

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛИ ВОЗДУШНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА СИСТЕМЫ АВАРИЙНОГО РАСХОЛАЖИВАНИЯ РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

**А.П. Сорокин, Е.Ф. Иванов, Г.П. Богословская, Ю.Д. Левченко,  
В.В. Привезенцев, К.С. Рымкевич, И.Р. Зуева**  
*ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ» им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск*

**Р**

Представлены результаты экспериментального исследования характеристик теплообмена пучка оребренных труб в экспериментальном рабочем участке, воспроизводящем фрагмент проточной части теплообменника «натрий-воздух» системы аварийного расхолаживания реактора на быстрых нейтронах при течении натрия внутри оребренных труб, охлаждаемых снаружи потоком воздуха. Получен массив данных по значениям температуры на поверхности оребренных трубок при различных скоростях охлаждающего воздуха пучка оребренных труб. Обработка опытных данных по теплоотдаче, проведенная двумя способами, во-первых, на основании результатов прямых измерений температур поверхности оребренной трубки и потока воздуха и, во-вторых, по коэффициенту теплопередачи пучка труб, показала, что расхождение обработанных опытных данных с результатами, полученными по формуле для расчета средней теплоотдачи коридорных пучков труб, не превышает 19%.

Результаты опытов по теплоотдаче показали, что количество тепла, снимаемое с поверхности оребренных трубок при коэффициенте оребрения 7,2, в три – пять раз больше, чем с гладкой поверхности. В опытных данных был отмечен перегрев воздуха в межтрубном пространстве по ходу воздуха. Причиной этого, по всей видимости, является образование застойных зон, вызванное малыми межреберными расстояниями и аккумуляцией тепла в процессе длительного разогрева натриевого контура. Данные могут быть использованы для верификации программ теплогидравлического расчета ВТО САРХ реакторов на быстрых нейтронах. Обоснован перенос опытных данных по теплоотдаче на натурную установку. Оценки мощности натурального теплообменника, сделанные с учетом значений коэффициентов теплопередачи, полученных в опытах, показали, что теплосъем будет несколько ниже (в зависимости от скорости течения воздуха), чем заявленный в проекте.

**Ключевые слова:** быстрый реактор, натрий, воздушный теплообменник, система аварийного расхолаживания, экспериментальные исследования, пучок оребренных труб, теплоотдача.

## ВВЕДЕНИЕ

Проекты реакторов на быстрых нейтронах, разрабатываемые в настоящее время, опираются на научно-технические решения, проверенные в процессе эксплуатации третьего энергоблока Белоярской АЭС с реактором БН-600. Усовершенствования, введенные в проекты, обеспечивают существенное повышение уровня безопасности и экономичности энергоблока [1], в частности, предусмотрен ряд инновационных решений по пассивным системам аварийной защиты и расхолаживания реакторной установки (РУ).

В ОАО «ОКБМ Африкантов» (г. Нижний Новгород) разработана конструкция воздушно-натриевого теплообменника (ВТО) системы аварийного расхолаживания (САРХ) реакторной установки на быстрых нейтронах, предназначенного для охлаждения реактора после аварийной остановки. Проектная схема течения воздуха через пучок теплопередающих оребренных труб приведена на рис. 1. ВТО САРХ постоянно находится в режиме «горячего» ожидания. Предотвращение отказа ВТО САРХ при пуске в результате замораживания натрия обеспечивается электроподогревом воздуха в корпусе теплообменника электронагревателями.

