

CFD АНАЛИЗ ГИДРОДИНАМИКИ И ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В КОЛЛЕКТОРАХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ НАТРИЙ-ВОЗДУХ

*Сметанин Тимур Рашидович (smetanin_tr@okbm.nnov.ru), Пахолков Василий Владимирович,
Рогожкин Сергей Александрович*

АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород

Настоящий доклад посвящен CFD анализу гидродинамики и перемешивания натрия в трубной системе воздушного теплообменника (ВТО), входящего в состав системы аварийного расхолаживания (САРХ) быстрых натриевых реакторов (БН). Выполнен анализ факторов, влияющих на неравномерность распределения расходов натрия в трубной системе ВТО. При анализе использовались трехмерные и одномерные расчетные коды. Проведены расчеты распределения расходов натрия в ВТО и перемешивания разнотемпературных потоков натрия в выходном коллекторе 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 ANALYSIS OF FLUID DYNAMICS AND MIXING IN HEADERS OF SODIUM-AIR HEAT EXCHANGERS

*Smetanin Timur Rashidovich (smetanin_tr@okbm.nnov.ru), Pakholkov Vasilii Vladimirovich,
Rogozhkin Sergey Aleksandrovich*

Afrikantov OKBM JSC, Nizhny Novgorod

The paper deals with the CFD analysis of sodium hydrodynamics and mixing in the air-cooled sodium heat exchanger (AHX) tubing system. The AHX is part of the emergency cooldown system (ECDS) of sodium-cooled fast reactors (SFRs). Analyzed are factors having an effect upon sodium flow maldistribution in the AHX tubing system. The analysis uses 3D and 1D computer codes. Calculations are performed for IHX sodium flow distributions and for mixing of different-temperature sodium flows in the AHX outlet header. Studied is the effect of shutting down a number of modules upon the flow maldistribution and temperature pulsations in the AHX. Approximations are obtained for numerical solutions for the sodium flow distribution as a function of the number of shut down modules.

Keywords: SFR, AHX, sodium, mixing.

Введение

Одной из систем безопасности реакторной установки (РУ) БН является САРХ. САРХ предназначена 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, пульсациям температур и течам. Например, на реакторе PFR в 1984 году имели место течи трубной системы ВТО [1]. В ходе расследования выяснилось, что разрушение было вызвано пульсациями температур, возникшими из-за «забивания» теплообменных труб нерастворенным газом. В ходе испытаний ВТО экспериментального реактора Phénix 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 [2]. 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 [3].

Теплообменные трубки в модуле имеют разную длину, в связи с этим обладают различным гидравлическим сопротивлением. Вследствие этого может

возникать разность давлений и расходов в трубках, что может привести к нежелательным пульсациям температуры. Кроме этого, может иметь место также неравномерное распределение расходов натрия по модулям ВТО. В данном докладе влияние нерастворенного газа на гидродинамику коллекторов ВТО не рассматривалось.

Номинальные параметры ВТО в квазистационарном режиме расхолаживания РУ БН 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

