

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В КОЛЛЕКТОРАХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ НАТРИЙ- ВОЗДУХ

**Т.Р. Сметанин, В.В. Пахолков, С.А. Рогожкин, С.Ф. Шепелев**

*АО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова»  
603074, г. Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15*



Приведены результаты численного моделирования гидродинамики и перемешивания натрия в трубной системе воздушного теплообменника (ВТО), входящего в состав системы аварийного расхолаживания (САРХ) быстрых натриевых реакторов (БН). Неравномерность расходов натрия в трубной системе ВТО может приводить к смешению разнотемпературных потоков натрия, пульсациям температур и течам. В ходе исследований аварий, связанных с течью трубных систем ВТО на реакторах PFR и Phenix [1], было выяснено, что разрушение обусловлено пульсациями температуры металла.

Для численного моделирования использовались трехмерный и одномерный расчетные коды. Установлено, что расчеты распределения расходов натрия в ВТО с приемлемой для практики точностью могут быть выполнены по одномерному коду. Выполнен анализ факторов, влияющих на неравномерность распределения расходов натрия в трубной системе ВТО. Проведены расчеты распределения расходов натрия в ВТО и перемешивания разнотемпературных потоков натрия в выходном коллекторе ВТО. Представлены результаты расчета амплитуды пульсаций натрия вблизи стенок коллектора ВТО. Исследовано влияние глушения нескольких модулей на неравномерность распределения расходов и пульсаций температуры в ВТО. Получены аппроксимации численных решений для распределения расходов натрия в зависимости от количества заглушенных модулей.

**Ключевые слова:** БН, ВТО, натрий, перемешивание, CFD, гидродинамика, неравномерность, течи, пульсации.

**Для цитирования:** Сметанин Т.Р., Пахолков В.В., Рогожкин С.А., Шепелев С.Ф. Численное моделирование гидродинамики и перемешивания в коллекторах теплообменников натрий-воздух. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 4. – С. 49-60. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.4.04>

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из систем безопасности реакторов БН является САРХ, предназначенная для рассеивания в окружающую среду остаточных тепловыделений реактора при потере системного электроснабжения, прекращении подачи питательной воды и сейсмическом воздействии. В состав САРХ входит ВТО, в котором происходит передача тепла от натрия внутри трубок к атмосферному воздуху в межтрубном пространстве.

Неравномерность расходов натрия в трубной системе ВТО может приводить к смешению разнотемпературных потоков натрия и пульсациям температур. Высокая теплопроводность натрия обеспечивает значительные по сравнению с водой или газом коэффициенты теплоотдачи и малые перепады температуры между теплоносителем и стенкой, что приводит к проникновению пульсаций температур в глубь стенки. Термоциклическая усталость материала стенок может приводить к разгерметизации и натриевым течам [2].

Например, на реакторе PFR в 1984 г. имели место течи трубной системы ВТО [1]. В ходе расследования выяснилось, что разрушение было вызвано пульсациями температур, возникшими вследствие «забивания» теплообменных труб нерастворенным газом. В ходе испытаний ВТО экспериментального реактора Phenix были обнаружены похожие эффекты. Таким образом, анализ гидродинамики и перемешивания разнотемпературных потоков в ВТО является важной задачей для разработчиков отечественных РУ БН.

## ОПИСАНИЕ ВТО

Схема трубной системы ВТО изображена на рис. 1. Тракт циркуляции натрия в ВТО включает в себя трубный пучок, входной и выходной горизонтальные коллекторы [3]. Трубный пучок состоит из теплообменных модулей, подключенных параллельно. Каждый модуль состоит из параллельных U-образных теплообменных трубок с внутренним диаметром 18 мм, объединенных входным и выходным коллекторами модуля. Теплообмен в ВТО организован по принципу двухзаходного перекрестного противотока. Теплообменные трубки выполнены с приварным однозаходным спиральным оребрением для интенсификации теплопередачи к воздуху. Аналогичная схема циркуляции теплоносителей принята в ВТО реакторов PFR, PFBR, Monju [4].

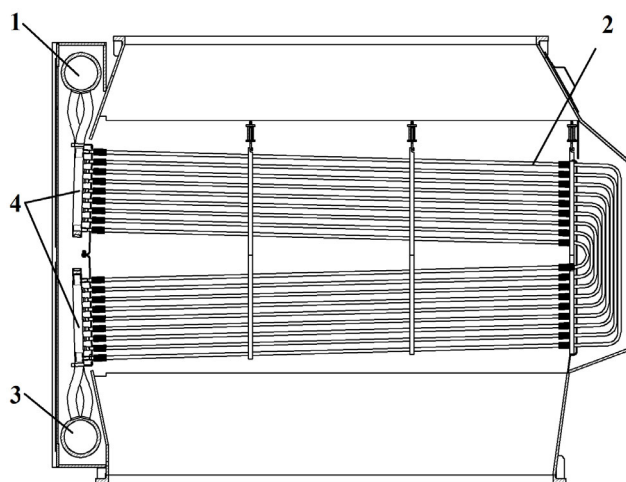


Рис. 1. Трубная система ВТО: 1 – коллектор входной; 2 – теплообменные трубки; 3 – коллектор выходной; 4 – коллектор модуля

Теплообменные трубки в модуле имеют разную длину, поэтому обладают различным гидравлическим сопротивлением. Вследствие этого может возникать отличие расходов в трубках, что может привести к нежелательным пульсациям температуры. Может иметь место также неравномерное распределение расходов натрия по модулям ВТО. В данном исследовании влияние нерастворенного газа на гидродинамику коллекторов ВТО не рассматривалось.

