

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПАКЕТА ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ ВОЗДУШНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

Д.О. Коломиец, Ю.Д. Левченко, А.П. Сорокин  
ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ» им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Система аварийного отвода тепла (САОТ) реактора на быстрых нейтронах включает в себя автономные воздушные теплообменники (ВТО), в которых тепло отводится к воздуху. Теплопередающие трубки с наружным однозаходным винтовым оребрением располагаются в теплообменнике в коридорном порядке. За счет напора естественной конвекции в системе *воздушный теплообменник - вытяжная труба* происходит поперечное обтекание 18-ти трубных моделей (9×2). Оребренные трубки наклонены к поперечной плоскости теплообменника под углом  $\pm 1,5^\circ$ .

Результаты опытов обрабатывались для представления в виде зависимости от числа  $Re$ . В качестве масштаба скорости использовалась средняя скорость потока воздуха на входе в трубный пакет, линейным масштабом был наружный диаметр трубки без оребрения ( $d = 0,022$  м).

В работе дано сравнение проектных расчетов гидравлических потерь при поперечном обтекании воздухом пакета оребренных труб с экспериментальными результатами.

**Ключевые слова:** реактор на быстрых нейтронах, воздушный теплообменник (ВТО), система аварийного отвода тепла (САОТ), поперечное обтекание, аэродинамический стенд В-2, пучок оребренных труб, измерительный комплекс, экспериментальные исследования, коэффициент гидравлического сопротивления, трубы с винтовым оребрением.

## ВВЕДЕНИЕ

Воздушные теплообменники системы аварийного отвода тепла (ВТО САОТ) реакторов на быстрых нейтронах типа БН являются узлами обеспечения безопасности реакторной установки, предназначенными для расхолаживания реактора после аварийной остановки. Воздушные теплообменники могут использоваться для отвода остаточного тепловыделения в режимах нормальной эксплуатации, например, при перегрузке реак-

© Д.О. Коломиец, Ю.Д. Левченко, А.П. Сорокин, 2014

тора, в периоды проведения ППР. ВТО САОТ находится постоянно в режиме «горячего» ожидания.

Количество ВТО в реакторной установке четыре (по 13 МВт в каждом) или восемь (по 10 МВт). Трехконтурная САОТ состоит из четырех погружных автономных натрий-натриевых теплообменников. Тепло от натрия первого контура САОТ передается к воздуху в теплообменниках ВТО через промежуточный контур. В каждой петле САОТ находится один или два ВТО. Принципиальная схема САОТ приводится на рис. 1.

Проектная схема течения охлаждающего воздуха через пучок теплопередающих оребренных труб дана на рис. 2. Предотвращение отказа ВТО при пуске в результате замораживания натрия обеспечивается электроподогревом объема воздуха в корпусе теплообменника.

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

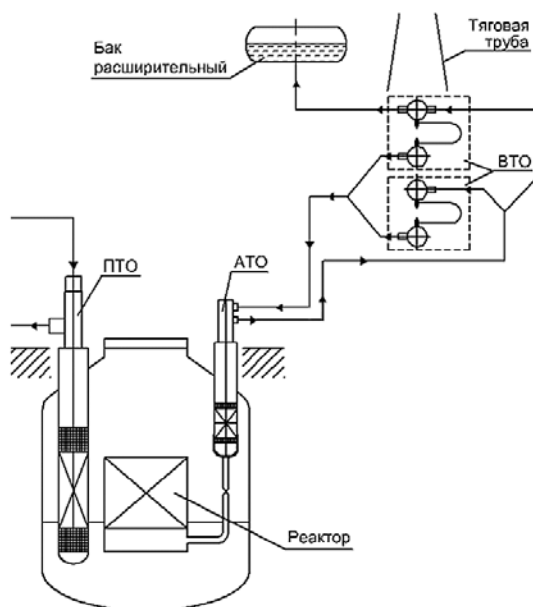


Рис. 1. Принципиальная схема САОТ реактора на быстрых нейтронах с единичной тепловой мощностью ВТО 10 МВт

Теплообменник с оребренными со стороны воздуха трубками должен иметь гидравлическое сопротивление, обеспечивающее достаточный расход охлаждающего воздуха. Сложность геометрии оребрения трубок не позволяет рассчитать достаточно точно поверхность теплообменника и его тепловую мощность.