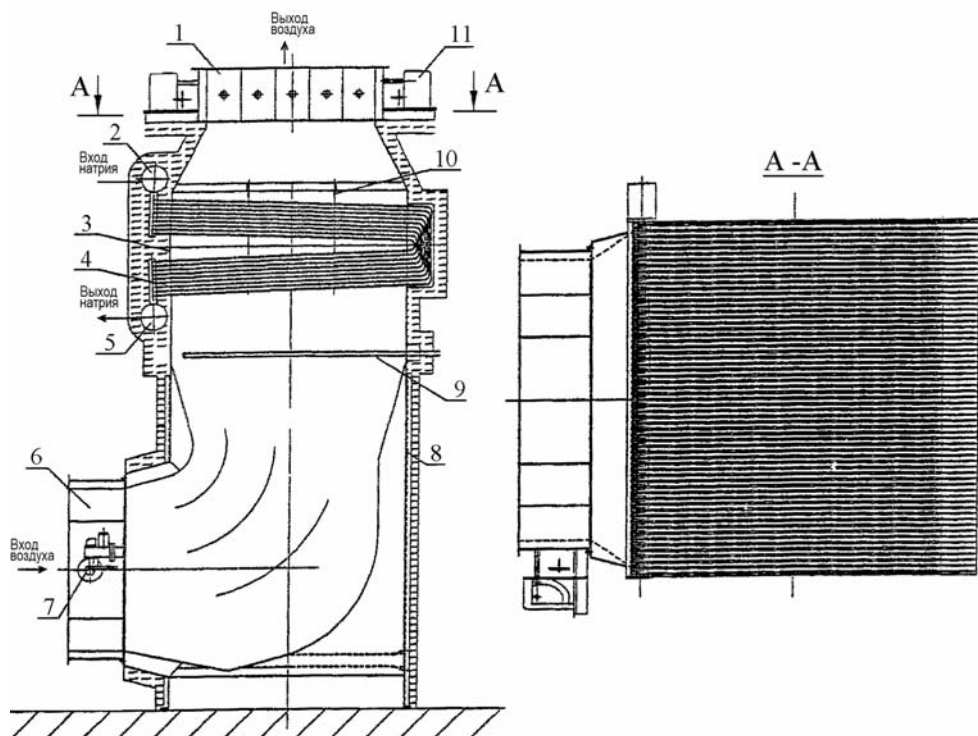


Рис. 1. Воздушный теплообменник САРХ РУ БН-800: 1 – шибер выходной; 2 – коллектор входной; 3 – теплообменник; 4 – пучок трубный; 5 – коллектор выходной; 6 – шибер входной; 7 – привод шибера входного; 8 – корпус; 9 – электронагреватели; 10 – элементы дистанционирования труб; 11 – привод шибера выходного

После срабатывания аварийной защиты открываются шиберы на выходе из теплообменника, и течение охлаждающего воздуха через пучок теплопередающих оребренных труб происходит за счет естественной циркуляции воздуха.

Поверхность теплообмена, а соответственно, и тепловая мощность воздушного теплообменника в значительной степени определяются высоким термическим сопротивле-

нием со стороны воздуха. Теплообменник должен иметь гидравлическое сопротивление, обеспечивающее достаточный расход охлаждающего воздуха. Сложность геометрии оребрения труб со стороны воздуха не позволяет достаточно точно рассчитать теплоотдачу оребренных труб. Получение экспериментальных данных по теплопередаче пучка оребренных труб теплообменника должно обеспечить обоснование конструкции ВТО САРХ и оптимизировать его весогабаритные параметры.

Для проведения экспериментальных исследований в обоснование надежности работы принятого варианта конструкции оребренных теплообменных труб ВТО САРХ РУ БН-800 в ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ» (г. Обнинск) на жидкометаллическом экспериментальном стенде АР-1 [2] была создана специальная экспериментальная установка.

Объектом исследований являлись характеристики теплообмена пучка оребренных труб в экспериментальном рабочем участке, воспроизводящем фрагмент проточной части ВТО САРХ РУ БН-800, при течении натрия внутри оребренных труб, охлаждаемых снаружи потоком воздуха.

Перед исследователями была поставлена задача получить экспериментальные данные по теплоотдаче от оребренных труб экспериментального рабочего участка к потоку охлаждающего воздуха для обоснования достоверности проектных расчетов и эффективности воздушного теплообменника системы аварийного расхолаживания.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Рабочий участок модели ВТО САРХ был установлен в стендовом зале экспериментального натриевого стенда АР-1 на вертикальном участке в линии воздушного охлаждения.