Номинальные параметры ВТО в режиме охлаждения реактора приведены в табл. 1.

Таблица 1

### Номинальные параметры ВТО

Параметр	Значение
Тепловая мощность, МВт	13
Расход натрия, кг/с	52
Температура натрия, °С: – на входе; – на выходе	505 309
Температура воздуха, °С: – на входе; – на выходе	39 307

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчеты ВТО выполнены с использованием CFD-кода FlowVision и одномерного расчетного кода Piping Systems FluidFlow (далее – FluidFlow) [5].

В коде FlowVision для моделирования турбулентного течения теплоносителя в проточной части ВТО применена стандартная  $k$ - $\varepsilon$ -модель турбулентности, дополненная модулем турбулентного теплопереноса в жидкометаллическом теплоносителе Liquid Metal Sodium (LMS) [6]. Верификация кода FlowVision в части смешения разнотемпературных потоков натрия выполнена по экспериментальным данным [7, 8].

В коде FluidFlow реализовано решение одномерных уравнений гидравлики с использованием справочных данных по сопротивлениям стандартных элементов гидравлической сети (труба, отвод, тройники) [9].

Исследования выполнены в следующей последовательности:

- расчет распределения расходов натрия по трубкам в пределах одного модуля и в целом по ВТО;
- оценка температуры натрия на выходе из коллекторов модулей;
- анализ влияния глушения трубок на перемешивание в выходном коллекторе ВТО.

Геометрическая модель для расчета распределения расходов натрия по трубкам в модуле представлена на рис. 2а, модель для расчета распределения расходов натрия по модулям в ВТО – на рис. 2б, модель для оценки температуры натрия в выходном коллекторе – на рис. 2в.

В модели коллектора модуля (см. рис. 2а) все теплообменные трубки прямые и одинаковой длины, коллекторы расположены друг напротив друга. На каждой трубке в модели установлено сосредоточенное гидравлическое сопротивление – «модификатор», учитывающее местное сопротивление на отводах и потери на трение в прямых участках труб. Сопротивление модификаторов рассчитано по справочным данным [9]. Для построения расчетной сетки в программном комплексе FlowVision использовались параллелепипеды. Расчетная сетка имеет сгущения в области крепления трубок к коллекторам, общее количество ячеек равно 258 870.

В модели ВТО (см. рис. 2б) входной и выходной коллекторы соединены прямыми трубами, имеющими диаметр коллектора модуля и гидравлическое сопротивление, эквивалентное сопротивлению модуля. На этой модели был проведен расчет неравномерности распределения натрия по модулям.

Анализ перемешивания разнотемпературных потоков натрия на выходе из модулей проводился на модели выходного коллектора ВТО (см. рис. 2в) с внутренним диаметром 200 мм. Расчетная сетка имеет сгущения в области выходного коллектора и в пристеночной области, общее количество ячеек равно 337 620. Значение пара-

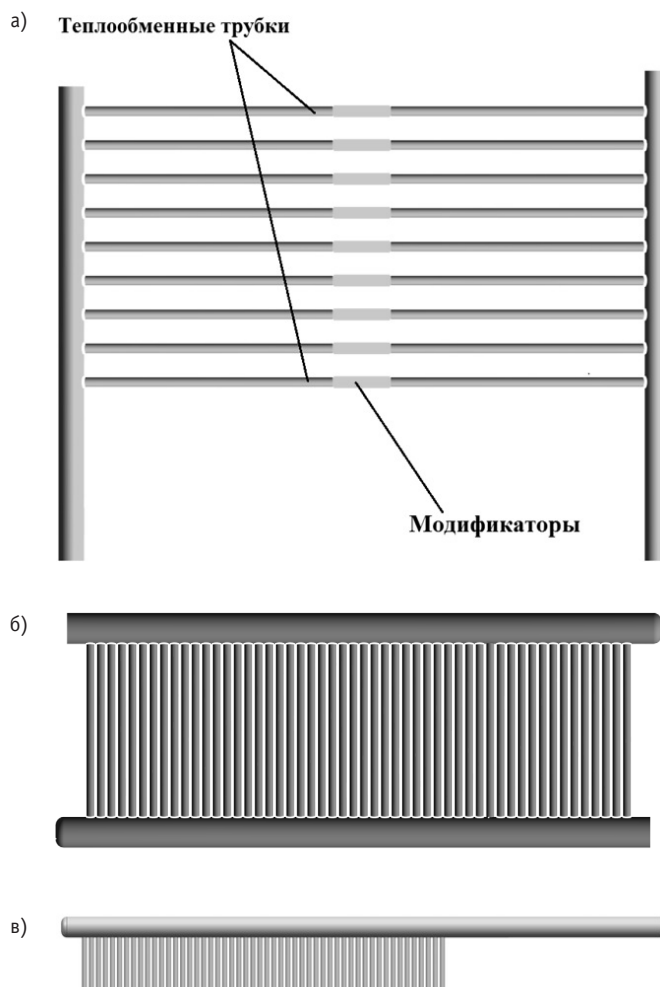


Рис. 2. Геометрические модели: а) – коллекторов модуля; б) – ВТО; в) – выходного коллектора ВТО

метра  $u^+$  для модели коллектора модуля и модели выходного коллектора лежит в диапазоне от 50 до 100. На обеих моделях моделирование течения натрия производилось в рамках стандартной  $k$ - $\epsilon$ -модели турбулентности.

### РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДОВ НАТРИЯ ПО ТРУБКАМ В МОДУЛЕ

В качестве меры неравномерности распределения расходов принят коэффициент неравномерности

$$Z = G_{\max}/G_{\min}, \quad (1)$$

где  $G_{\max}$ ,  $G_{\min}$  – максимальный и минимальный массовые расходы натрия по трубкам в модуле или по модулям в ВТО, кг/с.

Выполненные по коду FlowVision расчеты распределения расходов натрия по трубкам в пределах одного модуля показали, что коэффициент неравномерности составляет 1,04. По коду FluidFlow указанный коэффициент составил 1,10. Сравнение результатов расчетов по двум кодам, полученных при номинальных параметрах ВТО (см. табл. 1), приведено на рис. 3 и в табл. 2. Из таблицы 2 следует, что примерно 70% от суммарных гидравлических потерь в модуле обусловлены потерями в трубках.

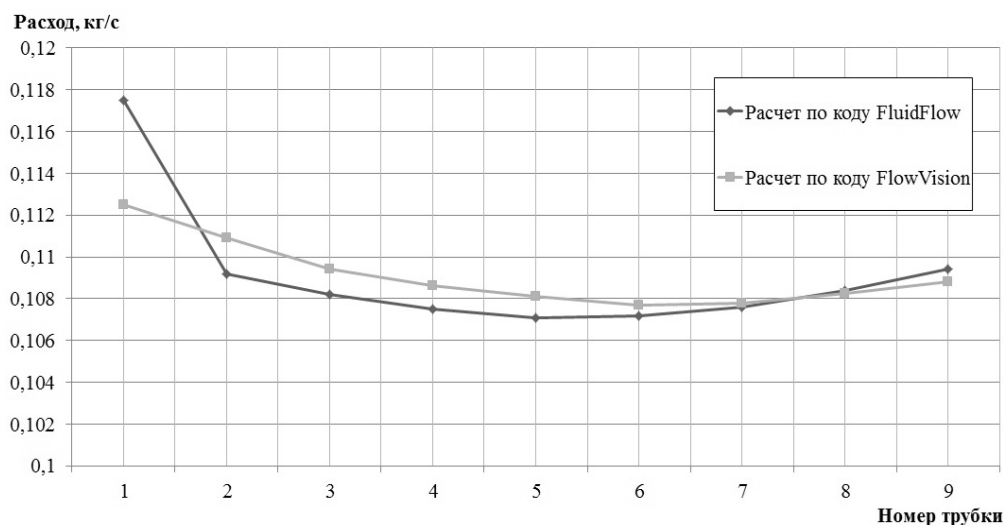


Рис. 3. Распределение расходов натрия по трубкам в модуле

Таблица 2

**Гидравлические потери в модуле**

Название параметра	Расчет по коду	
	FlowVision	FluidFlow
Гидравлические потери в теплопередающих трубках, Па	1138	1371
Гидравлические потери в коллекторах модуля, Па	669	431
Суммарные гидравлические потери в модуле, Па	1807	1802

Дополнительно был выполнен ряд расчетов с расходом в два раза меньше номинального и в 1,2; 1,6 и в два раза больше номинального значения (см. табл. 1). Максимальная неравномерность распределения расхода натрия по трубкам в модуле по коду FlowVision составляет 1,04, по коду FluidFlow – 1,10.

В исследованном диапазоне расходов число Рейнольдса изменится от  $4 \cdot 10^4$  до  $2 \cdot 10^5$ . Изменение расхода не влияет на коэффициент гидравлического сопротивления модуля и на распределение расходов по трубкам, следовательно, имеет место автомодельность по числу Рейнольдса.

**РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДОВ НАТРИЯ ПО МОДУЛЯМ В ВТО**

На основании полученных значений сопротивлений модулей был проведен анализ распределения расходов натрия по модулям в ВТО с помощью кодов FlowVision и FluidFlow.

По результатам расчета распределения натрия по модулям оценена температура натрия на выходе из каждого модуля в зависимости от расхода через него:

$$t_{\text{вых}} = t_{\text{возд}} + (t_{\text{вх}} - t_{\text{возд}}) e^{-K \pi d l / (G c)}, \quad (2)$$

где  $t_{\text{вх}}$ ,  $t_{\text{вых}}$  – температура натрия на входе и выходе из трубки, °С;  $t_{\text{возд}}$  – температура охлаждающего воздуха, °С;  $K$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $d$  – диаметр теплообменной трубки, м;  $l$  – длина трубки, м;  $G$  – расход натрия через трубку, кг/с;  $c$  – теплоемкость натрия, Дж/(кг·°С).

С учетом номинальных значений температур натрия и воздуха на входе и выходе ВТО (см. табл. 1) был определен коэффициент теплопередачи. Затем по известному

распределению расходов натрия по модулям в ВТО был произведен расчет температуры натрия на выходе из каждого модуля по формуле (2). При расчете были приняты следующие упрощения:

- температура воздуха в ВТО постоянна во всем объеме;
- не учитывалась неравномерность нагрева воздуха в объеме трубного пучка ВТО с заглушенными модулями.

