амплитуда пульсаций быстро уменьшается с ростом частоты.

Спектры пульсаций температуры на поверхности тройника интересно сравнить со спектрами пульсаций температуры в самом потоке натрия. На рис. 2, б, в приведены примеры вариации температуры со временем на поверхности трубы и в потоке натрия для $z = 150$ мм (режим 2). На рис. 4 и 5 представлены спектральные плотности энергии пульсаций температуры, построенные для обоих режимов по показаниям термопар, расположенных на оси канала в точках с координатами

$z = 150$ мм (термопара 1) и $z = 450$ мм (термопара 2). Пульсации температуры в потоке существенно выше, чем на стенке (для режима 2 энергия пульсаций на частоте 1 Гц на оси потока превосходит энергию пульсаций на стенке более чем на два порядка). Однако, несмотря на интенсивную турбулентность, выраженного инерционного интервала (в котором пульсации температуры, как и любой пассивной примеси, следуют закону $-5/3$, который также показан на всех рисунках сплошной прямой линией) не видно. Это неудивительно, так как высокая теплопроводность натрия ($7 \times 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{с}$) приводит к формированию инерционно-диффузионного интервала, в котором спектральная плотность пульсаций скорости

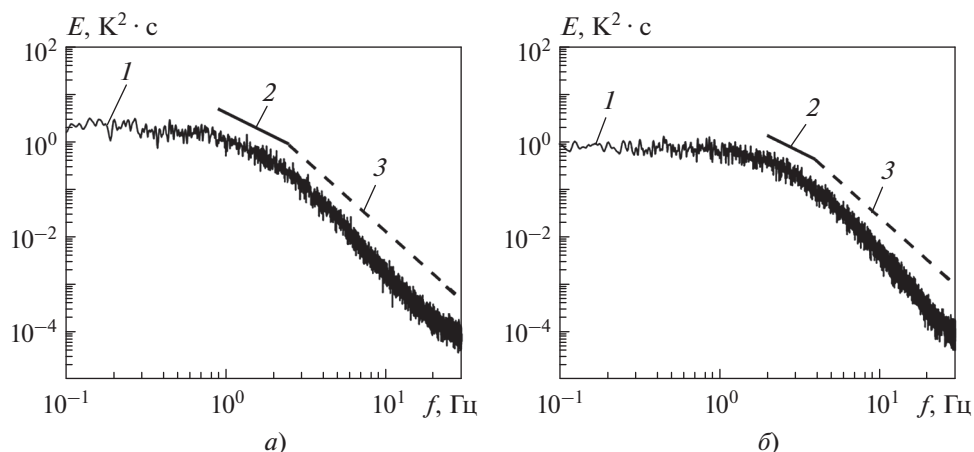


Рис. 5. Спектральная плотность энергии пульсаций температуры E на термопарах 1 (а) и 2 (б) внутри потока (режим 2). 1 – по показаниям термопар; 2 – наклон $-5/3$; 3 – наклон -3