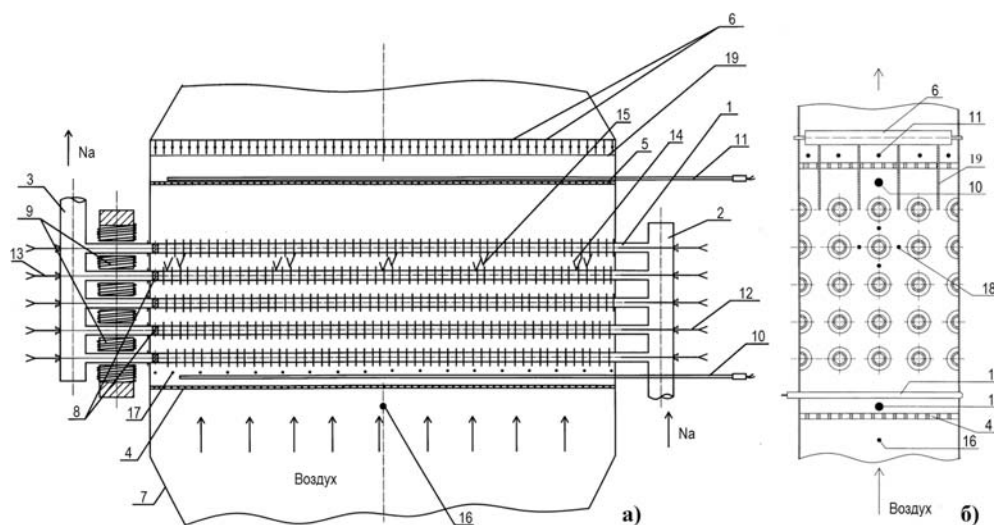


Рис. 2. Продольное (а) и поперечное (б) сечения рабочего участка: 1 – трубный пучок; 2 – входной коллектор; 3 – выходной коллектор; 4 – профилирующая решетка на входе; 5 – профилирующая решетка на выходе; 6 – жалюзи; 7 – корпус; 8 – смеситель; 9 – электромагнитный расходомер; 10 – гидродинамический зонд; 11 – термопарный зонд; 12 – термопары на входе в трубки центрального ряда; 13 – термопары на выходе из центрального ряда; 14 – термопары на поверхности трубки; 15 – термопары на ребрах; 16 – термопара на входе воздуха; 17 – нагреватель; 18 – термопары в воздушном пространстве в зазорах между трубками измерительного ряда и смежными трубками; 19 – перегородка

Стенд АР-1 предназначен для исследования теплофизических процессов, происходящих в отдельных узлах установки при пусковых, переходных и аварийных режимах [2]. Стенд АР-1 состоит из трех контуров: в первом и втором контурах теплоносителем служит эвтектический сплав натрий-калий, третий контур – натриевый. Первый и третий контуры являются основными.

Конструкция экспериментального рабочего участка показана на рис. 2.

Проточная часть экспериментального воздушного тракта участка состояла из трех частей: входной, срединной и выходной. Основным узлом являлась срединная часть – теплообменник, включающий в себя 15 оребренных труб штатной конструкции с наружным диаметром 22 мм (рис. 2). Оребрение было выполнено из ленты, приваренной к наружной поверхности теплопередающей трубы, со следующими параметрами: высота ребра – 9 мм, толщина ребра – 0,8 мм, шаг спирали ребра – 4,2 мм. Трубный пучок ограничивался обечайкой в форме прямоугольного параллелепипеда с проточной частью  $276 \times 1000$  мм<sup>2</sup> и высотой 508 мм. Расположение оребренных трубок выбрано коридорным – по пять в ряду с шагами  $69 \times 64,5$  мм<sup>2</sup>. Длина пучка, омываемого воздухом, – 1000 мм. На поверхностях обечайки были закреплены вытеснители, изготовленные из штатных труб, которые также служили ребрами жесткости конструкции.

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ОТ ПОВЕРХНОСТИ ПУЧКА ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ К ВОЗДУХУ**

Аналитические соотношения для теплоотдачи в пучках оребренных труб, учитывающие влияние формы ребра, толщины, высоты и теплопроводящих свойств материала, из которого оно выполнено, на распределение температур и теплового потока по поверхности ребра, получены на основании аналитических решений задач о теплопроводности оребренной трубы. В этих решениях не учитываются условия гидродинамического обтекания оребренной поверхности и связанное с этим влияние на распределение температур по ребру. Поэтому практическое применение этих решений для расчета теплоотдачи, особенно пучков оребренных труб, ограничено.

При поперечном обтекании труб распределение скоростей и температур в межреберном пространстве зависит от характера течения в нем – ламинарного, турбулентного и вихревого. Даже для геометрически простых одиночных элементов, например, для круглой трубы, распределение температур и скоростей по периметру удается аналитически описать только в зоне до отрыва пограничного слоя.

Поперечное обтекание пучка труб – процесс еще более сложный. Условия обтекания передних и глубинных рядов пучка значительно различаются. Турбулентность набегающего потока увеличивается по течению и, начиная с четвертого ряда, стабилизируется. Поперечное обтекание пучка оребренных труб характеризуется весьма сложной гидродинамической картиной. Сложность этого процесса отражается на распределении локальных коэффициентов теплоотдачи по поверхности обтекаемой оребренной трубы. Проведенные ранее исследования показывают, что при обтекании оребренной трубы ввиду сложности ее формы происходит изменение локальных коэффициентов теплоотдачи как по окружности, так и по высоте ребра. Оно зависит и от параметров оребрения трубы, и от расположения труб в пучке, и от гидродинамического режима потока [3].

При подготовке экспериментов по исследованию теплоотдачи в коридорном пучке поперечно омываемых труб воздухом был проведен анализ имеющихся данных [3–10]. Изложенные в литературе методики и зависимости очень часто справедливы только для определенной геометрии и определенных режимов течения теплоносителя.