Результаты расчетов при диаметре коллектора 200 мм приведены на рис. 4.

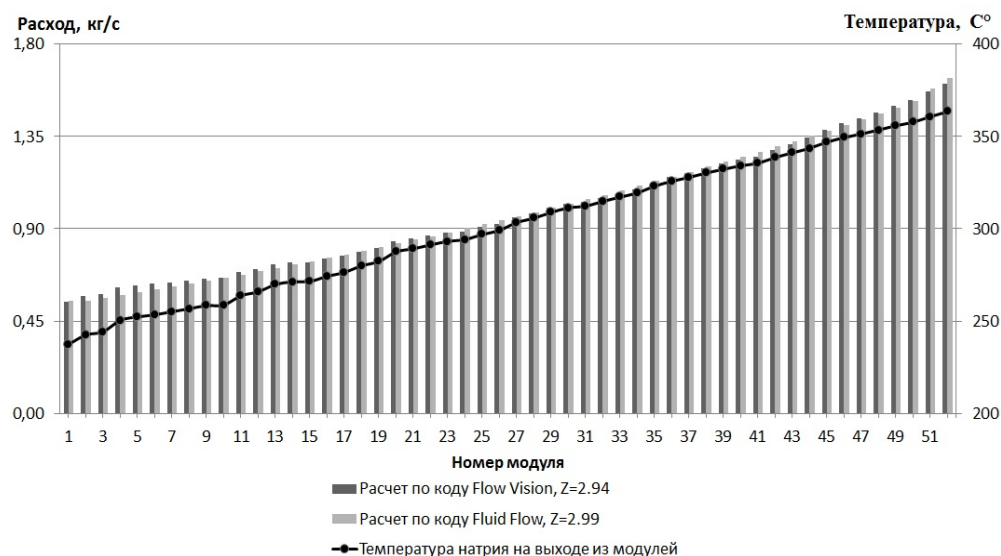


Рис. 4. Распределение расхода натрия по модулям и температуры на выходе из модулей в ВТО при внутреннем диаметре коллектора 200 мм

Коэффициент неравномерности по кодам FlowVision и FluidFlow составляет соответственно 2,94 и 2,99, поэтому для расчетов распределения расходов натрия в коллекторе с приемлемой для практики точностью может быть использован одномерный код FluidFlow.

По оценкам, при работе всех модулей разница температуры натрия на выходе из крайних модулей составляет 126°C, разница температур между соседними модулями изменяется в диапазоне от 1 до 6°C.

Увеличение температуры натрия на выходе из модулей в направлении течения натрия в выходном коллекторе приводит к образованию больших объемов (с размерами порядка диаметра собирающего коллектора) с условно «холодным» натрием. Процесс возникновения и движения указанных объемов в выходном коллекторе ВТО показан на рис. 5 с шагом по времени 0,4 с. В модели определены контрольные точки для анализа амплитуд температуры натрия вблизи стенок коллектора: точки № 1, 2, 3 расположены над коллекторами модулей 1, 26 и 52 соответственно, точка № 4 расположена после 52-го коллектора модуля на расстоянии 7 см.

Было выделено четыре объема с «холодным» натрием (на рис. 5 обозначены цифрами I–IV). На примере выделенных объемов хорошо видна эволюция объемов «холодного» натрия в основном потоке.

Все рассмотренные объемы «холодного» натрия за время движения по выходному коллектору ВТО не успевают прогреться до средней температуры на выходе из ВТО, из-за чего разница температур между основным потоком и натрием, поступающим из модулей, в середине коллектора составляет 30°C и увеличивается в направлении течения натрия, что приводит к возникновению пульсаций температуры на поверхнос-

