

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ  
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.565.9:536.24

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ВОЗДУШНОГО  
ТЕПЛООБМЕННИКА АВАРИЙНОГО РАСХОЛАЖИВАНИЯ**

© 2017 А.М. Беседин<sup>\*</sup>, А.Ю. Смолин<sup>\*</sup>, А.С. Шамароков<sup>\*\*</sup>, С.Б. Кравец<sup>\*\*\*</sup>,  
А.С. Мирзалиев<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

<sup>\*\*</sup> АО «Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт атомного энергетического машиностроения (ВНИИАМ)», Москва, Россия

<sup>\*\*\*</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций ОАО «ВНИИАЭС», Москва, Россия

На полномасштабной модели выполнено исследование аэродинамики, теплообмена, вибрации и напряжений теплообменного аппарата, поверхность нагрева которого набрана из эвольвентных ширм. Оценена вибропрочность трубчатки и шибера аппарата. Определено влияние вытеснителей и их геометрии на интенсивность теплообмена.

Даны рекомендации по выравниванию распределения потока воздуха, повышению надежности шибера и трубчатки.

*Ключевые слова:* теплообменный аппарат, поверхность нагрева, эвольвентные ширмы, аэродинамическое сопротивление, теплоотдача, вибрация, тензометрирование, поля скоростей и температур, надежность, АЭС.

Поступила в редакцию: 15.03.2017

**КОНСТРУКЦИЯ НАТУРНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА**

С целью повышения безопасности при эксплуатации энергоблоков с реакторами на быстрых нейтронах (БН-600 и БН-800) была разработана система аварийного расхолаживания реактора (САРХ), состоящая из трех автономных каналов. САРХ предназначена для отвода тепла от реактора при аварийных ситуациях (прекращение отвода тепла к третьему контуру). В состав каждого канала САРХ входят воздушный теплообменник (ВТО) с воздушными шиберами, два электромагнитных насоса, трубопроводы обвязки и система электрообогрева.

В качестве ВТО для САРХ энергоблоков с реактором БН-800 планировалось применять теплообменник, разработанный во ВНИИАМ [1]. Конструктивно он выполнен как вертикальный кожухотрубный аппарат с противоточным движением натрия (сверху вниз) и воздуха (Рисунок 1).

Внутренний диаметр корпуса 1 равен 4,1 м, а высота (по обечайке) – 8,5 м. В корпусе по продольной оси располагается коллектор 2 с наружным диаметром 0,83 м и высотой около 3,6 м. В коллекторе имеются 2640 отверстий диаметром 16,25 мм для запрессовки концов трубок.

Трубчатка состоит из 132 ширм 3, изогнутых по эвольвенте. Начало эвольвенты на диаметре 1,7 м, конец – 4,05 м. Шаг между ширмами по эвольвенте – 40 мм. Ширма набрана из 10 трубок (Ø16 x 1,4мм) с шагом 36 мм на горизонтальных участках и 25 мм – на вертикальных. Вид эвольвентных ширм в плане схематично показан на рисунке 2. Число рядов трубок по ходу воздуха с учетом шахматного расположения – 80. Длина поперечно омываемых участков трубок равна 8,85 м, что составляет 86,2 % всей

поверхности теплообмена, а продольно омываемых – 1,422 м (13,8 %). Часть трубочки вытеснена под коробчатый вытеснитель, предназначенный для удобства ее сборки. Вытеснитель располагается в канале шириной 94 мм. На входе и выходе аппарата располагаются шиберы 4.