Порядок проведения опытов был следующим. После стабилизации расхода натрия в контуре градуировались электромагнитные расходомеры (ЭМР), установленные на выходе из каждого ряда пучка труб (левый, центральный, правый). По завершении внутриконтурной градуировки ЭМР выставлялись режимные параметры по воздуху и натрию. Измерения проводились по достижении стационарных режимов.

Регистрация данных выполнялась с помощью измерительного комплекса на базе персонального компьютера по специально разработанным прикладным программам. Система автоматизированного управления экспериментом осуществляла контроль за работой стенда и рабочего участка. В процессе измерений проводился мониторинг основных параметров и с помощью заданных значений установок осуществлялось сраба-

тывание предупредительной сигнализации и аварийной защиты.

В качестве измерительной была выбрана четвертая труба центрального ряда пучка, на которой с помощью термопар регистрировались значения температуры у основания и на вершине ребра в пяти сечениях по длине трубки. В ходе экспериментов регистрировались параметры, указанные в табл. 1.

Таблица 1

Измеряемая величина	Тип преобразователя
Суммарный расход натрия через пять измерительных труб	Электромагнитный расходомер
Относительный расход натрия через измерительные трубы	Магнитное устройство
Температура натрия на входе в измерительную трубу, °С	Термопара ХК
Среднесмешанная температура натрия на выходе из измерительной трубы, °С	Термопара ХК
Температура наружной поверхности в пяти сечениях по длине измерительной трубы, °С	Термопара ХК
Температуры поверхности на вершинах ребер в пяти сечениях по длине измерительной трубы, °С	Микротермопара ХК
Температура воздуха в четырех положениях вокруг измерительной трубы, °С	Термопарный зонд, термопары ХК
Перепад давления в воздухе, Па	Трубка Пито, Метран-100ДД
Температура воздуха перед пучком, °С	Термопарный зонд, термопары ХК
Температура воздуха после пучка, °С	Термопарный зонд, термопары ХК

Следует отметить, что в результате обработки экспериментальных данных были оценены максимальные значения коэффициентов теплообмена со стороны воздуха на оребренной трубе в пучке.

Данные [3] свидетельствуют, что максимальные значения локальных коэффициентов теплоотдачи имеют место в части трубы  $\varphi = 90$  и  $270^\circ$ , что соответствует наиболее узкому сечению пучка. Это вполне естественно, так как в этих местах ввиду сужения проходного сечения значительно повышается скорость потока. Также указывается, что распределение локальных коэффициентов теплоотдачи по периметру оребренной трубы в пучке будет более равномерным, чем вокруг одиночной трубы. Несмотря на то, что оребрение на трубе идет по спирали, различие в теплоотдаче на обеих сторонах трубы незначительно.

Увеличение скорости поперечного течения воздуха приводит к следующему: относительный коэффициент теплоотдачи на поверхности трубы по направлению течения, начиная с лобовой точки, увеличивается, достигает максимума вблизи  $\varphi \sim 70 - 90^\circ$  и затем резко падает. Для одиночной трубы в задней части при низких значениях  $Re$ , видимо, вследствие эффективного влияния на теплоотдачу обратной струи в клиновидном потоке относительный коэффициент теплоотдачи несколько повышается. При более высоких  $Re$  этот эффект незначительный. В глубинном ряду труб пучка он вовсе не обнаружен, и в этом случае кормовая часть обладает самой низкой теплоотдачей. При более низких значениях  $Re$  теплоотдача по окружности более равномерна по сравнению со случаями высоких  $Re$ .



