

# ОЦЕНКА ТЕПЛООБМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОХЛАЖДАЮЩИХ ТРУБОК С ВНЕШНИМ ОРЕБРЕНИЕМ ДЛЯ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ УСТАНОВОК ГЕРМЕТИЧНОГО ОГРАЖДЕНИЯ ПРОЕКТА АЭС-2006

Соловьев С.Л.<sup>1</sup>, Шишов А.В.<sup>1</sup>, Поваров В.П.<sup>2</sup>, Яуров С.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций»,  
109507, г. Москва, ул. Ферганская, 25

<sup>2</sup> Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»,  
396072, Воронежская обл., г. Нововоронеж, Промышленная зона Южная, 1



Работа посвящена анализу факторов, влияющих на холодопроизводительность вентиляционных установок, используемых для охлаждения воздуха герметичного ограждения (ГО) Нововоронежской АЭС-2. Теплообменные устройства для охлаждения воздуха представляют собой пучки прямолинейных однотипных оребренных снаружи трубок, расположенных в несколько рядов поперек вентиляционного канала перпендикулярно воздушному потоку. Теплообменный аппарат состоит из двух теплообменников (ступеней), в которых охлаждающая среда (вода) прокачивается разными независимыми технологическими системами. В рамках комплекса работ по поиску направлений по модернизации системы вентиляции ГО Нововоронежской АЭС-2 авторами проведена серия расчетов, направленных на определение причин низкой эффективности теплообменных аппаратов системы вентиляции АЭС. Работа проводилась по следующим направлениям: оценка влияния контакта между оребрением и трубками теплообменника, оценка влияния температуры охлаждающей воды на входе в теплообменник, оценка влияния расхода охлаждающей воды на холодопроизводительность. По результатам проведенной работы авторы пришли к следующим выводам: имеющаяся конструкция теплообменной поверхности охлаждающих ступеней вентиляционных установок (трубка и лента) эквивалентна голой трубке с улучшенными характеристиками по теплообмену за счет турбулизации и перемешивания потока воздуха металлической лентой, а также ее частичным (не сплошным) тепловым контактом к наружной поверхности теплообменной трубки. При этом изменение расхода охлаждающей воды не оказывает сильного влияния на холодопроизводительность теплообменника.

© Соловьев С.Л., Шишов А.В., Поваров В.П., Яуров С.В., 2024

**Ключевые слова:** АЭС-2006, вентиляция, модернизация, герметичное ограждение, опыт эксплуатации, численное моделирование, теплообменные трубки, оребрение, охлаждающая среда.

**Для цитирования:** Соловьев С.Л., Шишов А.В., Поваров В.П., Яуров С.В. Оценка теплообменных характеристик охлаждающих трубок с внешним оребрением для вентиляционных установок герметичного ограждения проекта АЭС-2006. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 3. – С. 6–17. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.3.01>

## СИСТЕМА ВЕНТИЛЯЦИИ ПОМЕЩЕНИЙ ГЕРМЕТИЧНОГО ОГРАЖДЕНИЯ ЭНЕРГОБЛОКОВ НОВОВОРОНЕЖСКОЙ АЭС-2

Системы вентиляции помещений внутри защитных оболочек (ЗО) современных АЭС поколения 3+ предназначаются не только для удаления избыточного тепла, влаги и поддержания оптимальных условий окружающей среды для нормальной работы оборудования, создания нормальных климатических условий для работы персонала при проведении планово-предупредительных ремонтов и перегрузочных работ в период останова блока, очистки воздуха от активных аэрозолей, но и для создания разрежения не менее 200 Па в необслуживаемой зоне и 150 Па в зоне ограниченного доступа [1–7].

Согласно проекту энергоблоков № 1 и № 2 Нововоронежской АЭС-2, в зону ограниченного доступа входят центральный зал, помещения электродвигателей ГЦН и другие помещения. В необслуживаемую зону входит выгороженный объем внутреннего контайнмента, включающий в себя боксы парогенераторов (ПГ) и главных циркуляционных насосов (ГЦН), шахту реактора, вентиляционные камеры и другие помещения, где размещены оборудование и трубопроводы первого контура.

Для обеспечения теплоотвода от технологического оборудования и трубопроводов, поддержания в помещениях ГО заданной температуры воздуха предусматриваются рециркуляционные установки охлаждения воздуха, расположенные внутри ГО (рис. 1).