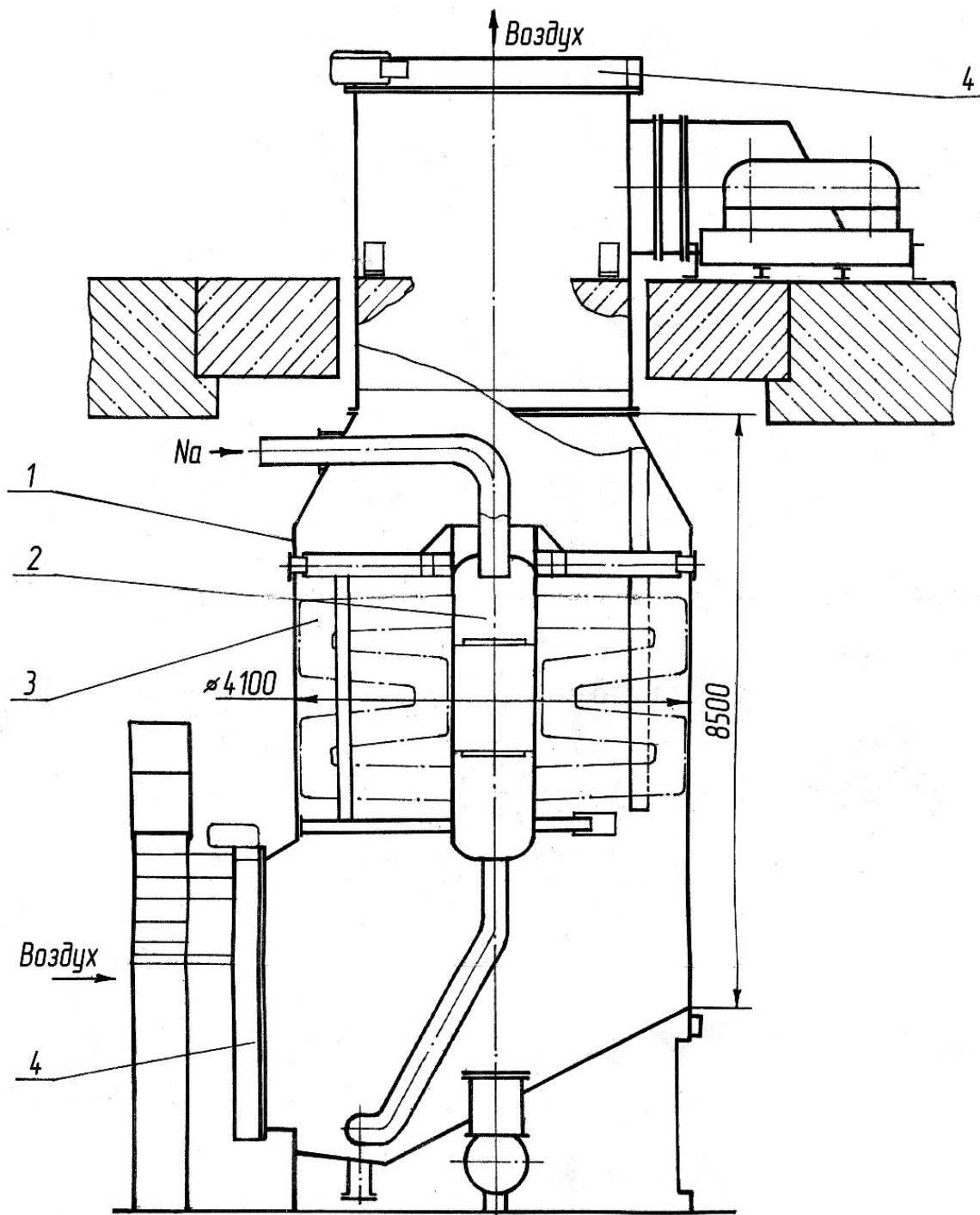


Рис. 1. – Воздушный теплообменник:  
1–корпус; 2–коллектор; 3–ширма; 4–шибер.

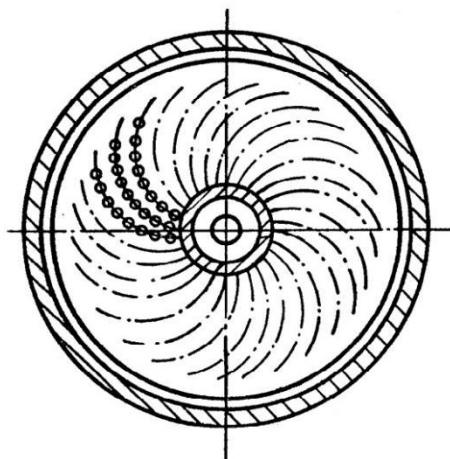


Рис. 2. – Схема эвольвентных ширм

Параметры режима работы теплообменника по воздушному тракту: циркуляция естественная; температура на входе –  $30^{\circ}\text{C}$ ; температура на выходе –  $300^{\circ}\text{C}$ ; расход воздуха –  $94,8 \text{ кг/с}$ ; средняя скорость при поперечном омывании трубочки –  $5,8 \text{ м/с}$ ; число Рейнольдса –  $3028$ .