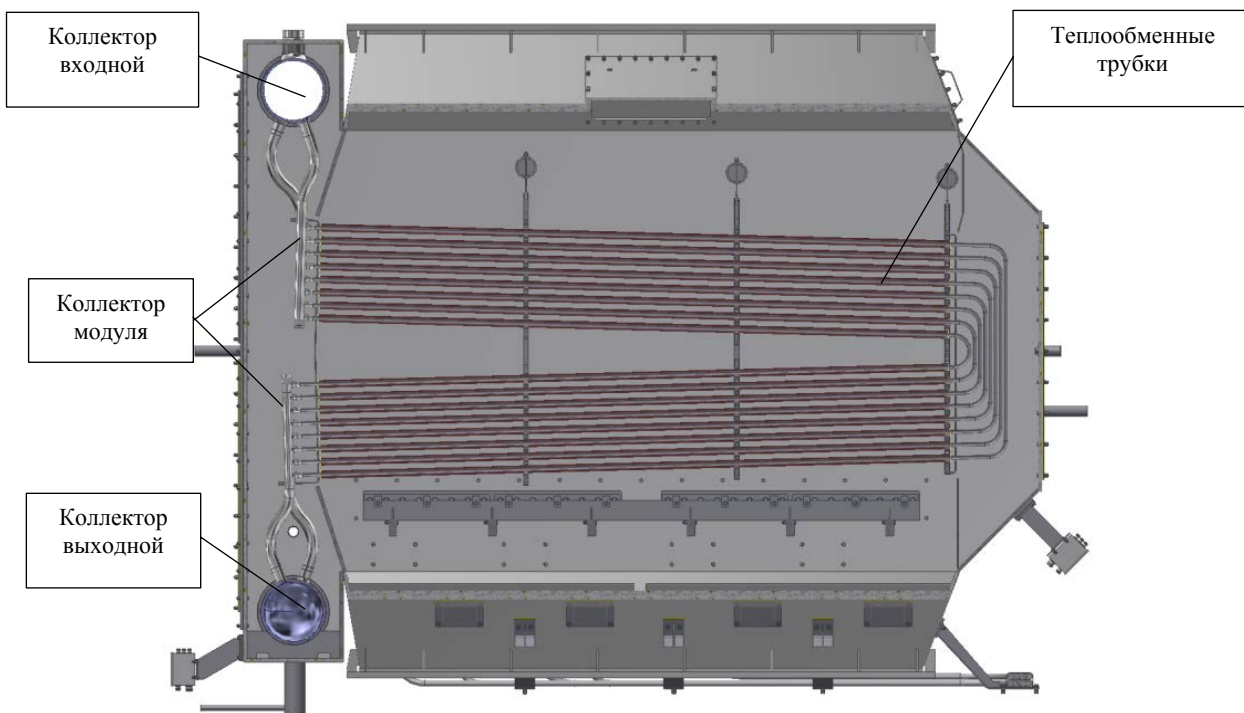


Рис. 1. Трубная система ВТО

Методика исследования

Расчеты ВТО выполнены с использованием CFD кода FlowVision и одномерного расчетного кода Piping Systems FluidFlow (далее -FluidFlow) [4].

В коде FlowVision для моделирования турбулентного течения теплоносителя в проточной части ВТО применена стандартная $k-\epsilon$ модель турбулентности, дополненная модулем турбулентного теплопереноса в жидкометаллическом теплоносителе Liquid Metal Sodium (LMS) [5]. Верификация кода FlowVision в части смешения разнотемпературных потоков натрия выполнена по экспериментальным данным [6, 7].

В коде FluidFlow реализовано решение одномерных уравнений гидравлики с использованием справочных данных по сопротивлениям стандартных элементов гидравлической сети (труба, отвод, тройники) [8].

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 перемещение в выходном коллекторе ВТО.

Геометрическая модель для расчета распределения расходов натрия по трубкам в модуле представлена на рис. 2,а, модель для расчета распределения расходов натрия по модулям в ВТО - на рис. 2,б, модель для оценки температуры натрия в выходном коллекторе диаметром 200 мм - на рис. 2,в.

В модели коллектора модуля (см. рис.2,а) 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 [8], оно зависит от скорости в трубке.

В модели ВТО (см. рис. 2,б) 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.

В модели выходного коллектора ВТО (см. рис.2,в) 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 коллектора модуля на расстоянии 7 см.