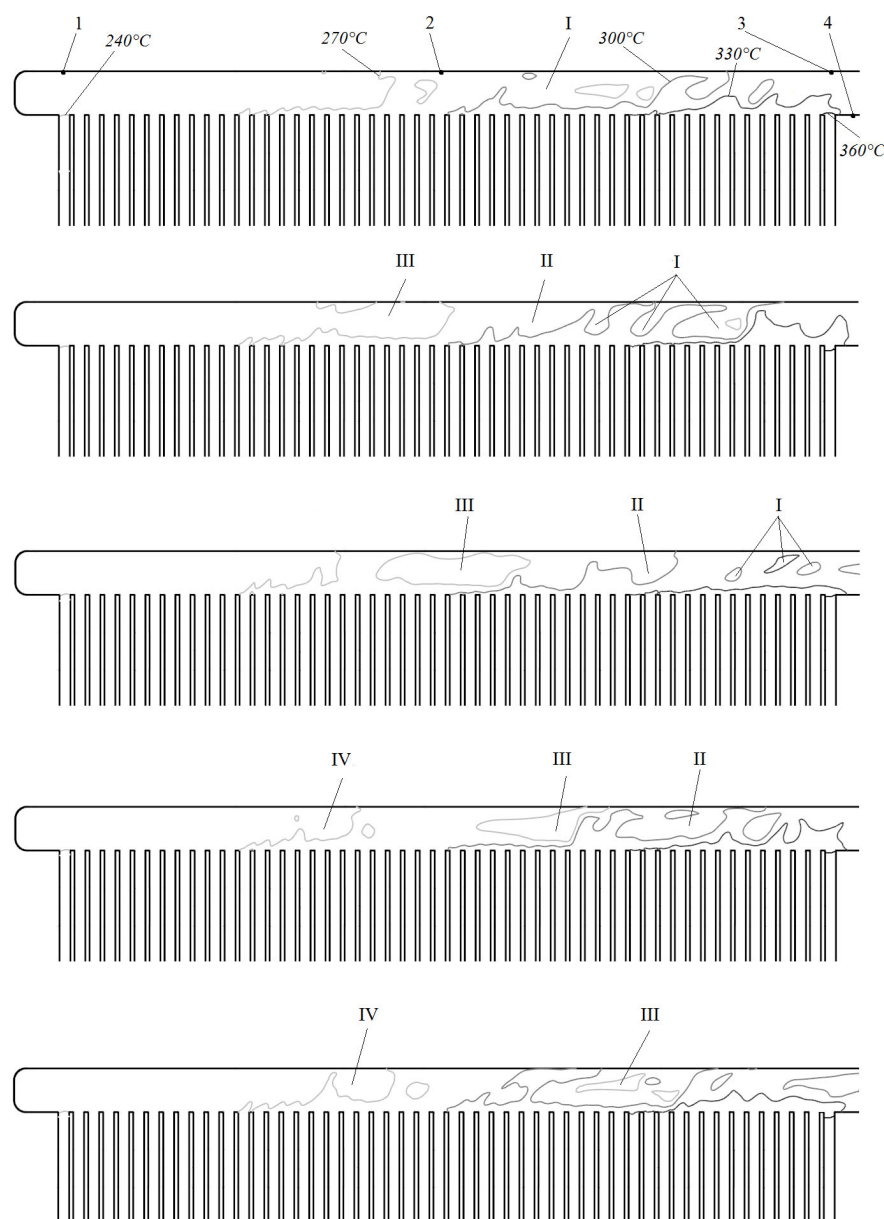


Рис. 5. Температуры натрия в собирающем коллекторе ВТО. Цифрами I–IV указаны объемы с «холодным» натрием; 1–4 – контрольные точки; курсивом указаны значения температур на изотермических поверхностях

ти металла коллектора. На поверхности коллектора ВТО вблизи мест подключения модулей возникает слой «горячего» натрия, сохраняющийся до последнего модуля.

Максимальная амплитуда пульсаций температуры натрия у стенки (определяется как интервал температур, в который попадает 95% расчетных точек) достигается в контрольной точке 3 и составляет  $45^{\circ}\text{C}$ .

Около точки 3 разница между основным потоком и натрием, поступающим из модулей, достигает максимума, поэтому вихри «горячего» натрия у выхода модулей создают существенные пульсации температур вблизи стенок коллектора в точке 3. В точках 1, 4 такой процесс не наблюдается, в точке 2 аналогичный процесс не приводит к масштабным пульсациям.



### АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА НЕРАВНОМЕРНОСТЬ

Для анализа факторов, влияющих на неравномерность распределения расходов в ВТО, по коду FluidFlow были проведены расчеты для внутреннего диаметра коллекторов 200 и 300 мм при различных диаметрах и эквивалентных длинах теплообменных трубок. Под эквивалентной длиной трубки понимается длина прямой трубки, гидравлические потери в которой равны суммарным потерям в существующей трубке модуля, имеющей прямые участки труб и отводы. Результаты расчетов приведены на рис. 6, где  $d$  – диаметр трубки,  $D$  – диаметр коллектора,  $L_{\text{экв}}$  – эквивалентная длина трубки.

Увеличение диаметра выходного коллектора с 200 до 300 мм (при прочих равных геометрических характеристиках трубного пучка) привело к снижению неравномерности распределения натрия в ВТО в 1,2–10 раз. Неравномерность распределения