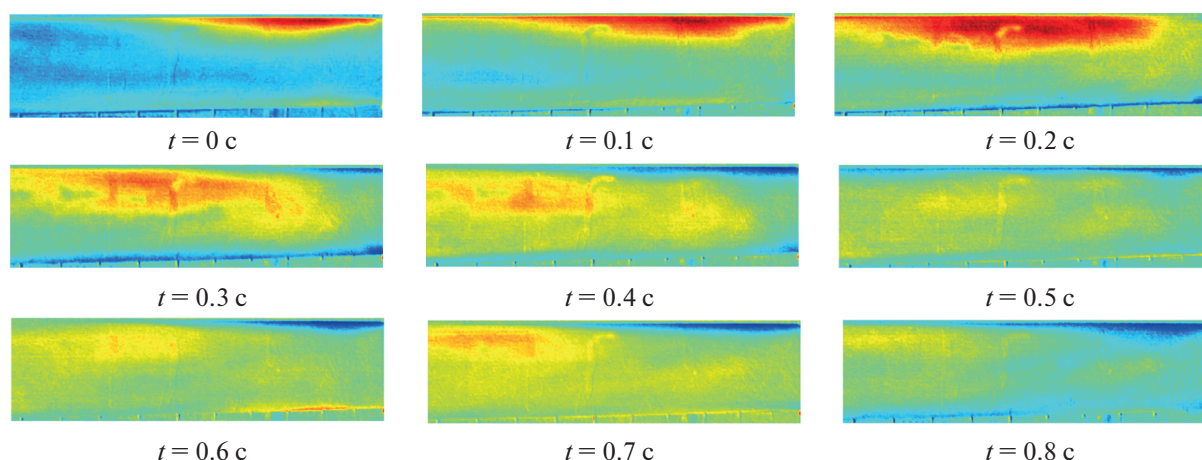


Рис. 6. Распределение температуры на поверхности канала в зоне смешения. Интервал температуры ограничен значениями от 403 до 408 К. Представлены девять кадров с тепловизора, сделанные с интервалом 0.1 с (режим 1)

определяется спектральным потоком энергии и следует закону Колмогорова, а пульсации температуры создаются пульсациями скорости, но не вовлекаются в каскадный перенос, так как рассасываются на том же масштабе, на котором возникают [15]. Следует отметить, что следующий из соображений размерности наклон $-17/3$ имеет такую высокую крутизну, что выделить его в реальных сигналах практически не возможно. Представленные спектры дают протяженные участки с наклоном от -3 до -5 (самый протяженный участок с устойчивым степенным законом виден на рис. 4, а самый крутой участок – на рис. 5).

При рассмотрении эволюции температурных полей отмечено, что по поверхности трубопровода вдоль течения распространяются не регулярные, но повторяющиеся структуры сложной формы (рис. 6). При этом в спектрах Фурье какие-ли-

бо выделенные частоты отсутствуют (см. рис. 3), поэтому для определения частоты возникающих пульсаций использовался вейвлет-анализ, эффективный для спектральной оценки нестационарных сигналов [16].

Вейвлет-спектрограммы вариаций температуры в выбранных точках (рис. 7) позволяют проследить за изменениями спектральной структуры во времени. Горизонтальная структура в спектрограмме соответствует волновому пакету с доминирующей частотой. Вытянутые в горизонтальном направлении структуры хорошо видны в верхних частях спектрограммы и свидетельствуют о существовании долгоживущих квазипериодических колебаний с частотами порядка 0.1–0.3 Гц. При построении интегральных спектров отдельные структуры сливаются и дают гладкое распределение энергии пульсаций по частоте. При по-

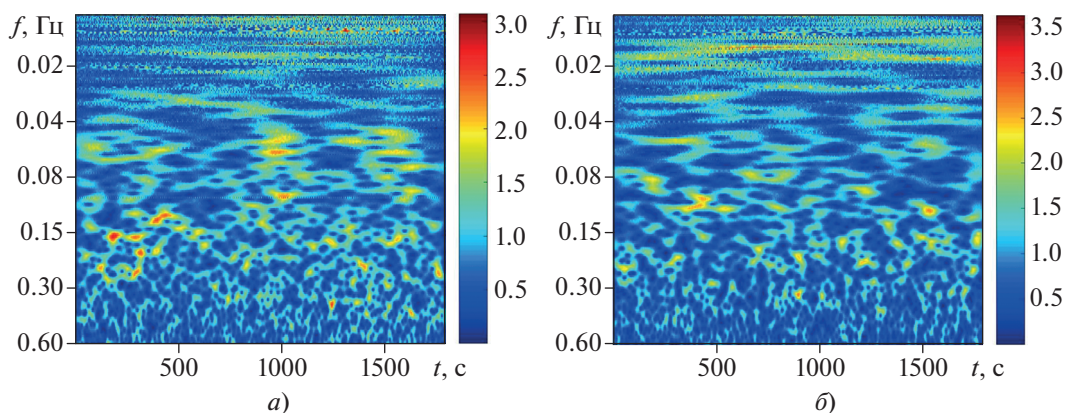


Рис. 7. Вейвлет-спектрограммы пульсаций температуры на поверхности тройника в точке $z = 140$ мм для режима 1 (а) и 2 (б)