Параметры режима работы теплообменника по тракту натрия: давление на входе –  $0,6 \text{ МПа}$ ; температура на входе –  $500^{\circ}\text{C}$ ; температура на выходе –  $300^{\circ}\text{C}$ .

### КОНСТРУКЦИЯ НАТУРНОГО ШИБЕРА

Шибер является запорным органом, состоящим из шести вращающихся створок, поворачивающихся на угол  $90^{\circ}$  (рисунок 3). Он предназначен для управления расходом воздуха путем перекрытия воздуховода.

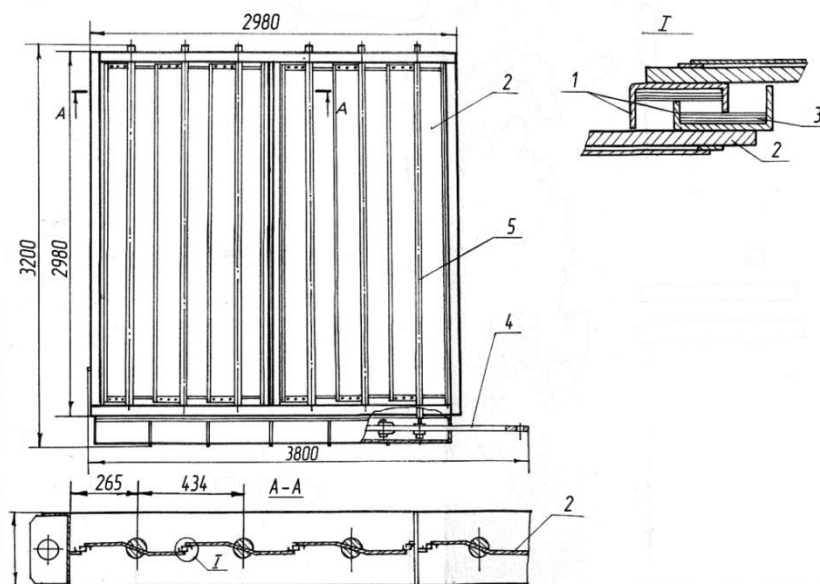


Рис. 3. – Натурный шибер:

1 – желобок; 2 – лопатка; 3 – полоска уплотняющая; 4 – рычаг; 5 – ось.

Уплотняющими элементами служат встречные желобки 1, которые приварены к лопаткам (створкам) 2. Для повышения плотности шибера в желобках располагаются полоски 3 из тонколистовой стали 08X18H10T. Вращение лопаток производится с помощью рычага 4, соединенного шарнирно с осями 5.

### КОНСТРУКЦИЯ МОДЕЛИ ТЕПЛООБМЕННИКА

Модель теплообменника была разработана в соответствии с рекомендациями, представленными в книге [2]. Она состоит из пяти эвольвентных ширм натуральных размеров со штатными устройствами дистанционирования и крепления. Трубки запрессованы в трубные доски по штатной технологии. Ширмы размещены в коробе, состоящем из двух эвольвентных боковых стенок, внутренней стенки с радиусомгиба равным радиусу коллектора теплоносителя (натрия) и периферийной стенки с радиусомгиба равным радиусу обечайки корпуса. На периферии ширм были установлены штатные вытеснители, предназначенные для улучшения условий теплообмена. Ширмы прижимались друг к другу боковыми стенками. Между вытеснителями и корпусом (периферийной стенкой) предусмотрен зазор, который может выбираться с помощью стального листа, устанавливаемого по всей высоте ширм. На входе трубочки установлена решетка для выравнивания расхода воздуха по сечению модели в соответствии с образцом (натурным теплообменником).