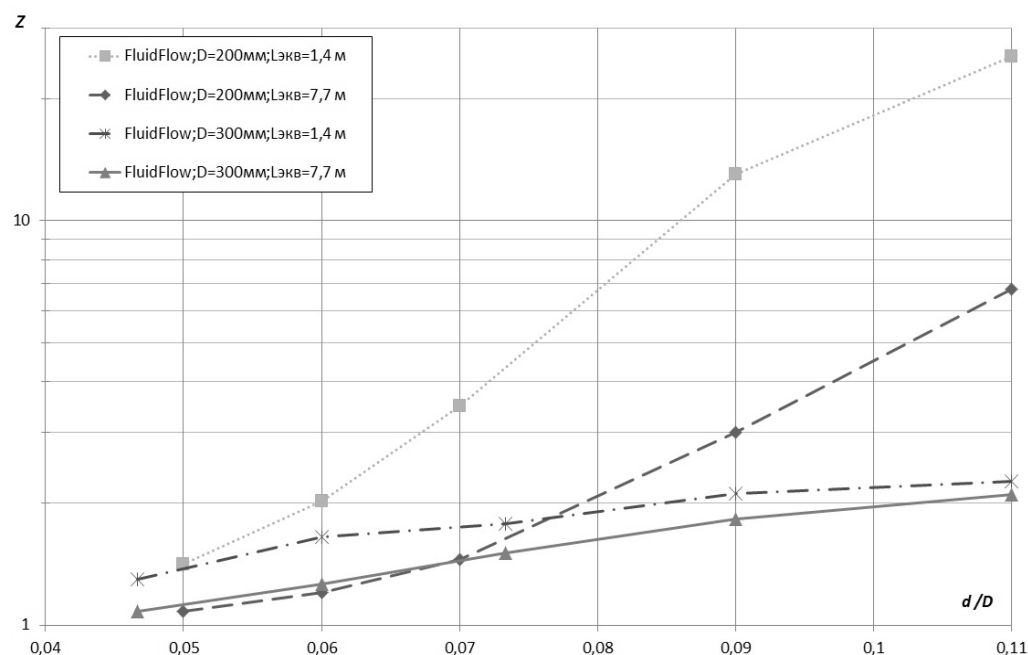


Рис. 6. Неравномерность распределения расхода натрия по модулям ВТО

натрия в ВТО тем меньше, чем меньше  $L_{\text{экв}}$  (или чем больше вклад гидравлических потерь в модулях в общие гидравлические потери в ВТО). Наименьшая неравномерность достигается при уменьшении диаметра трубок, увеличении их длины и диаметра входного и выходного коллекторов.

### АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЛУШЕНИЯ ТРУБОК НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДОВ НАТРИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ В КОЛЛЕКТОРЕ ВТО

В процессе эксплуатации может произойти разгерметизация теплообменных трубок и последующая течь натрия. Для продолжения эксплуатации ВТО может быть выполнен его ремонт, заключающийся в глушении негерметичных модулей со стороны натрия. Для оценки влияния глушения модулей на неравномерность распределения расходов натрия по модулям и перемешивания в выходном коллекторе выполнен CFD-анализ нескольких вариантов с глушением модулей в различных местах ВТО. Для всех вариантов суммарный расход натрия через ВТО, температуры натрия и воздуха на входе ВТО приняты равными номинальным значениям (см. табл. 1). Результаты расчетов приведены в табл. 3.



Таблица 3

**Характеристики ВТО, рассчитанные по кодам FlowVision (числители) и FluidFlow (знаменатели)**

Вариант	Количество заглушенных модулей	Номера заглушенных модулей	$G_{\min}$ , кг/с	$G_{\max}$ , кг/с	Z	$A_t^*$ , °C
1	0	–	0,54 / 0,55	1,60 / 1,65	2,94 / 3,00	45
2	2	19, 20	0,59 / 0,61	1,62 / 1,67	2,73 / 2,75	40
3	5	18–22	0,67 / 0,70	1,66 / 1,71	2,47 / 2,44	35
4	5	6–10	0,68 / 0,70	1,66 / 1,71	2,43 / 2,43	33
5	5	43–47	0,67 / 0,69	1,68 / 1,71	2,50 / 2,46	25
6	10	22–31	0,82 / 0,87	1,74 / 1,79	2,10 / 2,06	25

\*  $A_t$  – максимальная амплитуда пульсаций температуры натрия в контрольной точке № 3

При глушении модулей общая неравномерность распределения расходов натрия по модулям снижается из-за увеличения отношения гидравлических потерь в модулях к общим гидравлическим потерям в ВТО, однако место глушения не оказывает влияния на указанную неравномерность и на место, в котором реализуется максимальная амплитуда пульсаций температуры натрия (точка № 3).

Для анализа данного эффекта были проведены расчеты распределения расхода натрия по модулям при глушении пяти модулей подряд в различных частях ВТО (рис. 7).

Снижение неравномерности при глушении модулей связано с тем, что расход в оставшихся модулях увеличивается неравномерно. Увеличение расхода  $\Delta G$  [кг/с] через модули до заглушенной группы подчиняется зависимости

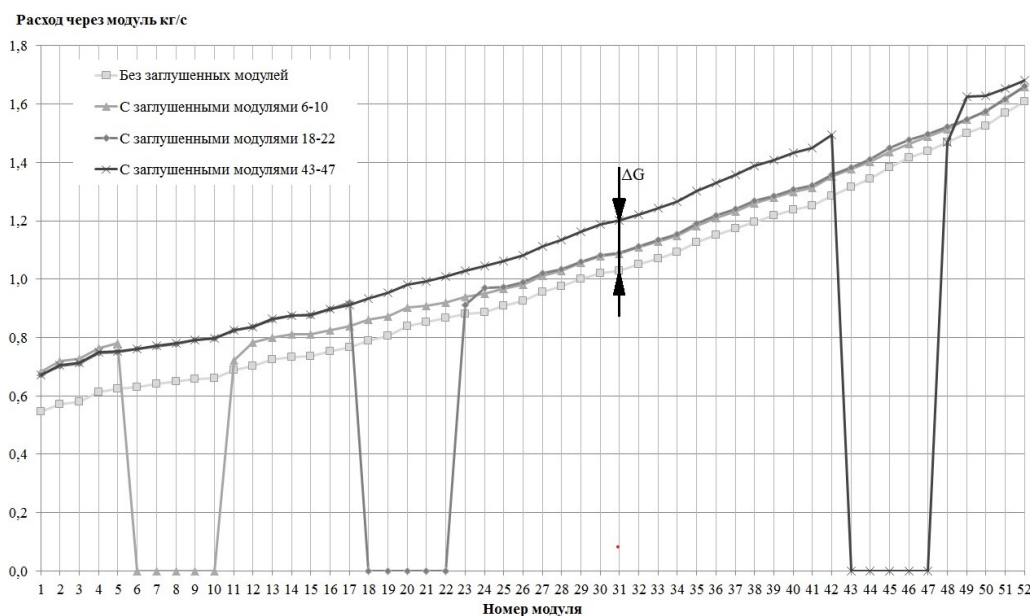


Рис. 7. Распределение расхода натрия по модулям при различных комбинациях заглушенных модулей

$$\Delta G = (7n - 5) \cdot x^2 \cdot 10^{-6} + 0,0381n - 0,0525, \quad (3)$$

после заглушенной группы

$$\Delta G = (3n - 6) \cdot (52 - x)^2 \cdot 10^{-6} + 0,0191n - 0,048, \quad (4)$$

где  $n$  – количество заглушенных модулей, расположенных подряд, шт.;  $x$  – номер модуля.