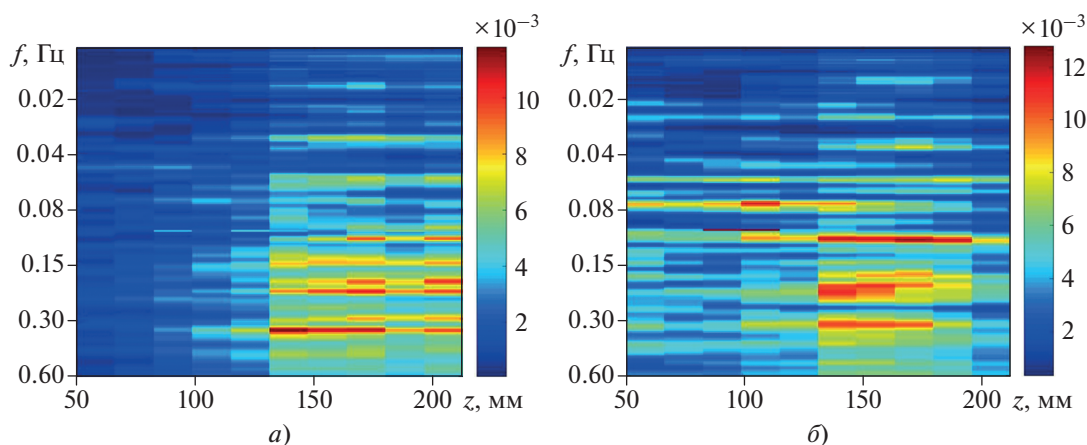


Рис. 8. Карты вейвлет-спектров для десяти выбранных точек вдоль исследуемой области для режима 1 (а) и 2 (б)

строении вейвлет-спектров путем осреднения спектрограмм по относительно небольшим промежуткам времени получают спектры с набором выделенных частот. На рис. 8 представлены диаграммы, на которых совмещены (расположены один за другим вдоль оси абсцисс) вейвлет-спектры, полученные при осреднении спектрограмм в интервале времени от 500 до 1000 с для десяти точек вдоль оси z . В данном случае наибольшая интенсивность колебаний наблюдается в дальней области по потоку. При этом в режиме 1 область характерных частот находится в интервале 0.1–0.5 Гц и она менее локализована, чем в режиме 2, в котором всплески колебаний отмечаются в интервале 0.05–0.35 Гц.

ВЫВОДЫ

1. Спектральный анализ сигналов термопар, расположенных на оси трубы в зоне смешения, показал, что поток во всех случаях является тур-

булентным. Спектры заполнены и не содержат выделенных частот. Выраженного участка со степенным законом $-5/3$, характерным для неизотермических жидкостей с умеренными числами Прандтля, не наблюдается, так как высокая теплопроводность натрия способствует формированию инерционно-диффузионного интервала с быстрым уменьшением энергии пульсаций температуры с повышением частоты.

2. Получены характеристики пульсаций температуры на поверхности трубы в зоне смешения (со стороны бокового патрубка). При визуальных наблюдениях за показаниями тепловизора выявлена нестационарная картина вариации поля температуры – в зоне смешения возникают и мигрируют вниз по потоку области с большим уровнем пульсаций температуры. Процесс не является регулярным и не свидетельствует о наличии на стенке устойчивых периодических колебаний температуры.

3. Средняя температура поверхности трубы в режиме 1 (расход холодного натрия составляет приблизительно половину расхода горячего) в зоне наблюдений монотонно возрастает по мере удаления от бокового (холодного) патрубка вниз по потоку, как и интенсивность пульсаций температуры. В режиме 2 (расход холодного натрия сопоставим с расходом горячего) имеется небольшой провал температуры в середине области наблюдений, свидетельствующий о наличии в данной области стационарного возвратного вихря. В этом режиме уровень пульсаций ниже, чем в первом, и сохраняется во всей области измерений.