Модель выполнена разъемной для ревизии и ремонта средств контроля и измерения.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Схема установки представлена на рисунке 3. В качестве теплоносителя использовался насыщенный пар с давлением 0,7 МПа.

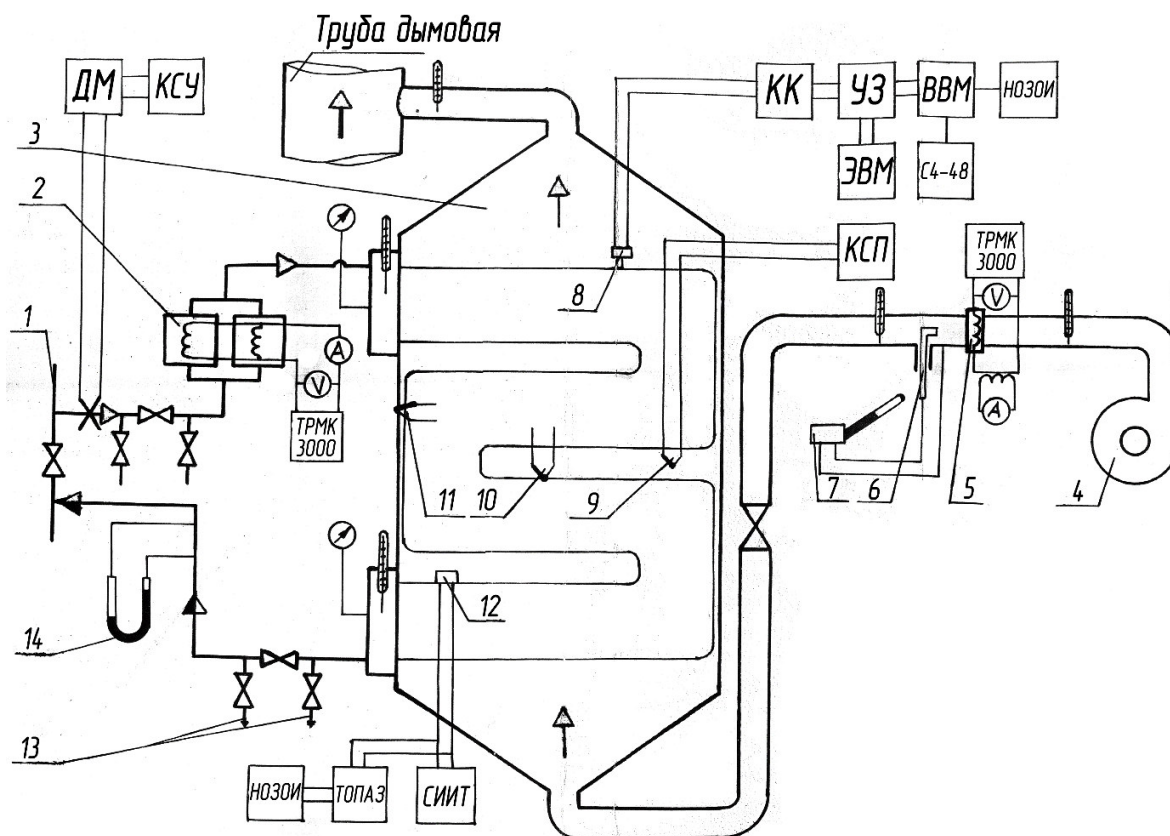


Рис. 3. – Схема установки:

1 – паропровод; 2 – пароперегреватель; 3 – модель теплообменника; 4 – вентилятор; 5 – калориметр; 6 – аэродинамический зонд; 7 – микроманометр; 8 – вибродатчик; 9, 10, 11 – термопары; 12 – тензодатчик; 13 – трубопровод конденсата; 14 – дифманометр

Пар отбирался из паропровода I и направлялся в пароперегреватель 2, после которого – во входной коллектор модели 3. После модели пар сбрасывался в паропровод за запорной задвижкой, а затем в паросепарационное устройство. Расход пара измерялся с помощью дифманометра.

Параметры пара измерялись в коллекторах на входе и выходе ширм. Давление - образцовыми манометрами со шкалой 0 – 0,1 МПа, а температура – ртутными термометрами с ценой деления шкалы 0,1° С.