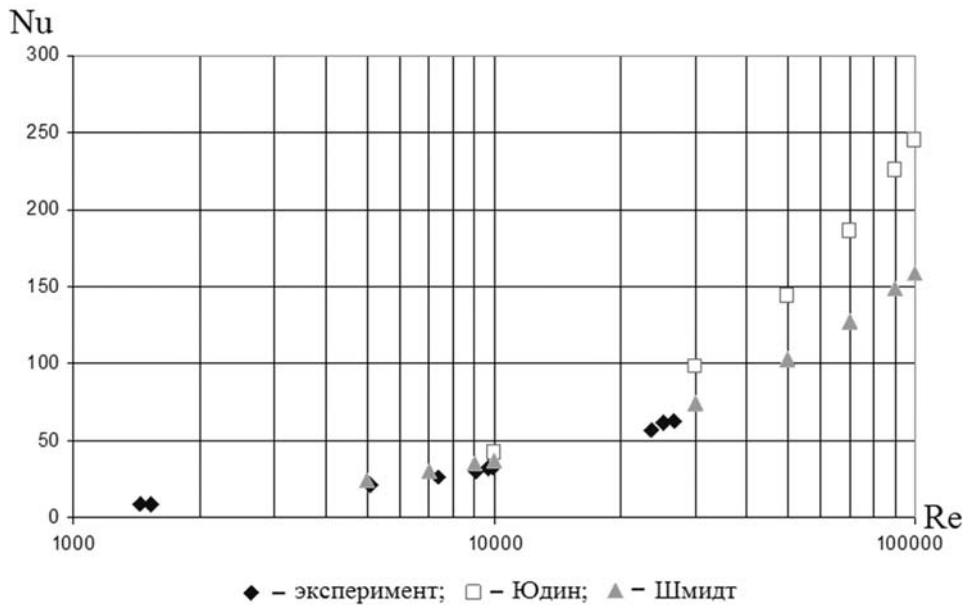


Рис. 3. Сравнение обработанных экспериментальных данных по максимальной теплоотдаче вокруг измерительной трубки с расчетами по формулам Юдина [9] и Шмидта [10]

На рисунке 3 показана зависимость числа Нуссельта, рассчитанного по максимальному коэффициенту теплообмена по периметру оребренной трубы, от числа Рейнольдса для экспериментальных режимов в сравнении с результатами расчета по формулам из работ [10, 11]:

$$Nu = 0,2Re^n Pr^{0,33} \varphi^{-0,7} C_z C_s, \quad (1)$$

$$Nu = 0,303Re^{0,625} Pr^{0,333} \varphi^{-0,375} (Pr / Pr_w)^{0,35}, \quad (2)$$

где  $\varphi = ((d_p^2 - d^2)/2 + d_p \times \delta_p + d(S_p - \delta_p)) / dS_p$  – коэффициент оребрения;  $C_z, C_s$  – поправки на номер ряда и шаги трубного пучка.

Число Рейнольдса рассчитывалось по характерному размеру трубного пучка

$$\lambda_0 = (S_{тр} \cdot d + S_p \cdot (0,785 \cdot (d_p^2 - d^2))^{1/2}) / S_n, \text{ м}, \quad (3)$$

где  $S_n$  – полная поверхность оребренной трубы,  $m^2$ ;  $S_p$  – поверхность ребер,  $m^2$ ;  $S_{тр}$  – площадь участка поверхности трубы, не занятой ребрами,  $m^2$ .

Коэффициент теплоотдачи по воздуху рассчитывался как

$$\alpha_v = \alpha_{пр} / (E \cdot \mu_p \cdot \psi \cdot S_p / S_n + S_{тр} / S_p), \text{ Вт/м}^2 \text{ К}, \quad (4)$$

где  $\alpha_{пр} = Q_1 / (t_{ст} - t_{возд}) S_n$  – приведенный коэффициент теплоотдачи,  $Вт/м^2К$ ;  $E = th(Bi_L^{1/2}) / Bi_L^{1/2}$  – коэффициент эффективности ребра с постоянным поперечным сечением;  $Bi_L = \alpha L / \lambda$  – число Био, в запись которого входит коэффициент теплообмена  $\alpha$ ,  $Вт/м^2К$ ;  $L = Pl^2 / F$  – комплекс, имеющий размерность длины и составленный из значений периметра  $P$ , высоты  $l$  и поперечного сечения ребра  $F$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности ребра;  $\mu_p = 1$ ;  $\psi = 0,965$ .

Рисунок 3 наглядно демонстрирует хорошее согласование формул (1) и (2) и результатов обработки экспериментальных данных.

Следует отметить, что в результате обработки экспериментальных данных получены несколько завышенные коэффициенты теплоотдачи при малых числах  $Re$  по сравнению с данными [9, 10]. Это вполне логично, так как при таком небольшом шаге оребрения, который был реализован в экспериментах, влияние числа  $Re$  на интенсивность тепло-

отдачи больше [3], чем в пучке труб с широким оребрением. С увеличением числа Re толщина пограничных слоев уменьшается, что ведет к увеличению значения коэффициента теплоотдачи.

По результатам опытов коэффициенты теплообмена у вершины ребра были на 30 – 90% выше, чем у основания ребра. Полученная картина процесса теплоотдачи хорошо согласуется с представлением об образовании на трубе пограничного слоя и о том, что распределение локальных коэффициентов теплоотдачи по периметру ребра неодинаково. Сильно турбулизированное, но, по-видимому, либо медленное течение в кормовой части ребра, либо вообще отсутствие течения не повышает интенсивность теплоотдачи.