В качестве хладоносителя для систем вентиляции и кондиционирования воздуха используется вода промежуточного контура от-

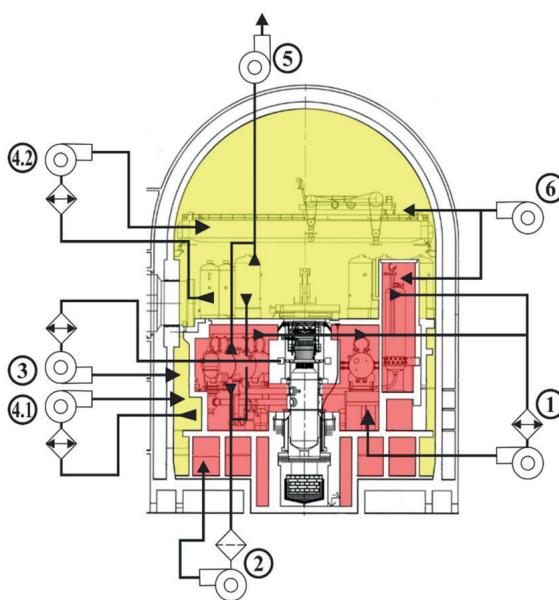


Рис. 1. Принципиальная схема системы охлаждения и вентиляции ГО: 1 – рециркуляционная система охлаждения необслуживаемой зоны; 2 – рециркуляционная система очистки воздуха внутри помещений герметичного ограждения; 3 – рециркуляционная система охлаждения приводов системы управления и защит; 4.1 – рециркуляционная система охлаждения помещений кольцевых коридоров, примыкающих к ним помещений и расположенного в них оборудования; 4.2 – рециркуляционная система охлаждения центрального зала герметичного ограждения; 5 – система вытяжной вентиляции; 6 – система приточной вентиляции

ветственных потребителей, промежуточного контура потребителей нормальной эксплуатации. Эти системы выполнены по замкнутой схеме, а от них отвод тепла осуществляется системами технического водоснабжения ответственных потребителей (в летнее время добавляется отвод тепла холодильными машинами компрессионного типа).

## ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЗДУХООХЛАДИТЕЛЕЙ

В качестве объекта моделирования выбран воздухоохладитель циркуляционной системы охлаждения необслуживаемой зоны. Система охлаждает помещения главного циркуляционного контура и парогенераторов, компенсатора давления, опорную и упорную ферму. Система включает в себя четыре установки, из которых две находятся в работе, а две – в резерве (см. рис. 1, поз. 1).

Воздухоохладитель представляет собой теплообменный аппарат, трубная система которого расположена горизонтально и скомпонована по сетке равностороннего треугольника. Гладкая труба и ребра выполнены из стали 08Х18Н10Т и 08Х18Н10 соответственно. Торцы теплообменных груб, свободные от ребер, приварены к трубным доскам. Между трубными досками на участке труб, свободном от ребер, расположены промежуточные доски. Трубные доски закрыты крышками, в которых выполнены коллекторные камеры для перетока воды из одного хода в другой. На одной из крышек расположены патрубки для подвода и отвода охлаждающей воды, а также патрубки для подключения к системам воздухоудаления и дренажа (рис. 2, 3).

Теплообменные устройства представляют собой пучки прямолинейных однотипных оребренных снаружи трубок, расположенных в несколько рядов поперек вентиляционного канала перпендикулярно воздушному потоку. Для отвода тепла через трубки прокачивается хладагент (вода) поочередно от нижнего по воздушному потоку ряда к верхнему (противоточная схема теплообменника). Ряды трубок смещены поперек потоков один относительно другого на половину расстояния между трубками в ряду (шахматное расположение). Направление течения воды в соседних рядах противоположное.

При этом теплообменный аппарат состоит из двух теплообменников (ступеней), в которых охлаждающая среда (вода) прокачивается разными независимыми технологическими