Воздух прокачивался с помощью вентилятора 4 типа ВД–II. К модели он подводился по воздуховоду квадратного сечения, со стороной 0,5 м. После модели воздух сбрасывался в дымовую трубу.

Расход воздуха измерялся различными способами [3] в зависимости от величины расхода. При малых значениях – калориметром 5 и термоанемометром ТАИК-3, а при больших – трех- и пятиканальными зондами 6, протарированными в аэродинамической трубе.

Параметры вибрации измерялись с помощью вибродатчиков 8, закрепленных на ширмах и подключенных к вторичным приборам.

Температура воздуха в межтрубном пространстве измерялась термопарами типа КТМС диаметром 3 мм, закрепленными к стенкам модели. Спаи термопар были выведены в зону средней ширмы. Температура металла трубок измерялась поверхностными термопарами 10. В стенке, соединяющей входную и выходную камеры теплоносителя, были заделаны термопары II для контроля ее температуры с целью оценки влияния разности температур коллектора и дистанционирующих планок на напряжение в месте заделки трубок. Термопары были подключены к самопишущим потенциометрам типа КСП.

Механические напряжения в элементах трубчатки определялись с помощью тензодатчиков 12, подключенных к тензометрической станции типа СИИТ.

## АЭРОДИНАМИКА МОДЕЛИ

Поле скоростей воздуха в межтрубном пространстве модели определялось в пяти точках по глубине трубного пучка.

Аэродинамическое сопротивление трубного пучка определялось с помощью U-образного дифманометра, подключенного к входному и выходному воздуховодам.

Расход воздуха устанавливался по полям скоростей, определяемым зондом по двум взаимно перпендикулярным направлениям по 22 точкам [3].

Предварительно, с целью проверки, было получено практически полное совпадение значений расхода, найденных с помощью зонда и термоанемометра (расхождение не превышало 5 %). Прямолинейность потока на контрольном участке была подтверждена с помощью пятиканального шарового зонда.

Коэффициент сопротивления шибера определялся при пониженных числах Рейнольдса с использованием второй автомодельной области при соблюдении условия:  $Re$  модели больше его граничного значения [2, 4].

## ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ

Экспериментальное исследование вибрации заключалось в измерении величин виброускорения и спектральных характеристик вибросигнала на различных участках ширмы и на коллекторах, а также регистрации свободных колебаний ширмы.

В качестве первичных преобразователей использовалось 9 пьезоакселерометров 2ПА-22, обеспечивающих измерение вибрации в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

### ТЕНЗОМЕТРИРОВАНИЕ

Тензометрирование проводилось с целью измерения деформации и напряжений, возникающих в трубках вблизи заделки в коллектор, на подвесках трубного пучка, а также на ближайшей к коллектору дистанционирующей планке. Для измерения использовались тензорезисторы типа КФ5-П1 и НМТ-450с основой из фольги [5, 6]. Измерения проводились в динамическом и статическом режимах.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ШИБЕРА

Зависимости коэффициента сопротивления шибера (отнесенного к скорости в трубопроводе перед шибером)  $x$  от угла поворота створок для исследованных вариантов регулирования приведены в таблицах 1 – 3, где указана и погрешность среднего значения  $\xi$ , рассчитанная по [7] и обусловленная главным образом ошибкой установки створок шибера на заданный угол.

**Таблица 1.** – Коэффициент сопротивления  $\xi$  для шести створок

$\alpha$ , град.	$\xi$	Погрешность, %
5	330	12
10	149	12
20	43	23
30	18,5	17
40	7,5	18
50	3,4	20
60	1,8	26
70	0,88	29
80	0,42	33
90	0,35	50

**Таблица 2.** – Коэффициент сопротивления  $\xi$  для трех створок рядом

$\alpha$ , град.	$\xi$	Погрешность, %
5	855	10
20	172	9
30	82	8
60	12	15
70	7.7	10
90	5.6	32

**Таблица 3.** – Коэффициент сопротивления  $\xi$  для одной створки

$\alpha$ , град.	$\xi$	Погрешность, %
5	2155	6
10	1129	17
20	598	10
30	372	12
40	268	29
50	209	21
60	174	22
70	154	22
80	154	11
90	161	17

Из представленных данных следует, что шибер имеет наибольшее сопротивление при регулировании одной створкой и наименьшее – шестью. Коэффициент очень сильно зависит от угла  $\alpha$  в диапазоне его значений  $0 - 40^\circ$  и слабо – при  $60 - 90^\circ$ .