Данные соотношения справедливы независимо от места расположения группы заглушенных модулей. Точность расчета по формулам (3), (4) составляет 20%, невязка общего расхода через ВТО не превышает 5% при суммарном количестве заглушенных модулей не более 20 шт. Неравномерность снижается с ростом количества заглушенных модулей и не зависит от расположения группы таких модулей.

Максимальная амплитуда пульсаций наблюдается в районе выхода из коллектора ВТО. При увеличении количества заглушенных модулей от 0 до 10 шт. разница температур натрия на выходе из первого и последнего модулей снижается от 126 до 86°C, амплитуда пульсаций температуры снижается от 45 до 25°C.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Неравномерность распределения расходов натрия по трубкам в модуле ВТО зависит от отношения гидравлических потерь в трубках к общим потерям в модуле. Коэффициент неравномерности в модуле по трехмерному коду FlowVision составляет 1,04; по одномерному коду FluidFlow – 1,10.

При полном составе модулей в ВТО и диаметре коллектора 200 мм коэффициент неравномерности в ВТО по модулям по коду FlowVision составляет 2,94, по коду FluidFlow – 2,99. При этом разность температур натрия на выходе из крайних модулей составляет 126°C. Увеличение температуры натрия на выходе из модулей в направлении течения натрия в выходном коллекторе приводит к тому, что натрий в ВТО полностью не перемешивается. Максимальная амплитуда пульсаций температуры натрия составляет 45°C.

Неравномерность распределения натрия по модулям в ВТО зависит от соотношения гидравлических потерь в модулях к общим гидравлическим потерям в ВТО. При увеличении диаметра коллектора до 300 мм коэффициент неравномерности в ВТО по модулям уменьшается до 1,65, пульсации температуры практически отсутствуют. При проектировании ВТО перспективных РУ БН для снижения неравномерности рекомендуется увеличение диаметра входного и выходного коллекторов ВТО до 300 мм.

При глушении модулей коэффициент неравномерности в ВТО уменьшается. Получены аппроксимации, которые могут быть использованы для расчета расходов натрия через модули, расположенные до и после заглушенной группы. При глушении десяти модулей (расположенных подряд) максимальная амплитуда пульсаций температуры натрия уменьшается до 25°C.

Расчеты распределения расходов натрия в ВТО с приемлемой для практики точностью могут быть выполнены по одномерному коду.

## Литература

1. Cruickshank A., Judd. A.M. Problems experienced during operation of the prototype fast reactor Dounreay 1974-1994. // Working material of Technical Meetings. Reproduced by IAEA. – 2005. – PP. 51-79.
2. Колесниченко И.В., Халилов Р.И., Крылов А.Н., Пахолков В.В. и др. Перемешивание разнотемпературных потоков жидкого натрия в трубопроводе за тройником. // Теплоэнергетика (в печати).
3. Коломиец Д.О., Левченко Ю.Д., Сорокин А.П. Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления пакета оребренных труб воздушных теплообменников реакторов на быстрых нейтронах. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2014. – № 1. – С. 172-182. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2014.1.13>

4. Mochizuki H., Takano M. Heat transfer in heat exchangers of sodium cooled fast reactors systems. // Nuclear Engineering and Design. – 2009. – Vol. 239. – PP. 295-307.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.10.013>
5. Руководство пользователя программного комплекса FluidFlow.  
Электронный ресурс <https://support.fluidflowinfo.com> (дата доступа 24.10.2021).
6. Аксенов А.А., Жлуктов С.В., Осипов С.Л., Рогожкин С.А., Сазонова М.Л., Фадеев И.Д., Шепелев С.Ф., Шмелев В.В. Разработка модели турбулентного теплопереноса для жидкометаллического натриевого теплоносителя и ее верификация. // Вычислительная механика сплошных сред. – 2014. – Т. 7. – № 3. – С. 306-316. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2014.7.3.30>
7. Knebel J.U., Krebs L., Muller U., Axcell B.P. Experimental investigation of a confined heated sodium jet in a co-flow. // J. Fluid Mech. – 1998. – Vol. 368. – PP. 51-79.  
DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112098001463>
8. Kimura N., Miyakoshi H., Kamide H. Experimental investigation on transfer characteristics of temperature fluctuation from liquid sodium to wall in parallel triple-jet. // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2007. – Vol. 50. – PP. 2024-2036.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.09.030>
9. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

Поступила в редакцию 23.12.2022 г.