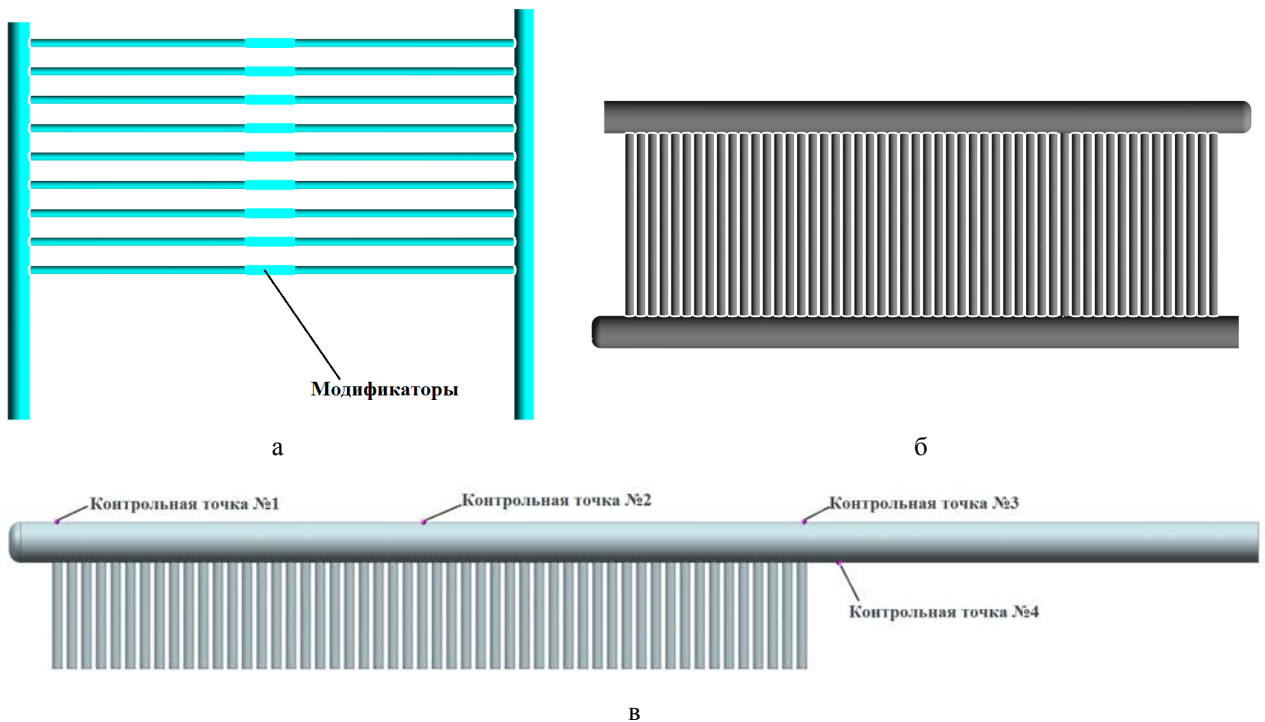


Рис. 2. Геометрические модели коллекторов: а – модуля, б – ВТО, в – выходного коллектора ВТО

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} – соответственно, максимальный и минимальный массовый расход 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 указанным кодам приведено на рис. 3 и в табл. 2. Из табл. 2 следует, что примерно 70 % от суммарных гидравлических потерь в модуле обусловлены потерями в трубках.

Дополнительно был выполнен ряд расчетов с расходом в 2 раза меньше номинального и в 1,2; 1,6 и 2 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 изменяется 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 и, следовательно, имеет место автомодельность по числу Рейнольдса.

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

Расчет распределения расходов натрия по модулям в ВТО

На основе полученных значений сопротивлений модулей был проведен анализ распределения расходов натрия по модулям в ВТО с помощью кодов FlowVision и FluidFlow. Результаты расчетов при диаметре коллектора 200 мм см. на рис. 4.