Теплообменник ВТО САОТ состоит из девяти поперечно расположенных модулей. Таким образом, проточная часть со стороны охлаждающего воздуха представляет практически поперечно обтекаемую систему оребренных труб. По ходу потока воздуха 18 оребренных труб располагаются в коридорном порядке. Оребренные трубки одного модуля наклонены к горизонту под углами  $\pm 1,5^\circ$ .

Объектом испытаний являлся рабочий участок, моделирующий воздушную проточную часть пакета оребренных труб ВТО САОТ. Рабочий участок проектировался и изготавливался в ГНЦ РФ-ФЭИ.

Цель испытаний – 1) создание массива опытных данных по гидравлическому сопротивлению пакета поперечно обтекаемых труб, расположенных в коридорном порядке, имеющих тесно расположенные по винту ребра относительно большой высоты; 2) обо-

снование достоверности проектного кода, применявшегося при проектировании ВТО САОТ перспективных реакторов типа БН на быстрых нейтронах для условий воздушного охлаждения натрия в режиме естественной конвекции.

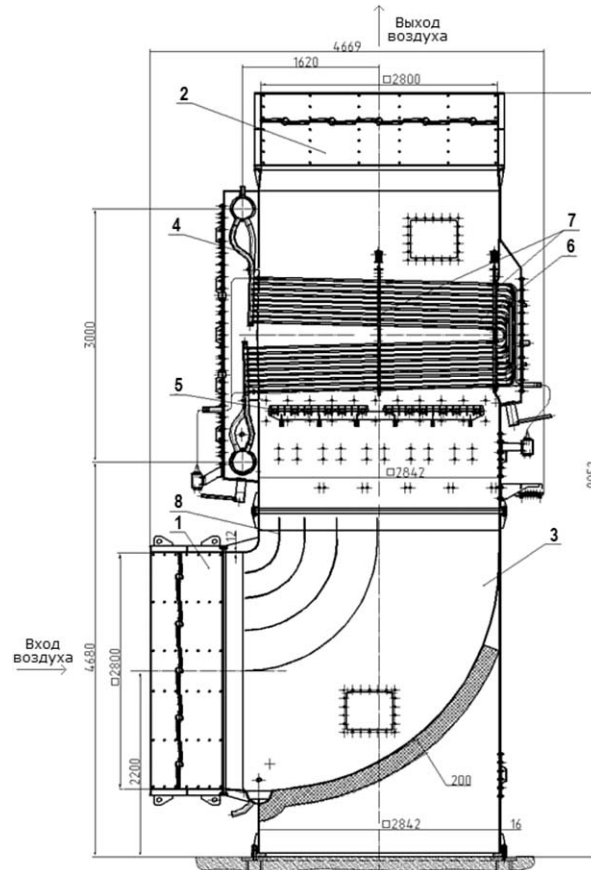


Рис. 2. Общий вид воздушного теплообменника (ВТО САОТ) тепловой мощностью 10 МВт: 1 – шибер входной; 2 – шибер выходной; 3 – секция воздухопроводная; 4 – секция теплообменная; 5 – блок электронагревательный; 6 – теплообменная трубка; 7 – дистанционирующие элементы; 8 – направляющие

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВТО САОТ**

В работе проводилось приближенное моделирование течения воздуха в пакете оребренных труб ВТО САОТ реактора на быстрых нейтронах.

Соответствие модели ВТО натурному изделию состояло в

- полномасштабном моделировании трубного пакета по количеству модулей на длине проточной части натурного пакета оребренных труб;
- точном моделировании геометрии оребренных труб и шагов расположения их в пакете;
- точном моделировании рабочей среды (воздуха) в модели ВТО;
- точном моделировании режима течения воздуха в натурном ВТО режимом течения в модели по числам Рейнольдса.

Приближенность модели ВТО-10 к натурному изделию состояла в

- уменьшении длины поперечно обтекаемых оребренных труб натурного ВТО до 0,5 м в модели;
- проведении опытов при изотермическом режиме и напорном течении воздуха в

экспериментальной модели ВТО;

– замене напора естественной конвекции в натурном ВТО напором вентилятора аэродинамической установки.