Сравнение данных для одиночной трубы и трубы, установленной в пучке, при одних и тех же Re показывает у последней более высокую теплоотдачу в верхней части ребра, что объясняется влиянием турбулизирующего действия передних рядов труб.

Результаты исследований других авторов показывают, что средняя по периметру теплоотдача на гладких и оребренных трубах не будет сильно различаться.

В опытных данных был отмечен перегрев воздуха в межтрубном пространстве по ходу воздуха. Причиной этого, по всей видимости, является образование застойных зон, вызванное малыми межреберными расстояниями и аккумуляцией тепла в процессе длительного разогрева натриевого контура.

Прерывное соединение ребер и трубы (точечная сварка) снижает эффективность оребренной поверхности. Термическое сопротивление между трубой и ребром приводит к снижению суммарной теплоотдачи и к росту температуры поверхности трубки. Количество тепла, снимаемое с поверхности оребренной трубы, в среднем в три – пять раз больше, чем с гладкой поверхности (рис. 4).

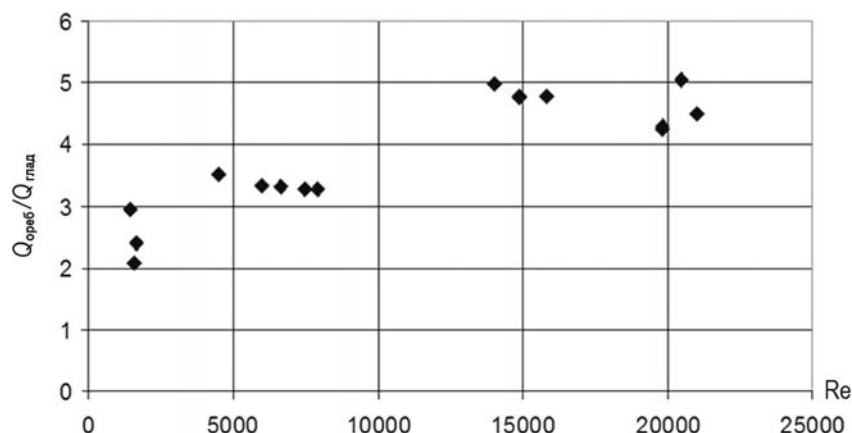


Рис. 4. Сравнение количества тепла, снимаемого с оребренной и гладкой поверхности теплообмена в зависимости от режима течения воздуха (для условий экспериментов)

Возможность переноса значений среднего коэффициента теплопередачи  $k$ , полученного при моделировании мощности по натрию и воздуху, обосновывается следующими факторами.

Средний логарифмический температурный напор оценивается как

$$\Delta t_{л}^{cp} = \psi (\Delta t_6 - \Delta t_m) / (\ln \Delta t_6 / \Delta t_m), \quad (5)$$

где  $\Delta t_6$ ,  $\Delta t_m$  – максимальный и минимальный температурные напоры, реализуемые в противоточной схеме.

Несмотря на то, что тепловые схемы натурального аппарата и модели отличаются, что определяется разным характером перемешивания воздуха в модельном и натурном пучке [11], оценки поправочного коэффициента, проведенные для параметров опытов показали, что с точностью до 0,5 – 1% значения поправочного

коэффициента  $\psi$  для модели и натурной установки совпадают.

Приблизительные оценки мощности натурального теплообменника, сделанные с учетом значений коэффициентов теплопередачи, полученных в опытах, показали, что теплосъем будет несколько ниже (в зависимости от скорости течения воздуха), чем заявленный в проекте.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведенных экспериментальных исследований на модели воздушного теплообменника системы аварийного расхолаживания получен массив данных по значениям температуры на поверхности оребренных труб теплообменника при различных скоростях охлаждающего воздуха, которые могут быть использованы для верификации программ теплогидравлического расчета ВТО САРХ реакторов на быстрых нейтронах.

2. Обоснован перенос опытных данных по теплоотдаче на натурную установку.

3. Опытные данные по теплоотдаче, полученные двумя способами, во-первых, на основании результатов прямых измерений температур поверхности оребренной трубы и потока воздуха и, во-вторых, по коэффициенту теплопередачи пучка труб, показали, что расхождение обработанных опытных данных с результатами, полученными по формуле для расчета средней теплоотдачи коридорных пучков труб [6], не превышает 19%.

4. Результаты опытов по теплоотдаче показали, что количество тепла, снимаемое с поверхности оребренных труб при коэффициенте оребрения 7,2, в три – пять раз больше, чем с гладкой поверхности.