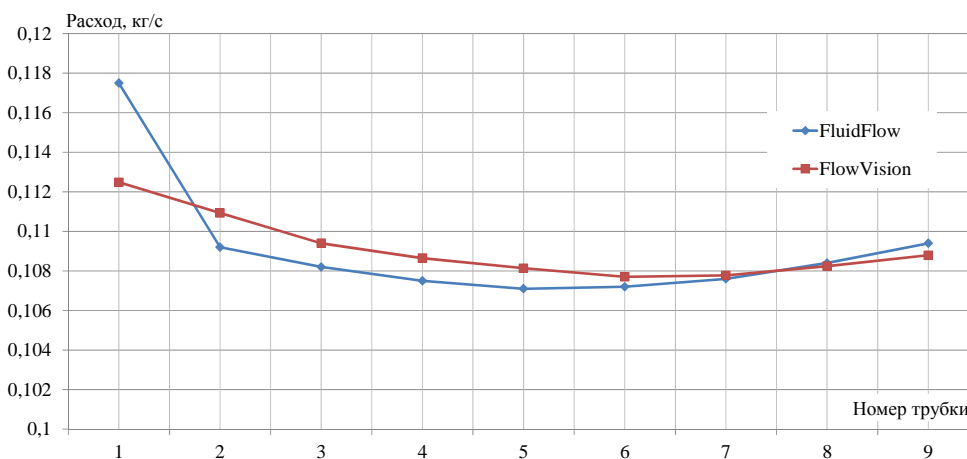


Рис. 3. Распределение расходов натрия по трубкам в модуле

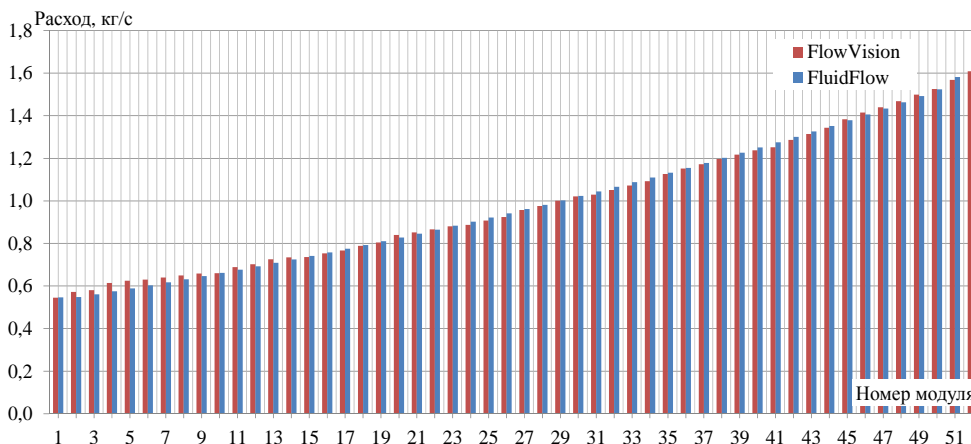


Рис. 4. Распределение расхода натрия по модулям в ВТО при внутреннем диаметре коллектора 200 мм

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.

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. 5. На рис. 5 приняты обозначения: d – диаметр трубки, D – диаметр коллектора.

Неравномерность распределения натрия в ВТО тем меньше, чем больше соотношение гидравлических потерь в модулях к общим гидравлическим потерям в ВТО. Наименьшая неравномерность достигается при уменьшении диаметра трубок, увеличении их длины и увеличении диаметра входного и выходного коллекторов.

Оценка температуры натрия на выходе из коллекторов модулей

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

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

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/(м²·°С); d – диаметр теплообменной трубки, м; l – длина трубки, м; G – расход натрия через трубку, кг/с; c – теплоемкость натрия, Дж/(кг·°С).

Основываясь на номинальных значениях 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.

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

График распределения температур на выходе из модулей представлен на рис. 6.