Основным приближением при моделировании являлось уменьшение длины оребренных труб. При этом в модели увеличивалась относительная величина поверхности обечайки пакета оребренных труб. Поверхность обечайки вносила свой вклад в общее гидравлическое сопротивление модели или натурального ВТО. В экспериментальной аэродинамической модели поверхность обечайки составляла 0,013 от общей поверхности оребренных труб по сравнению с 0,0031 для натурального ВТО. Различие составляло 4,2 раза. Это допущение считалось обоснованным, т.к. основной вклад в гидравлическое сопротивление вносит обтекание оребренных труб пакета.

Схема экспериментального аэродинамического стенда дана на рис. 3. Поток воздуха в контуре стенда создавался центробежным вентилятором ЦВ-18, тип 9 с максимальной производительностью  $10^4$  м<sup>3</sup>/ч и максимальным напором  $10^4$  Па при 2100 оборотов/мин рабочего колеса. Мощность электродвигателя вентилятора равнялась 50 кВт.

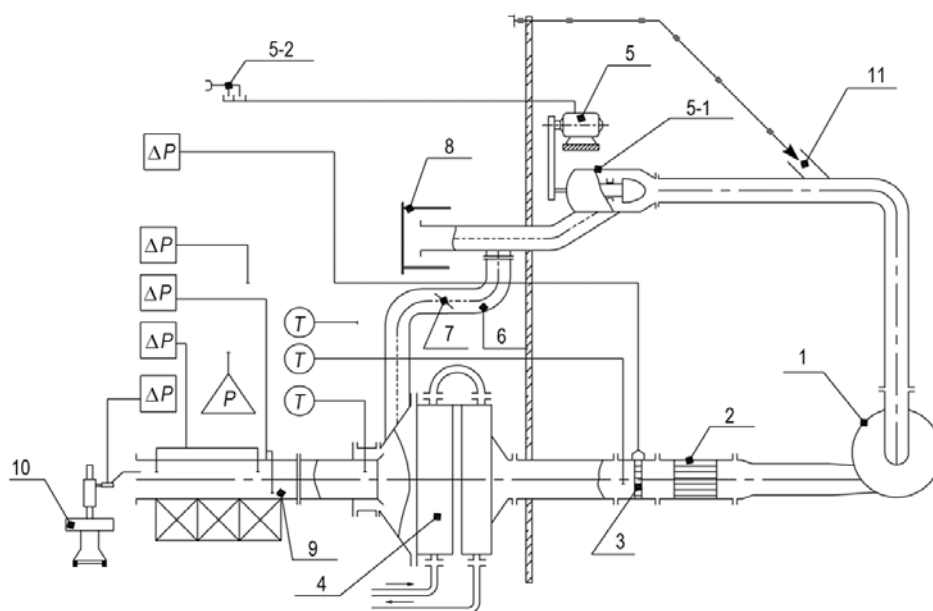


Рис. 3. Схема аэродинамического стенда: 1 – центробежный вентилятор ЦВ-18; 2 – хонейкомб; 3 – расходомерная шайба; 4 – воздухоохладители; 5 – электродвигатель дроссель-регулятора расхода воздуха; 6 – дроссель-регулятор расхода воздуха; 7 – заслонка байпасного воздуховода; 8 – байпасный воздуховод; 9 – рабочий участок; 10 – координатное устройство; 11 – реверсивный переключатель электродвигателя;  $P$  – давление;  $T$  – температура

В контуре воздушного стенда измерялись расход воздуха, температура потока воздуха, в стендовом зале – атмосферное давление и влажность воздуха.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ВТО

В изометрии схема конструкции модели ВТО представлена на рис. 4. Конструктивно проточная часть рабочего участка состояла из двух сборочных узлов – входного и выходного. Эти узлы были конструктивно одинаковыми. Каждый включал в себя пакет из девяти располагаемых по ходу потока воздуха оребренных труб.