#### Авторы

Сметанин Тимур Рашидович, инженер-конструктор

E-mail: [smetanin\\_tr@okbm.nnov.ru](mailto:smetanin_tr@okbm.nnov.ru)

Пахолков Василий Владимирович, начальник бюро,

E-mail: [pakholkov@okbm.nnov.ru](mailto:pakholkov@okbm.nnov.ru)

Рогожкин Сергей Александрович, начальник отдела, канд. техн. наук

E-mail: [rogozhkin@okbm.nnov.ru](mailto:rogozhkin@okbm.nnov.ru)

Шепелев Сергей Федорович, главный конструктор РУ БН, канд. техн. наук

E-mail: [shepelev@okbm.nnov.ru](mailto:shepelev@okbm.nnov.ru)

UDC 621.039.5:532

## Numerical Simulation of Fluid Dynamics and Mixing in Headers of Sodium-Air Heat Exchangers

Smetanin T.R., Pakholkov V.V., Rogozhkin S.A., Shepelev S.F.

Afrikanov OKBM JSC

15 Burnakovsky pr., 603074 Nizhny Novgorod, Russia

#### ABSTRACT

The paper presents the results of a numerical simulation for sodium fluid dynamics and mixing in the tubing system of an air-cooled heat exchanger (AHX), which is a part of the emergency cooldown system (ECS) of sodium fast reactors (SFRs). Non-uniform sodium flows in the AHX tubing system may lead to the mixing of different-temperature sodium flows, temperature fluctuations and tube breaks. It was found in the course of investigating accidents involving breaks in the PFR and Phenix reactor AHX tubing systems that the failure was caused by the metal temperature fluctuations [1].

The numerical simulation used three- and one-dimensional computer codes. It has been found that the calculations of the AHX sodium flow rate distribution with a practically acceptable accuracy can be performed using a one-dimensional code. The

factors that influence the non-uniform distribution of sodium flows in the AHX tubing system have been analyzed. Calculations have been performed for the AHX sodium flow distributions and for the mixing of different-temperature sodium flows in the AHX outlet header. The results are presented from calculating the amplitude of sodium fluctuations near the AHX header walls. The effect from shutting down several modules on the non-uniform flow distribution and temperature fluctuations in the AHX has been investigated. Approximations of numerical solutions have been obtained for the sodium flow distribution as a function of the number of the modules shut down.

**Key words:** BN reactors, AHX, sodium, mixing CFD, hydrodynamics, unevenness, leaks, pulsations.

**For citation:** Smetanin T.R., Pakholkov V.V., Rogozhkin S.A., Shepelev S.F. Numerical Simulation of Fluid Dynamics and Mixing in Headers of Sodium-Air Heat Exchangers. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2023, no. 4, pp. 49-60; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.4.04> (in Russian)

#### REFERENCES

1. Cruickshank A., Judd. A.M. Problems experienced during operation of the prototype fast reactor, Dounreay 1974-1994. *Proceeding of a technical committee meeting*. Reproduced by IAEA 2005, pp. 51-79.
2. Kolesnichenko I.V., Khalilov R.I., Shestakov A.V., Krylov A.N., Pakholkov V.V., Pavlinov A.M., Mamykin A.D., Vasilyev A.Yu., Rogozhkin S.A., Frik P.G. Mixing of different-temperature liquid sodium flows in the piping downstream of the T-joint. *Teploenergetika* (to appear).
3. Kolomiyets D.O., Levchenko Yu.D., Sorokin A.P. An experimental study into the hydraulic resistance of the finned tube assembly in fast reactor air-cooled heat exchangers. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2014, no. 1, pp. 172-182; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2014.1.13> (in Russian).
4. Mochizuki H., Takano M. Heat transfer in heat exchangers of sodium cooled fast reactors systems. *Nuclear Engineering and Design*. 2009, no. 239, pp. 295-307; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.10.013>
5. *FluidFlow. User Guide*. Available at: <https://support.fluidflowinfo.com> (accessed Oct. 24, 2021).
6. Aksenov A.A., Zhlyukov S.V., Osipov S.L., Rogozhkin S.A., Sazonova M.L., Fadeev I.D., Shepelev S.F., Shmelev V.V. Development and verification of a turbulent heat transport model for sodium-based liquid metal coolants. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*. 2014, vol. 7, no. 3, pp. 306-316; DOI: <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2014.7.3.30> (in Russian).
7. Knebel J.U., Krebs L., Muller U., Axcell B.P. Experimental investigation of a confined heated sodium jet in a co-flow. *J. Fluid Mech.* 1998, no. 368, pp. 51-79; DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112098001463>
8. Kimura N., Miyakoshi H., Kamide H. Experimental investigation on transfer characteristics of temperature fluctuation from liquid sodium to wall in parallel triple-jet. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007, no. 50, pp. 2024-2036; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.09.030>
9. Idelchik I.Ye. *Handbook of Hydraulic Resistances*. Moscow. Mashinostroyeniye Publ., 1992, 672 p. (in Russian).

#### Authors

Timur R. Smetanin, Design Engineer

E-mail: [smetanin\\_tr@okbm.nnov.ru](mailto:smetanin_tr@okbm.nnov.ru)

Vasily V. Pakholkov, Head of Bureau

E-mail: [pakholkov@okbm.nnov.ru](mailto:pakholkov@okbm.nnov.ru)

Sergey A. Rogozhkin, Head of Department, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: [rogozhkin@okbm.nnov.ru](mailto:rogozhkin@okbm.nnov.ru)

Sergey F. Shepelev, Chief Designer of BN Reactor Plants, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: [shepelev@okbm.nnov.ru](mailto:shepelev@okbm.nnov.ru)