5. Для уточнения вклада ребристой поверхности в интенсификацию теплообмена, обобщения данных с целью получения обобщенной расчетной формулы, изучения влияния застойных зон на формирование температурных полей в пучке оребренных труб желательно провести дополнительные эксперименты.

## Литература

1. Зверев Д.Л., Васильев Б.А., Седаков В.Ю., Кузавков Н.Г. Освоение технологии быстрых натриевых реакторов. Создание РУ БН-800. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – №2. – С. 130-142.
2. Efanov A.D., Sorokin A.P., Matjuhin N.M., Chernonog V.L. The experimental base of SSC RF-IPPE for research of liquid metals heat and mass transfer // Hydrodynamics and heat transfer in reactor components cooled by liquid coolant in single / two-phase (working material), IAEA. – TWG-FR/125. – Vienna, Austria. – 2005. – PP. 8-25.
3. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. – М.: Наука. – 1982.
4. Михеев М.А. Расчетные формулы конвективного теплообмена. // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1966. – №5. – С. 95-105.
5. Исаченко В.П. – В кн.: Теплопередача и тепловое моделирование. – М.: Изд. АН СССР. 1959. – С. 213-225.
6. Исаченко В.П., Салом-Заде Ф.Г. Теплоотдача в коридорных пучках поперечно омываемых гладких труб. // Теплоэнергетика. – 1969. – №5. – С. 84-87.
7. Методика и зависимости для теоретического расчета теплообмена и гидравлического сопротивления оборудования АЭС (РТМ 24.031.05-72). – М.: Министерство тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения. – 1974.
8. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – Новосибирск: Наука – Сибирское отделение. – 1970.
9. Юдин В.Ф. Теплообмен в оребренных пучках. – Л.: Энергия. – 1980.
10. Schmidt H.T. Der Wdrmebergang an Rippenrohre und die Berechnung von Rohrbandel – Wdrmeaustau – Schern. – Kdltetech. – 1963. – Bd. 15. – no. 4, pp. 98-102, no. 12, pp. 370-378.



11. *Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.Л.* Справочник по теплогидравлическим расчетам. 2-е изд., испр. и доп. – М.: Энергатоиздат. – 1990.

Поступила в редакцию 19.03.2013 г.

### **Авторы**

Сорокин Александр Павлович, заместитель директора Института ядерных реакторов и теплофизики (ИЯРиТ), ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», доктор техн. наук.

E-mail: sorokin@ippe.ru

Иванов Евгений Федорович, ведущий научный сотрудник ИЯРиТ, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», кандидат техн. наук.

Богословская Галина Павловна, ведущий научный сотрудник ИЯРиТ, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», кандидат техн. наук.

Левченко Юрий Данилович, ведущий научный сотрудник ИЯРиТ, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», доктор техн. наук.

E-mail: levchenko@ippe.ru

Привезенцев Виталий Владимирович, начальник лаборатории ИЯРиТ, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», кандидат техн. наук.

Рымкевич Казимир Станиславович, инженер-исследователь лаборатории ИЯРиТ, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ».

Зуева Ирина Ромуальдовна, заместитель начальника лаборатории ИЯРиТ, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ».

**EXPERIMENTAL RESEARCHES OF THERMAL HYDRAULIC CHARACTERISTICS  
IN THE MODEL OF SODIUM-AIR HEAT EXCHANGER  
FOR FAST REACTOR EMERGENCY COOLING SYSTEM**

Sorokin A.P., Ivanov E.F., Bogoslovskaya G.P., Levchenko Yu.D., Privezentsev V.V.,  
Rymkevich K.S., Zueva I.R.,

State Scientific Center of the Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering named after A.I. Leypunsky, Obninsk, Kaluga reg., Russia

## ABSTRACT

Results of experimental researches of thermohydraulic characteristics in the bundle of finned tubes are presented in the paper. The test section represents a fragment of flow part of sodium-air heat exchanger in the emergency cooling system of a fast reactor, with sodium flow inside the tubes and cooled by lateral flow of air. A great data array of temperature values on the finned tubes surface at different air velocities and hydraulic characteristics of finned tube bundle were gained. Experimental data on heat transfer were processed in two ways: first, on the basis of direct measurements of temperatures on the surface of a finned tube and air flow and, secondly, on mean value of heat transfer coefficient of tube bundle. Analysis of experimental data has shown that a divergence of both approaches does not exceed 19%. It was found in the tests that the heat flow removed from a finned tube's surface with a finned surface factor being equal to 7.2 is 3-5 times more intensive than that from smooth surface. In the course of the experiments air overheating was noticed in the intertubular space in the direction of air flow. Most likely, it is due to formation of stagnant zones caused by small interfin spaces and heat accumulation during long warming up of the sodium circuit. Experimental data can be used for verification of thermal hydraulic numerical codes for sodium-air heat exchanger in the emergency cooling system of fast reactors. The experimental results application to a full-scale facility is substantiated. Power estimations of a full-scale heat made with regard to the value of experimental heat transfer coefficients have shown that heat removal can be lower (depending on the velocity of air flow) than claimed in the design.