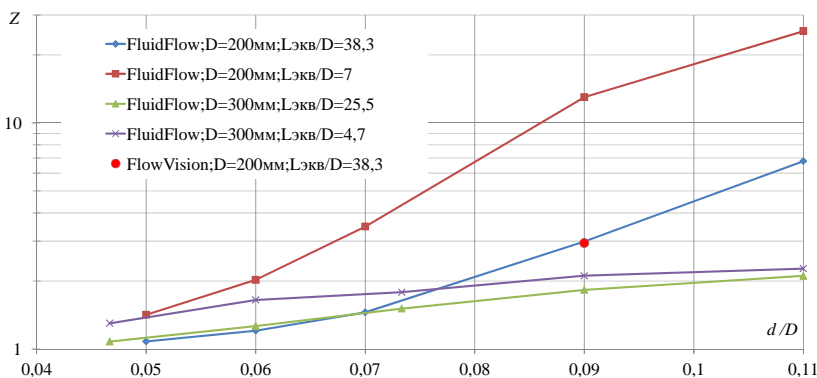


Рис. 5. Неравномерность распределения расхода натрия по модулям ВТО

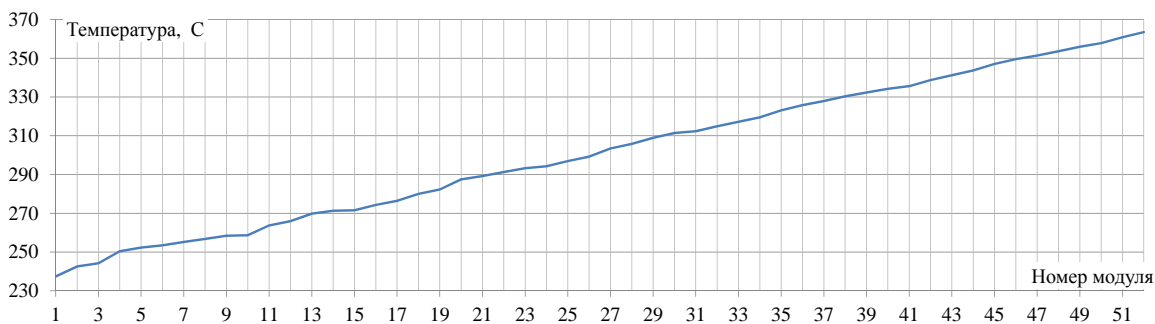


Рис. 6. Температура натрия на выходе из модулей (без заглушенных модулей) при внутреннем диаметре коллектора 200 мм

Анализ влияния глушения трубок на распределение расходов натрия и температуры в коллекторе ВТО

Увеличение температуры натрия на выходе из модулей в направлении течения натрия в выходном коллекторе приводит к образованию объема с «холодным» натрием. Разнотемпературные потоки натрия, поступающие из модулей в выходной коллектор ВТО, по длине коллектора не перемешиваются, что приводит к возникновению пульсаций температуры на поверхности металла коллектора.

Максимальная амплитуда пульсаций температуры натрия у стенки (определяется как интервал температур, в который попадает 95 % расчетных точек) достигается в контрольной точке 3 (положение точки см. на рис. 2,в) и составляет 45 °С. График температуры натрия в контрольной точке 3 приведен на рис. 7.

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 несколько вариантов с глушением модулей в различных местах ВТО. Для всех вариантов суммарный расход натрия через ВТО, температура натрия и воздуха на входе ВТО приняты равными номинальным значениям (см. табл. 1). Результаты расчетов приведены в табл. 3 и на рис. 8.

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. Для объяснения данного эффекта на рис. 9 приведен график распределения расхода натрия по модулям.

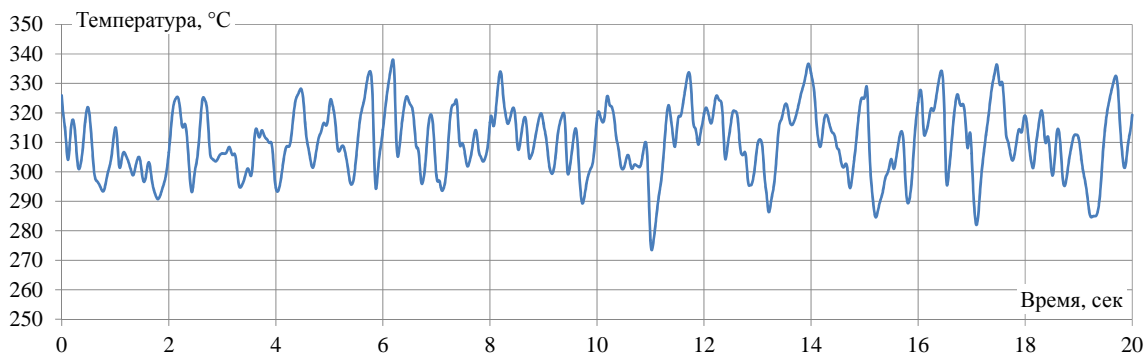


Рис. 7. Изменение температуры натрия в точке 3 со временем

Таблица 3

Характеристики ВТО, рассчитанные по кодам FlowVision (в числителе) и FluidFlow (в знаменателе)