Входной и выходной узлы моделировали проточную часть пакета оребренных трубок теплообменника. Пакет оребренных трубок каждого из этих узлов модели включал в себя 36 трубок штатной конструкции и 18 трубок половинного сечения. Последние являлись вытеснителями и располагались на больших боковых поверхностях обечайки

экспериментальной модели. Проточная часть пакета трубок была ограничена обечайкой в форме прямоугольного параллелепипеда с проточной частью 343×500 мм<sup>2</sup> и длиной 695 мм. Геометрическое расположение оребренных трубок являлось, как и в натурном изделии, коридорным с размерами прямоугольной решетки с размерами 69×64,5 мм<sup>2</sup>. Первый размер являлся поперечным к потоку воздуха, второй – по потоку. Размеры трубок и шаг оребрения показаны на рис. 4.

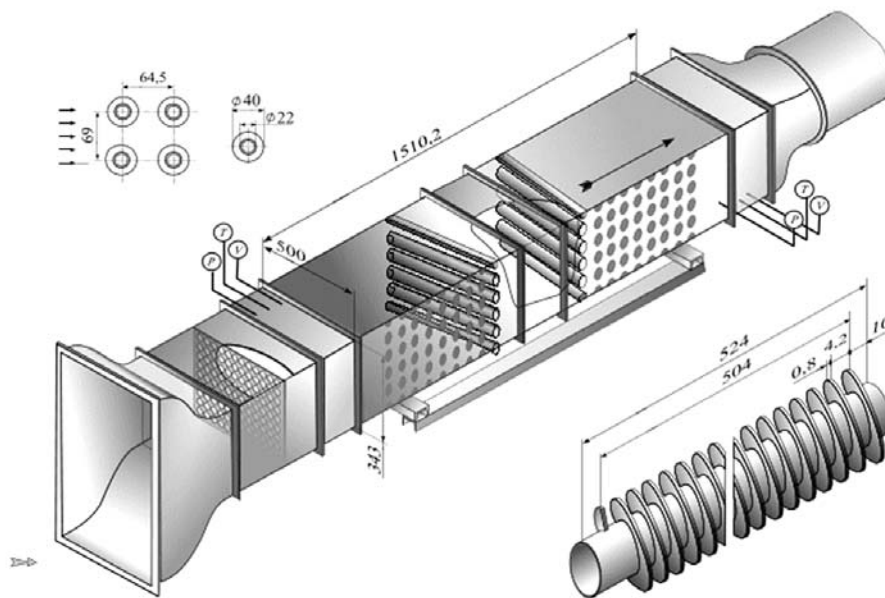


Рис. 4. Схема конструкции модели ВТО и вспомогательных узлов

К секциям с пакетами оребренных труб примыкали измерительные секции для размещения в них штуцеров отборов давления, сменных зондов статического давления или скорости потока воздуха. В ходе измерений регистрировались перепады давлений между отборами давлений на стенке измерительных секций, скоростной напор зонда скорости в центре расходомерной трубы, атмосферное давление, влажность воздуха в стендовом зале, температуры воздуха в потоке и стендовом зале. Все четыре отбора давления на стенках каждой измерительной секции были закольцованы.

Одномерное поле скоростей в потоке воздуха перед моделью ВТО обеспечивалось профилированным соплом и двумя последовательно расположенными сетками (на рис. 4 – решетка).

## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ИСПЫТАНИЙ

### Измерение расхода воздуха через экспериментальную модель ВТО

Расходомерная труба длиной 3000 мм устанавливалась последним элементом в контуре экспериментальной модели ВТО (рис. 4). Расход воздуха через проточную часть экспериментальной модели устанавливался путем интегрирования профилей скорости по четырем диаметрам расходомерной трубы с внутренним диаметром 320<sup>+0,5</sup> мм. По измеренным радиальным профилям скорости путем численного интегрирования рассчитывалось соотношение средней и максимальной скоростей потока воздуха в расходомерной трубе:

$$(W_{cp} / W_{max})_i = 2\pi \int_0^1 \frac{W}{W_{max}} \cdot \frac{r}{R} \cdot d\left(\frac{r}{R}\right). \quad (1)$$

Эта величина практически не изменялась в том малом диапазоне скоростей, в

котором проводились опыты по измерению гидравлических потерь в пакете оребренных труб экспериментальной модели ВТО. Среднеарифметическое значение из восьми величин  $(W_{cp}/W_{max})_i$  для радиальных профилей скорости являлось опытной характеристикой расходомера воздуха через экспериментальную модель:

$$(W_{cp} / W_{max})_q = \frac{1}{8} \cdot \sum_{i=1}^4 (W_{cp} / W_{max})_i . \quad (2)$$

В формулах (1), (2) приняты обозначения:  $W_{cp}$  – среднеинтегральная скорость на радиусе расходомерной трубы;  $W_{max}$  – скорость на оси расходомерной трубы;  $r$  – радиальная координата в поперечном сечении расходомерной трубы;  $R$  – внутренний радиус расходомерной трубы;  $(W_{cp}/W_{max})_q$  – опытная характеристика расходомера воздуха в проточной части модели.