Зависимость весового расхода воздуха, обусловленного холостыми протечками, от напора перед шибером для образца приведена в таблице 4.

**Таблица 4.** – Расход холостых протечек  $G_{x,пр}$ .

Напор $h$ , мм вод.ст.	Расход $G_{x,пр}$ , кг/с
665	1,76
659	1,96
546	1,83
511	1,74
476	1,52
409	1,57
327	1,23
130	1,16

Из представленных данных следует, что холостые протечки воздуха линейно зависят от его напора перед шибером. Следует отметить, что расход холостых протечек на натурном шибере будет меньше значений приведенных в таблице 4, так как при температуре воздуха равной  $300 - 500^\circ\text{C}$  в зависимости от режима работы ВТО, его вязкость в  $3 - 5$  раз больше, чем на модели при температуре  $20 - 40^\circ\text{C}$ .

#### НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ ТРУБЧАТКИ

Тензометрирование выполнялось при "холодных" продувках (температура воздуха  $25-30^\circ\text{C}$ ) и при "горячих" продувках (в трубках протекал пар со средней температурой  $120^\circ\text{C}$ ).

Проведенные исследования показали, что динамические деформации, возникающие в элементах конструкции вследствие их вибрации малы.

Напряжения в трубках в области заделки в коллектор при "холодных" продувках изменялись в диапазоне  $6-15$  МПа.

Максимальные напряжения при горячих продувках были равны  $66-92$  МПа.

Приведенные данные свидетельствуют, что температурные напряжения в трубках значительно превышают напряжения, возникающие под действием потока воздуха.

Напряжения в подвесках ширм при "холодных" продувках не превышали 3,5 МПа, а при "горячих" продувках они увеличились в среднем в 3-8 раз и достигли максимального значения равного 26 МПа.

В ближайшей к коллектору дистанционирующей планке при "холодных" продувках действовали растягивающие напряжения, достигающие 6 МПа. При "горячих" продувках максимальные напряжения увеличились до 9,5 МПа.

Влияние способа разделки отверстия в трубной доске (коллекторе) на деформации, возникающие в трубке, изучалось для двух случаев: отверстие без обработки кромки и отверстие со скруглением кромки. Деформации измерялись на разных расстояниях от трубной доски при статическом изгибе трубки. Расхождение значений относительной деформации для двух рассмотренных случаев не превышало 13 %, что свидетельствует о малом влиянии способа разделки кромки на деформацию трубки при статическом изгибе.

### ТЕПЛОТДАЧА ПО ВОЗДУШНОЙ СТОРОНЕ

Результаты определения коэффициента теплоотдачи представлены в таблице 5.

**Таблица 5.** – Результаты исследования теплоотдачи

Условия работы	Средняя скорость $W$ , м/с	$\alpha_B^{cp}$ , $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	$\alpha_B^p$ , $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	Расхождение $\gamma$ , %
Периферийный зазор Штатные вытеснители	7,92	93,08	115,01	-19,1
	5,65	74,72	96,83	-22,8
Без периферийного зазора Штатные вытеснители	7,52	95,74	115,01	-16,8
	5,7	79,38	97,36	-18,5

В таблице 5:

$\alpha_B^{cp}$  – средний по проходному сечению коэффициент теплоотдачи от трубочки к воздуху, определенный экспериментально;

$\alpha_B^p$  – то же, рассчитанный по методике [8, 9].

Из таблицы следует, что наибольшее расхождение  $\gamma$  соответствует наличию периферийного зазора, что приводит к байпасированию части воздушного потока.

Коэффициент теплоотдачи увеличивается с ростом средней скорости воздуха в обоих вариантах.

### ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ресурс работы трубного пучка из эвольвентных ширм, рассчитанный по методике в [10], равен 40 лет с учетом экспериментально определенных вибропараметров.

Аэродинамические исследования показали, что шибер имеет наибольшее сопротивление при регулировании одной створкой и наименьшее – шестью, причем коэффициент сопротивления очень сильно зависит от угла установки створок в



диапазоне его значений  $0 - 40^\circ$ . Холостые протечки воздуха линейно зависят от его напора перед шибером.

Характеристика шибера  $\xi = f(\alpha)$  может заметно измениться при неточном изготовлении и монтаже, а также из-за деформации и коробления створок при температуре воздуха  $500 - 550^\circ\text{C}$ , что является серьезным недостатком конструкции.

Расхождение между расчетным коэффициентом теплоотдачи и полученным экспериментально не превысило 18,5 %. При наличии периферийного зазора значение расхождения достигало 23 %, что объясняется погрешностью определения скорости воздуха в пучке из-за байпасирования.

При работе ширм без упора в корпус при скорости воздуха 4,3 м/с виброперемещения не превышают значения  $2 \cdot 10^{-5}$  м, а при упоре ширм в корпус виброперемещения при скорости 5,5 м/с не превышают значения  $10^{-6}$  м. Таким образом, вибростойкость конструкции обеспечена, как при разогреве, так и в рабочем режиме.

Тензометрирование трубчатки показало, что возникающие вследствие вибрации элементов конструкции динамические напряжения малы ( $\sigma_{\max} = 1,5$  МПа), что свидетельствует о высокой вибропрочности трубного пучка.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зорин, В.А. Атомные электростанции [Текст] / В.А. Зорин. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 672 с.
2. Мигай, В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования [Текст] / В.К. Мигай. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 264 с.
3. Блинов, О.М. и др. Теплотехнические измерения и приборы [Текст] / О.М. Блинов, А.М. Беленький, В.Ф. Бердышев. – Л.: Metallurgia, 1993. – 288 с.
4. Петухов, Б.С. и др. Теплообмен в ядерных энергетических установках [Текст] / Б.С. Петухов, Л.Г. Генин, С.А. Ковалев, С.Л. Соловьев. М.: Изд.-во МЭИ, 2003. – 548 с.
5. Дайчак, М.Л. и др. Методы и средства натурной тензометрии [Текст] / М.Л. Дайчак, М.И. Пригоровский, Г.Х. Хуршудов. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
6. Кобаяси, А. Экспериментальная механика [Текст] / А. Кобаяси. – М.: Мир, 1990. – 616 с.
7. Новицкий, П.В. и др. Оценка погрешностей результатов измерений [Текст] / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
8. Кириллов, П.Л. и др. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) [Текст] / П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев, В.П. Бобков. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 384 с.
9. РТМ 108.031.05 – 84. Оборудование теплообменное АЭС. Расчет тепловой и гидравлический [Текст]. – Л.: НПО ЦКТИ, 1986. – 96 с.
10. РТМ 108.302.03-86. Парогенераторы АЭС. Расчет вибрации теплообменных труб [Текст] // Л.: НПО ЦКТИ, 1987. – 74 с.

#### REFERENCES

- [1] Zorin V.A. Atomnye elektrostancii [Nuclear power plants]. M. Pub. Izdatelskij dom MEI [MPEI Publishing house], 2012, ISBN 978-5-383-00604-7, 672 p. (in Russian)
- [2] Migaj V.K. Modelirovanie teploobmennogo energeticheskogo oborudovaniya [Modeling of heat-exchange power equipment]. Leningrad. Pub. Energoatomizdat [Energoatomizdat], 1987, 264 p. (in Russian)
- [3] Blinov O.M., Belenkij A.M., Berdyshev V.F. Teplotexnicheskie izmereniya i pribory [Thermotechnical measurements and instruments]. Leningrad. Pub. Metallurgia [Metallurgy], 1993, ISBN 5-229-00836-9, 288 p. (in Russian)
- [4] Petuxov B.S., Genin L.G., Kovalev S.A., Solovjev S.L. Teploobmen v yadernyh energeticheskikh ustanovkah [Heat transfer in nuclear power plants]. M. Pub. Izdatelstvo MEI [MPEI Publishing house], 2003, ISBN 5-7046-0843-4, 548 p. (in Russian)
- [5] Dajchak M.L. Prigorovskij M.I., Hurshudov G.X. Metody i sredstva naturnoj tenzometrii [Methods and means of full strainometry]. M. Pub. Mashinostroenie [Mechanical engineering], 1989, 240 p. (in Russian)
- [6] Kobayasi A. Eksperimentalnaya mehanika [Experimental Mechanics]. M. Pub. Mir [Mir], 1990, ISBN 5-03-001543-4, 616 p. (in Russian)