4. Амплитуда пульсаций температуры на поверхности тройника на порядок ниже, чем в потоке, но структура спектров Фурье подобна. Спектральная плотность энергии пульсаций температуры на поверхности тройника также не имеет выделенных частот и на частотах больших 1 Гц снижается по закону близкому к $E(f) \sim f^{-3}$.

5. Вейвлет-спектрограммы пульсаций температуры в отдельных точках поверхности позволили выявить наличие нерегулярных всплесков пульсаций температуры. При этом область характерных частот лежит в диапазоне 0.1–0.5 Гц. Длительность всплесков тоже меняется и может достигать двух-трех десятков периодов, а частота колебаний изменяется даже в рамках одного всплеска. При вычислении интегральных спектров многочисленные всплески колебаний сливаются в сплошной гладкий спектр.

6. Получены экспериментальные данные по смешению разнотемпературных потоков натриевого теплоносителя, необходимые для проведения верификации CFD-кодов. Подтверждение адекватности реализованных в CFD-кодах моделей будет способствовать их внедрению в инженерную практику, что позволит повысить безопасность эксплуатируемых и проектируемых реакторных установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов И.А., Поплавский В.М. Безопасность АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. М.: Атомиздат, 2012.
2. Validation of fast reactor thermomechanical and thermohydraulic codes. Final report of co-ordinated research project. IAEA, Vienna, IAEA-TECDOC-1318, 2002.
3. Westin J. Thermal mixing in a T-junction. Model tests at vattenfall research and development AB 2006. Boundary conditions and list of available data for CFD validation // Report Memo U 07-26, Vattenfall R&D AB, Alvkärlaby, Sweden, 2007. P. 1–17.
4. Hosseini S.M., Yuki K., Hashizume H. Classification of turbulent jets in a T-junction area with a 90-deg bend upstream // Int. J. Heat Mass Transfer. 2008. V. 51. P. 2444–2454. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.08.024>
5. Experimental investigation of thermal mixing phenomena in a tee pipe / Mei-Shiue Chen, Huai-En Hsieh, Zhi-Yu Zhang, Bau-Shi Pei // Kerntechnik. 2015. V. 80. P. 116–123. <https://doi.org/10.3139/124.110467>
6. Экспериментальное моделирование течения жидкометаллического теплоносителя в T-образном смесителе / О.Н. Кашинский, П.Д. Лобанов, А.С. Курдюмов, Н.А. Прибатурин // ЖТФ. 2016. Т. 86. С. 145–147.
7. Жидкометаллические теплоносители / В.М. Боршанский, С.С. Кутателадзе, И.И. Новиков, О.С. Федынский. М.: Атомиздат, 1967.
8. Разработка модели турбулентного теплопереноса для жидкометаллического натриевого теплоносителя и ее верификация / С.А. Рогожкин, А.А. Аксенов, С.В. Жлуктов, С.Л. Осипов, М.Л. Сазонова, И.Д. Фадеев, С.Ф. Шепелев, В.В. Шмелев // Вычислительная механика сплошных сред. 2014. Т. 7. С. 306–306.
9. Экспериментальное исследование свободной конвекции натрия в длинном цилиндре / И.В. Колесниченко, А.Д. Мамыкин, А.М. Павлинов, В.В. Пахолков, С.А. Рогожкин, П.Г. Фрик, Р.И. Халилов, С.Ф. Шепелев // Теплоэнергетика. 2015. № 6. С. 31–39. <https://doi.org/10.1134/s0040363615060028>
10. Турбулентный конвективный теплообмен в наклонной трубе, заполненной натрием / А.Ю. Васильев, И.В. Колесниченко, А.Д. Мамыкин, П.Г. Фрик, Р.И. Халилов, С.А. Рогожкин, В.А. Пахолков // ЖТФ. 2015. Т. 85. С. 45–49.
11. Thermal convection of liquid sodium in inclined cylinders / R. Khalilov, I. Kolesnichenko, A. Pavlinov, A. Mamykin, A. Shestakov, P. Frick // Phys. Rev. Fluids. 2018. V. 3. P. 043503. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.3.043503>
12. ICMMs two-loop liquid sodium facility / I. Kolesnichenko, R. Khalilov, A. Shestakov, P. Frick // Magnetohydrodynamics. 2016. V. 52. P. 87–94. <https://doi.org/10.22364/mhd.52.1.11>
13. Khalilov R., Kolesnichenko I. Annular linear induction pump for liquid sodium // Magnetohydrodynamics. 2015. V. 51. No. 1. P. 95–104. <https://doi.org/10.22364/mhd.51.1.10>
14. A combined liquid sodium flow measurement system / R. Khalilov, I. Kolesnichenko, A. Mamykin, A. Pavlinov // Magnetohydrodynamics. 2016. V. 52. No. 1/2. P. 53–60. <https://doi.org/10.22364/mhd.52.1-2.7>
15. Фрик П.Г. Турбулентность: подходы и модели. 2-е изд., испр. и доп. М.: Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2010.
16. Фрик П.Г., Соколов Д.Д., Степанов Р.А. Вейвлет-анализ пространственно-временной структуры физических полей // Успехи физ. наук. 2022. Т. 192. С. 69–99. <https://doi.org/10.3367/UFN.2020.10.038859>