Измерение расхода состояло в измерении скорости на оси расходомерной трубы, по которой определялись объемный и массовый расходы воздуха через проточную часть экспериментальной модели:

$$Q = W_{max} \cdot (W_{cp}/W_{max}) \cdot S_{тр} \text{ [м}^3/\text{с]}, \quad (3)$$

$$M = Q \cdot \rho_m \text{ [кг/с]}, \quad (4)$$

где  $Q, M$  – объемный и массовый расходы воздуха через модель;  $S_{тр}$  [м<sup>2</sup>] – площадь выходного сечения расходомерной трубы;  $\rho_m$  – плотность воздуха на середине длины пакета оребренных труб модели. Плотность воздуха рассчитывалась с учетом температуры, избыточного давления, влажности воздуха, атмосферного давления в стендовом зале.

Метод позволял получить погрешность измерения расхода через экспериментальную модель, не превышающую 2%, а коэффициента гидравлического сопротивления пакета труб – не выше 5%, что являлось приемлемым для лабораторных исследований.

#### **Измерение атмосферного давления и влажности воздуха**

Эти параметры потока воздуха в опытах являлись наиболее консервативными, поэтому их измерение является периодическим – два измерения/час.

Для измерения атмосферного давления в помещении стендового зала использовался барометр-анероид метеорологический БАММ-1. Паспортная основная погрешность составляла  $\pm 0,2\%$ , дополнительная – не превышала  $\pm 0,5\%$ . Перед измерениями показания прибора уточнялись по данным городской метеостанции.

Влажность воздуха в экспериментальной модели измерялась термогигрометром testo 605-H1. Паспортная погрешность прибора  $\pm 3\%$  общей влажности.

Список измеряемых показателей и применявшиеся для регистрации параметров воздуха в стендовом зале установки В-2 и в потоке воздуха через модель ВТО даны в табл. 1.

#### **Определение коэффициента гидравлического сопротивления трубного пучка**

Гидравлические потери на длине пакета оребренных труб исследовались в условиях изотермического напорного потока воздуха. В общем случае коэффициент гидравлического сопротивления пакета труб  $\zeta_n$  определялся по формуле

$$\zeta_n = 2(\Delta P_m - \Delta P_{расш} - \Delta P_{гл}) / (\rho_m \cdot W_{cp}^2) = \zeta_m - \zeta_{расш} - \zeta_{гл} , \quad (5)$$

где  $\Delta P_m$  [Па] – падение давления на длине между заданными сечениями в измерительных секциях модели ВТО;  $\Delta P_{расш}$  [Па] – падение давление из-за преодоления сил расширения воздуха по длине модели;  $P_{гл}$  [Па] – падение давления на двух полудлинах измерительных секций модели, т.к. сечения с отборами давлений располагались на середине длины одинаковых измерительных секций. Последнее значение рассчитывалось по формуле Блазиуса. Значения  $\Delta P_{расш}$  и  $\Delta P_{гл}$  для изотермического потока имели пре-

небрежимо малые величины.

Таблица 1

**Список измеряемых показателей и применявшихся преобразователей**

Измеряемая величина	Тип преобразователя	Погрешность
Расход воздуха, м <sup>3</sup> /с	D <sub>γ</sub> =0,32 м	2 %
Расход воздуха, м <sup>3</sup> /с	Контроллер testo 425	2,5 %
Избыточное давление перед трубным пучком, Па	Преобразователь Метран-150 CD0 (0-0,63 кПа)	Зависит от величины давления (≤ 1%)
Перепад давления по длине пакета оребренных труб, Па	Преобразователь Метран-150 CD0 (0-0,63 кПа)	Зависит от величины давления (≤ 1%)
Температура воздуха в стендовом зале, °С	Термопара	±0,5 °С
Температура воздуха в потоке воздуха в модели ВТО-10, °С	Термопара	±0,5 °С
Атмосферное давление, кПа	БАММ-1	±0,2 %
Влажность воздуха в потоке через модель ВТО-10	testo 605-H1	±3 % общей влажности