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

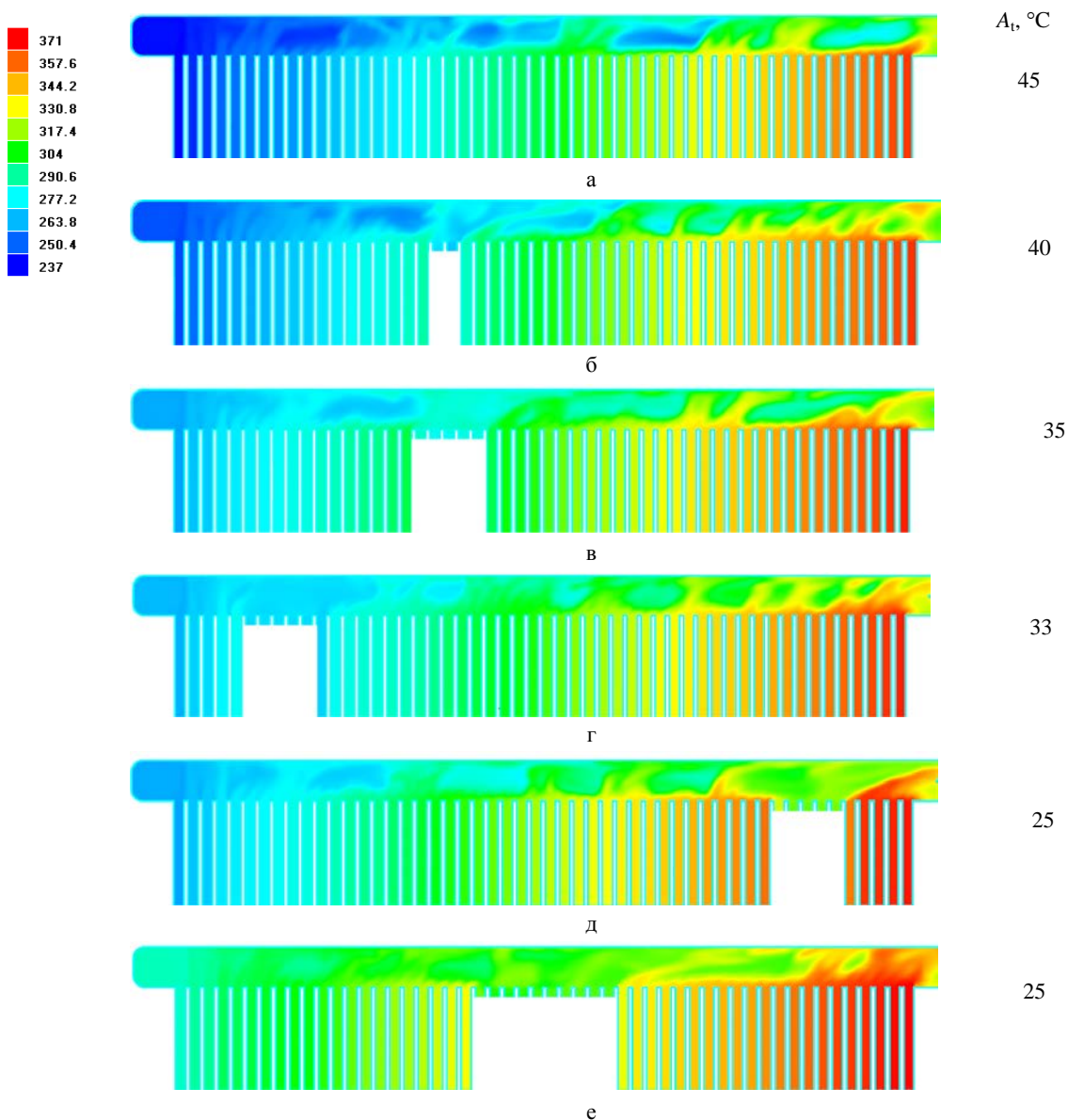


Рис. 8. Температуры натрия в собирающем коллекторе ВТО: а – без заглушенных модулей, б – е – с заглушенными модулями A_p - амплитуда пульсаций температуры натрия в контрольных точках