Mixing of Different Temperature Flows of Liquid Sodium in the Pipeline Behind the Tee

I. V. Kolesnichenko^a, R. I. Khalilov^a, A. V. Shestakov^a, A. N. Krylov^b, V. V. Pakholkov^b,
A. M. Pavlinov^a, A. D. Mamykin^{a,*}, A. Yu. Vasiliev^a, S. A. Rogozhkin^b, and P. G. Frick^a

^a Institute of Continuum Mechanics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, 614013 Russia

^b Afrikantov Experimental Design Bureau of Mechanical Engineering, Nizhny Novgorod, 603074 Russia

*e-mail: mad@icmm.ru

Abstract—Experimental studies into the process of mixing two different-temperature flows of sodium coolant in a T-shaped connection of cylindrical channels (tee) have been carried out. The measurements were carried out for two combinations of flow rates and temperatures of hot and cold sodium. The main result of the experiments is the characteristics of temperature fluctuations both in the sodium flow and on the outer surface of the tee pipes. Spectral analysis of signals from thermocouples located on the axis of the pipe in the mixing zone showed that the flow is turbulent in all cases. The average temperature of the pipe surface in regime 1 (the flow rate of cold sodium is approximately half the flow rate of hot sodium) in the observation zone increases monotonically with distance from the side (cold) branch pipe downstream as does the intensity of temperature fluctuations. In regime 2 (cold sodium consumption is comparable to hot sodium consumption), there is a small temperature dip in the middle of the observation region, which indicates the presence of a stationary return vortex in this region. In mode 2, the ripple level is lower than in mode 1 and is maintained over the entire measurement area. The amplitude of temperature fluctuations on the surface of the tee is significantly lower than in the flow, but the structure of the Fourier spectra is similar. With the help of a thermal imager, variations in the temperature field on the surface of the tee are visualized, which manifest themselves in the form of emerging and migrating with the flow areas with an increased amplitude of temperature pulsations. The process is not regular and does not indicate the presence of periodic temperature fluctuations on the wall. The spatio-temporal structure of the temperature pulsation field is analyzed by wavelet analysis methods, which make it possible to identify nonstationary quasi-periodic pulsations in a certain region of the channel and in a certain frequency range.

Keywords: liquid metal coolant, fast neutron reactor, sodium circuit, mixing of different temperature flows, tee, thermal imager, turbulence, heat transfer, thermal cycling fatigue