Каждое значение  $\zeta_n$  соответствовало своему числу Рейнольдса, рассчитанному по наружному диаметру неоребренной трубки  $d = 0,022$  м и минимальной скорости воздуха на середине длины трубного пакета (без учета объема трубок)  $W_{ср м}$

$$Re_m = W_{ср м} \cdot d / \nu_m, \quad (6)$$

где  $Re_m$  – число Рейнольдса для модели ВТО;  $\nu_m$  – кинематический коэффициент вязкости для модели ВТО.

**Результаты исследования гидравлических потерь в модели ВТО**

Результаты получены для изотермического течения воздуха через проточную часть экспериментальной модели ВТО в диапазоне чисел Рейнольдса 2500 – 8750. Опытная зависимость коэффициента гидравлического сопротивления пакета оребренных труб от числа Рейнольдса  $\zeta(Re)$  аппроксимирована линейной зависимостью

$$\zeta_n = 13,29 - 2,018 \cdot 10^{-4} \cdot Re. \quad (7)$$

Достоверность формулы обеспечена опытами в диапазоне  $Re$  от 2500 до 8750 с оцененной погрешностью  $\pm 5\%$ . График  $\zeta_n(Re)$  показан на рис. 5.

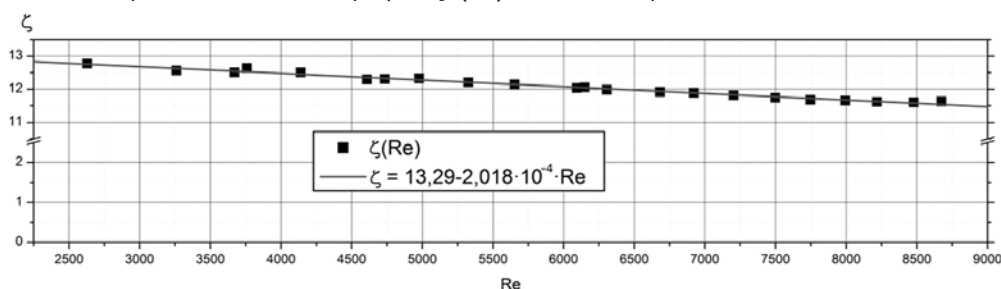


Рис. 5 Коэффициент гидравлического сопротивления трубного пучка в зависимости от числа Рейнольдса.

**СРАВНЕНИЕ ОПЫТНЫХ И ПРОЕКТНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ДЛЯ ВТО САОТ**

Опытные результаты настоящей работы были использованы для расчета гидравлических потерь по длине пакета оребренных труб двух теплообменников разной мощности (10 и 13 МВт) и сопоставления с проектными данными ОАО «ОКБМ Африкантов» (Н. Новгород). Исходные проектные данные даны в таблице 2.

Таблица 2

**Исходные проектные данные для двух ВТО САОТ**

	ВТО (10 МВт)	ВТО (13 МВт)
Массовая скорость охлаждающего воздуха, кг/с	38	47,5
Температура воздуха на входе/выходе из пакета оребренных труб	$t_{\text{вых}}/t_{\text{вх}} = 40 / 300 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{вых}}/T_{\text{вх}} = 313 / 573 \text{ K}$	$t_{\text{вых}}/t_{\text{вх}} = 39/307 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{вых}}/T_{\text{вх}} = 312/580 \text{ K}$
Определяющий линейный размер пакета оребренных труб, м	$d = 0,022$	$D = 0,022$
Средняя температура воздуха по длине пакета оребренных труб	$t_{\text{cp}} = 170 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{cp}} = 443 \text{ K}$	$t_{\text{cp}} = 173 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{cp}} = 446 \text{ K}$
Скорость охлаждающего воздуха при $t_{\text{cp}}$ , м/с	$W_{\text{cp в-170}} = 6$	$W_{\text{cp в-173}} = 5,3$
Число Рейнольдса при $t_{\text{cp}}$	$Re_{\text{в-170}} = 4210$	$Re_{\text{в-173}} = 3720$