- [7] Novickij P.V., Zograf I.A. Ocenka pogreshnostej rezultatov izmerenij [Estimation of errors in measurement results]. Leningrad. Pub. Energoatomizdat [Energoatomizdat], 1991, ISBN 5-283-04513-7, 304 p. (in Russian)
- [8] Kirillov P.L., Yuryev Yu.S., Bobkov V.P. Spravochnik po teplogidravlicheskim raschetam (yadernye reaktory, teploobmenniki, parogeneratory) [Handbook of thermohydraulic calculations (nuclear reactors, heat exchangers, steam generators)]. M. Pub. Energoatomizdat [Energoatomizdat], 1984, 384 p. (in Russian)
- [9] RTM 108.031.05–84. Oborudovanie teploobmennoe AES. Raschet teplovoj i gidravlicheskij [RTM 108.031.05 - 84. Heat exchanging equipment for nuclear power plants. Thermal and hydraulic calculation]. Leningrad. Pub. NPO CKTI [NPO CKTI], 1986, 96 p. (in Russian)
- [10] RTM 108.302.03-86. Parogeneratory AES. Raschet vibracii teploobmennyx trub [RTM 108.302.03-86. Steam generators of nuclear power plants. Calculation of vibration of heat exchange tubes]. Leningrad. Pub. NPO CKTI [NPO CKTI], 1987, 74 p. (in Russian)

### Operating Condition Research of Air Heat Exchanger of Emergency Cooling

A.M. Besedin\*<sup>1</sup>, A.Yu. Smolin\*<sup>2</sup>, A.S. Shamarokov\*\*<sup>3</sup>, S.B. Kravets\*\*\*<sup>4</sup>,  
A.S. Mirzaliev\*<sup>5</sup>

\* *Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University “MEPhI”,  
Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

*e-mail: VITIkafAE@mephi.ru*

<sup>1</sup> *ORCID iD: 0000-0002-0348-8844*

*WoS ResearcherID: F-6138-2017;*

<sup>2</sup> *ORCID iD: 0000-0002-0148-2086*

*WoS ResearcherID: F-4089-2017;*

<sup>5</sup> *ORCID iD: 0000-0003-1704-431X*

*WoS ResearcherID: F-7464-2017*

\*\* *Russian Research and Development Institute for Nuclear Power Production Sector Engineering,  
Kosmonavta Volkova St., 6A, Moscow, Russia 125171*

*e-mail: mail@vniiam.ru*

<sup>3</sup> *ORCID iD: 0000-0003-3013-8062*

*Researcher ID: G-1504-2017*

\*\*\* *All-Russian Scientific and Research Institute for Nuclear Power Plant Operation,  
Pherganskaya St., 25. Moscow, Russia 109507*

*e-mail: vniiAES@vniiAES.ru*

<sup>4</sup> *ORCID iD: 0000-0001-8297-3102*

*ResearcherID: F-7817-2017*

**Abstract** – The research of aerodynamics, heat exchange, vibration and tension of the heatexchange device which surface of heating being gathering from evolvent screens is made on full-scale model. The vibration resistance of the tube and the gate of the apparatus is estimated. The influence of propellants and their geometry on the intensity of heat exchange is determined. Recommendations are given for equalizing the distribution of the air flow, accessibility of the slide and tubing.

**Keywords:** heat exchanger, heating surface, evolvent shields, aerodynamic resistance, heat transfer, vibration, strain gauge, velocity and temperature fields, reliability, NPP.