**Key words:** fast reactor, sodium, air heat exchanger, emergency cooling system, experimental researches, bundle of finned tubes, heat transfer.

## REFERENCES

1. Zverev D.L., Vasil'ev B.A., Sedakov V.Yu., Kuzavkov N.G. Osvoenie tehnologii bystrykh natrievykh reaktorov. Sozdanie RU BN-800 [Mastering the technology of fast sodium reactors. Creation of BN-800]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2011, no. 2, pp. 130–142.
2. Efanov A.D., Sorokin A.P., Matjuhin N.M., Chernonog V.L. The experimental base of SSC RF-IPPE for research of liquid metals heat and mass transfer. Hydrodynamics and heat transfer in reactor components cooled by liquid coolant in single / two-phase (working material), IAEA. TWG-FR/125. Vienna, Austria. 2005, pp. 8–25.
3. Zhukauskas A.A. *Konvektivnyj perenos v teploobmennikah* [Convective transfer in heat exchangers]. Moscow, Nauka Publ. 1982.
4. Miheev M.A. Raschetnye formuly konvektivnogo teploobmena [Convective heat exchange calculation formulas]. *Izvestiya AN SSSR. Energetika i transport*. 1966, no. 5, pp. 95–105.
5. Isachenko V.P. – V kn.: *Teploperedacha i teplovoe modelirovanie* [In the book «Heat

- transfer and thermal modeling»]. Moscow, AN SSSR Publ. 1959, pp. 213–225. (in Russian)
6. Isachenko V.P., Salom-Zade F.G. Teplootdacha v koridornyh puchkah poperechno omyvaemyh gladkih trub [Heat exchange at the corridor bundles of smooth tubes with transverse flushing]. *Teploenergetika*. 1969, no. 5, pp. 84–87.
7. *Metodika i zavisimosti dlya teoreticheskogo rascheta teploobmena i gidravlicheskogo soprotivleniya oborudovaniya AES (RTM 24.031.05-72)* [Methodology and dependencies for theoretical calculation of heat exchange and hydraulic resistance of NPP equipment (RTM 24.031.05-72)]. Moscow, Ministerstvo tyazhelogo, energeticheskogo i transportnogo mashinostroeniya Publ. 1974.
8. Kutateladze S.S. *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of the theory of heat exchange]. Novosibirsk. Nauka Publ. 1970.
9. Yudin V.F. *Teploobmen v orebrennyh puchkah* [Heat exchange of the finned bundles]. Leningrad, Energiya Publ. 1980.
10. Schmidt H.T. Der Warmebergang an Rippenrohre und die Berechnung von Rohrundel Warmeaustau – Schern. – Kaltetechn. – 1963. – Bd. 15. – H. 4. – pp. 98-102. – H. 12. – pp. 370-378.
11. Kirillov P.L., Yur’ev Yu.S., Bobkov V.P. *Spravochnik po teplogidravlicheskim raschetam* [Handbook of thermohydraulic calculations]. Moscow, Energoatomizdat Publ. 1990.

## Authors

Sorokin Aleksandr Pavlovich, Deputy Director, Institute for Nuclear Reactors and Thermal Physics (INR&T), FSUE «SSC RF-IPPE». Dr. Sci. (Engineering).

E-mail: sorokin@ippe.ru

Ivanov Evgenij Fyodorovich, Leading Researcher, INR&T, FSUE «SSC RF-IPPE», Cand. Sci. (Engineering).

Levchenko Yuriy Danilovich, Leading Researcher, INR&T, FSUE «SSC RF-IPPE», Dr. Sci. (Engineering).

E-mail: levchenko@ippe.ru

Bogoslovskaja Galina Pavlovna, Leading Researcher, INR&T, FSUE «SSC RF-IPPE», Cand. Sci. (Engineering).

Privezentsev Vitalij Vladimirovich, Head of Laboratory, INR&T, FSUE «SSC RF-IPPE», Cand. Sci. (Engineering).

Rymkevich Kazimir Stanislavovich, Engineer-Researcher, INR&T, FSUE «SSC RF-IPPE».

Zueva Irina Romual’dovna, Deputy Head of Laboratory, INR&T, FSUE «SSC RF-IPPE».