Таблица 3

**Сравнение опытных и проектных гидравлических потерь по длине пакетов оребренных труб ВТО САОТ**

	ВТО (10 МВт)	ВТО (13 МВт)
Коэффициент гидравлического сопротивления пакета оребренных труб при $t_{\text{cp}}$ (изотермический поток воздуха)	$\zeta_{\text{в-170}} = 12,44$	$\zeta_{\text{в-173}} = 12,54$
Перепад давления по длине пакета оребренных труб при $t_{\text{cp}}$ , Па	$\Delta P_{W-170} = 176,6$	$\Delta P_{W-173} = 140,3$
Коэффициент гидравлического сопротивления при расширении потока воздуха по длине пакета оребренных труб	$\zeta_t = (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}})/T_{\text{cp}} = 1,17$	$\zeta_t = (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}})/T_{\text{cp}} = 1,2$
Перепад давления по длине пакета оребренных труб при расширении воздуха, Па	$\Delta P_t = 16,7$	$\Delta P_t = 13,7$
Падение давления по длине пакета оребренных труб ВТО, Па	$\Delta P_H = 193 \pm 10$	$P_H = 154 \pm 8$
Проектные расчеты, Па	$\Delta P_H = 230$	$\Delta P_H = 190$
Сравнение результатов расчетов и опытов	$\delta_{\text{р/экс}} = 230/193 = 1,19$	$\delta_{\text{р/экс}} = 190/154 = 1,23$
Превышение расчетных результатов над опытными, %	19	23

Числа Рейнольдса для потока охлаждающего воздуха в натуральных теплообменниках находятся в исследованном диапазоне чисел Рейнольдса, в котором действует зависимость (7).

Определяющей температурой воздуха для натурального изделия являлось среднее значение  $T_{\text{cp}}$  между входной  $T_{\text{вх}}$  и выходной  $T_{\text{вых}}$  температурами воздуха. Учет работы расшире-



ния воздуха при неизотермическом потоке воздуха проводился по известной формуле

$$\zeta_t = (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}) / T_{\text{ср}} \quad (8)$$

Сравнение значений гидравлических потерь по длине пакетов оребренных труб ВТО САОТ, полученных с использованием опытных результатов и проектных, показало, что они различаются примерно на 20 %. Поскольку большие значения получены при проектных расчетах, то это приводит к некоторому запасу по теплопередающим поверхностям ВТО САОТ и, следовательно, по его тепловой мощности.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Гидравлическое сопротивление по длине воздушного тракта пакетов оребренных труб ВТО САОТ реакторов типа БН, полученное с использованием опытных результатов, примерно на 20% меньше соответствующего проектного значения. Это обеспечивает примерно 10%-ый запас по увеличению скорости охлаждающего воздуха в воздушном теплообменнике.

### **Литература**

1. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. – М.: Наука, 1982. – 472 с.
2. Субботин В.И., Ушаков П.А., Левченко Ю.Д. и др. Исследование осредненных гидродинамических характеристик турбулентного потока в прямоугольном канале. Препринт ФЭИ-455. Физико-энергетический институт. 1973. – 43 с.
3. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.
4. Кей Д., Лэби Т. Справочник физика-экспериментатора. – М.: Изд. ИЛ. 1949. – 180 с.
5. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.

Поступила в редакцию 09.12.2013 г.

### **Авторы**

Коломиец Дмитрий Олегович, инженер-исследователь Института ядерных реакторов и теплофизики (ИЯРиТ), ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ».

E-mail: dkolomiets@ippe.ru

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

E-mail: levchenko@ippe.ru

Сорокин Александр Павлович, заместитель директора ИЯРиТ, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», доктор техн. наук.

E-mail: sorokin@ippe.ru

## EXPERIMENTAL STUDY ON HYDRAULIC RESISTANCE OF FINNED TUBE ASSEMBLY OF THE AIR HEAT EXCHANGERS IN FAST REACTORS

Kolomiyets D.O., Levchenko Yu.D., Sorokin A.P.