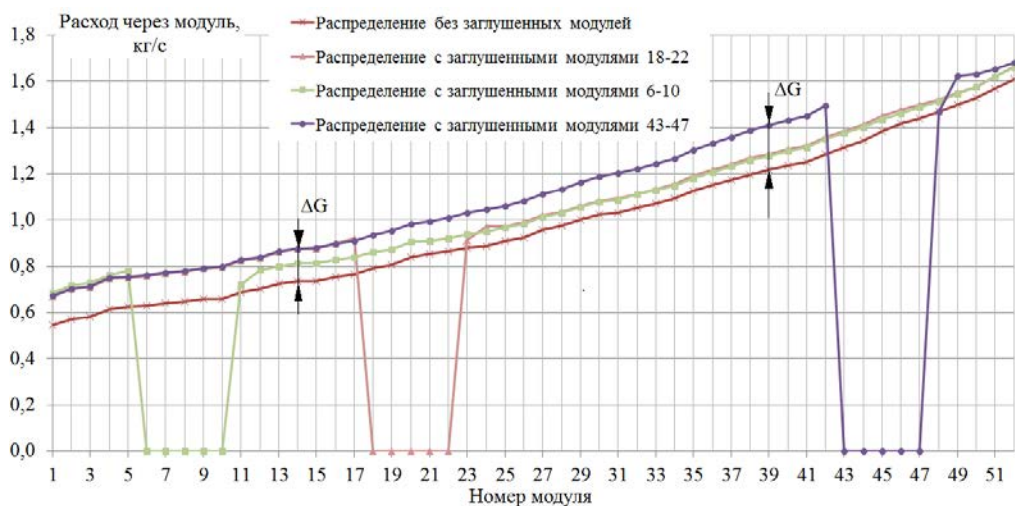


Рис. 9. Распределение расхода натрия по модулям при различных комбинациях заглушенных модулей

Снижение неравномерности при глушении модулей связано с тем, что расход в оставшихся модулях увеличивается неравномерно. Увеличение расхода через модули до заглушенной группы подчиняется зависимости:

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

после заглушенной группы:

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

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) увеличения расхода на модуль 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 °С, амплитуда пульсаций температуры снижается от 45 до 25 °С.

Заключение

Неравномерность распределения расходов натрия по трубкам в модуле ВТО зависит от отношения гидравлических потерь в трубках к общим потерям в модуле. Коэффициент неравномерности 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 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 °С. Увеличение температуры натрия на выходе из модулей в направлении течения натрия в выходном коллекторе приводит к тому, что натрий в ВТО не перемешивается. Максимальная амплитуда пульсаций температуры натрия составляет 45 °С.

При увеличении диаметра коллектора до 300 мм коэффициент неравномерности уменьшается до 1,65, пульсации температуры практически отсутствуют.

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 °С.

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

Список литературы

1. Cruickshank A., Judd. A. M. Problems experienced during operation of the prototype fast reactor Dounreay 1974-1994, Risley.
2. Коломиец Д. О., Левченко Ю. Д., Сорокин А. П. Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления пакета оребренных труб воздушных теплообменников реакторов на быстрых нейтронах // Известия вузов. 2014. № 1. С. 172–182.
3. Mochizuki H., Takano M. Heat transfer in heat exchangers of sodium cooled fast reactors systems // Nuclear Engineering and Design. 2009. Vol. 239. P. 295–307.
4. FluidFlow [Электронный ресурс]: [веб-сайт]. – Электрон. дан. – 2001. – URL: <http://www.FluidFlow.info.com> (дата обращения 24.10.2021).
5. 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.
6. 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. P. 51–79.
7. 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. P. 2024–2036.
8. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Госэнергоиздат. М.: Машиностроение, 1992.