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

### ABSTRACT

The emergency heat removal systems (EHRS) of fast reactors include independent air heat exchangers (AHE), where heat is transferred to air. The heat transfer tubes with the outside one-thread spiral fins are arranged in the in-line order. The tube pitch is 69,0 mm across the flow and 64,5 mm parallel to it. Across the cooling air flow there are 9 tube modules in the tube assembly, that is 18 finned tubes are cooled by the air flow. The finned tubes are inclined to the cross-section of the heat exchanger at an angle of  $\pm 1,5^\circ$ . The air flow in the full-size system (air heat exchanger – suction pipe) is produced by means of natural convection pressure.

The full-size finned tube assembly was simulated roughly. The length of each tube was 500 mm. A cross row had 5 tubes: 4 standard ones and one tube cut lengthways with a 2-mm-thick mill. The last tube with half cross-section served as a displacer and was fixed to the shell with rectangular cross-section. The cross-section of the air flow channel of the model before the tube assembly measured  $500 \times 343 \text{ mm}^2$ . Lengthwise, the tube assembly had 18 rows. Both before and after the tube assembly there were test sections with 4 pressure taps in each. Before the first test section there was an inlet section with meshes. At the entrance to the working section there was a convergent nozzle. After the outlet test section there was a section where rectangular cross-section of the flow channel changed into circular cross-section. Lengthwise, the last element of the working section was a tube having an inner diameter of  $320^{+(0,4,5)}$  mm. The tube was 3000 mm long and was calibrated as a flowmeter.

Pressure drops along the tube assembly and total pressure head in the center of the flowmeter tube were measured using METRAN-100 and METRAN-150. In a series of experiments measurements were also taken of the air temperature for the flow and the testing stand hall, of atmospheric pressure, of air humidity.

Experimental results were processed and presented as a function of Re. The obtained linear dependence is true in the range of Reynolds numbers 2600 – 8700. The average air velocity at the midpoint of the tube assembly length was used as the velocity scale and the outside diameter of the tube without fins ( $d = 0,022 \text{ m}$ ) was used as the linear scale. Results presented in the figure were used to form experimental data array for design code verification. The evaluated result uncertainty was within 5%.

**Key words:** fast reactor, air heat exchanger (AHX), emergency heat removal system (EHRS), cross flow, aerodynamic facility V-2, finned tube assembly, measuring complex, experimental study, hydraulic resistance, spiral finned tubes.

### REFERENCES

1. Zhukauskas A.A. *Konvektivnyj perenos v teploobmennikah* [Convective transfer in heat exchangers]. Moscow, Nauka Publ. 1982. 472 p.
2. Subbotin V.I., Ushakov P.A., Levchenko Yu.D. e.a. *Issledovanie osrednennykh gidrodinamicheskikh harakteristik turbulentsnogo potoka v pryamougol'nom kanale* [Study of the averaged hydrodynamic characteristics of turbulent flow in a

rectangular channel]. Preprint SSC RF-IPPE-455. SSC RF-IPPE. 1973. 43 p. (in Russian)

3. Idel'chik I.E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Handbook of of hydraulic resistances]. Moscow, Mashinostroenie Publ. 1975, 559 p.

4. Kej D., Lebi T. *Spravochnik fizika-eksperimentatora* [Handbook for an experimental physicist]. Moscow, Inostrannaya Literatura Publ. 1949, 180 p.

5. Kirillov P.L., Yur'ev Yu.S., Bobkov V.P. *Spravochnik po teplogidravlicheskim raschetam (yadernye reaktory, teploobmenniki, parogeneratory)* [Handbook of thermohydraulic calculations (nuclear reactors, heat exchangers, steam generators)]. Moscow, Energoatomizdat Publ. 1990, 360 p.

### Authors

Kolomiets Dmitrij Olegovich, Research Engineer, Institute for Nuclear reactors and Thermal Physics (INR&T), FSUE «SSC RF-IPPE».

E-mail: [dkolomiets@ippe.ru](mailto:dkolomiets@ippe.ru)

Sorokin Aleksandr Pavlovich, Deputy Director, INR&T, FSUE «SSC RF-IPPE», Dr. Sci. (Engineering).

E-mail: [sorokin@ippe.ru](mailto:sorokin@ippe.ru)

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

E-mail: [levchenko@ippe.ru](mailto:levchenko@ippe.ru)