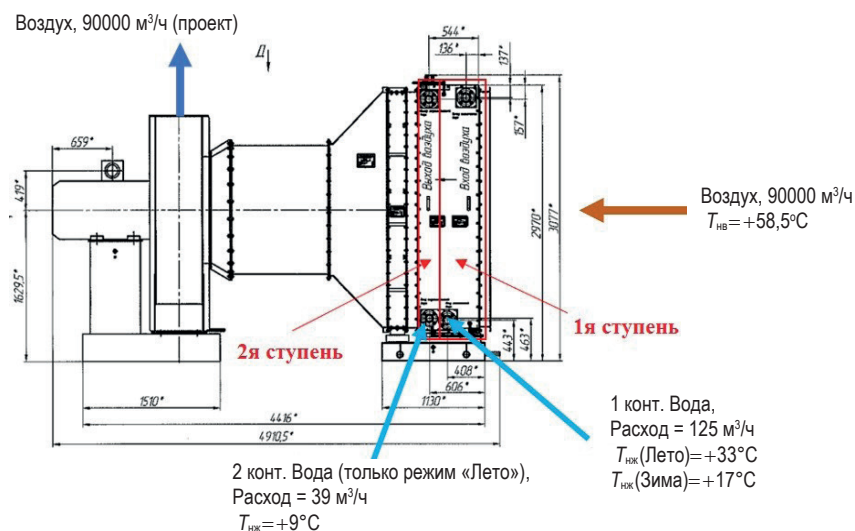


Рис. 2. Общий вид вентиляционной установки

системами (см. рис. 2). Ступень 1, как основная, находится в работе как при низких температурах окружающей среды (режим «Зима»), так и при высоких (режим «Лето»). Ступень 2 вводится в работу при высоких температурах окружающей среды. Конечный отвод тепла от ступени 1 выполняется замкнутым промежуточным контуром технической воды, а от него уже в окружающий воздух через брызгальные бассейны. Отвод тепла от ступени 2 организуется специальными компрессорными холодильными машинами.

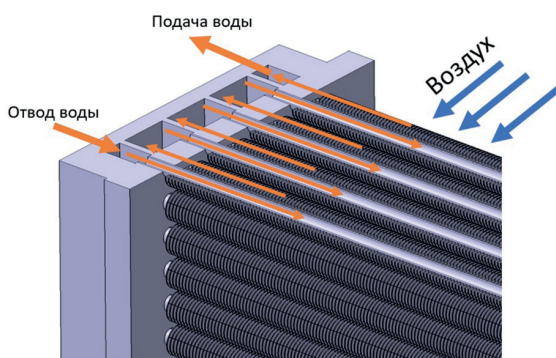


Рис. 3. Типовая конструкция теплообменника вентиляционной установки

Наружный диаметр трубок 22 мм, толщина стенки 2,5 мм, ребро представляет собой спираль из ленты шириной 9 мм и толщиной 1 мм, навитой на внешнюю поверхность трубки с шагом 5 мм. Трубка и спираль изготовлены из нержавеющей стали. Ребро плотно прилегает к трубке и удерживается на ней за счет натяжения и (частично) сварки.

Установка работает следующим образом: воздух из охлаждаемого объема поступает на наружные поверхности оребренных труб воздухоохладителя, охлаждается циркулирующей в трубах водой и направляется в вентилятор, а затем в напорный воздуховод.

Основные характеристики воздухоохладителя системы представлены в табл. 1.

Таблица 1

### Конструктивные характеристики воздухоохладителей

Наименование показателя	Значение	
Теплообменная трубка	Ø22 × 2,5	
Оребрение	Винтовое однозаходное, лента 9 × 1	
Шаг навивки оребрения, мм	5	
Наружный диаметр по ребрам, мм	40	
Толщина ребра, мм	1	
Расположение труб в пучке	Шахматное	
Шаг труб в пучке, мм	45	
Шаг между рядами, мм	39	
Эквивалентный диаметр живого сечения, мм	6,815	
Коэффициент оребрения	6,236	
Коэффициент живого сечения	0,431	
Длина теплообменной трубки, мм	2780	
Длина оребренной части теплообменной трубки, мм	2680	
Число теплообменных труб в ряду, шт.	55	
Высота воздухоохладителя, мм	2552	
Площадь полной теплообменной поверхности ( $F_n$ ), м <sup>2</sup>	423,2	67,85
Число рядов	8 (1 ступень)	2 (2 ступень)

## ОЦЕНКА ТЕПЛООБМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОХЛАЖДАЮЩИХ ТРУБОК

На основании представленных геометрических и эксплуатационных характеристик охладителей воздуха проводится оценка производительности установок при различных режимах работы с целью проверки предположений относительно возможных причин отклонения наблюдаемых характеристик от их проектных значений.

Поскольку структура теплообменника состоит из большого числа однотипных элементов, расчет проводится в два этапа. На первом этапе решается сопряженная задача о переносе тепла в контактирующих областях, занятых водой, воздухом и металлом. Область пространства, в которой рассчитывается тепловое поле, ограничена несколькими геометрически идентичными элементами, расположенными один за другим в направлении воздушного потока. Протяженность элементов в направлении потока хладагента равна шагу спирали.

Результатом расчета на первом этапе является величина объемной плотности потока тепла, передаваемого от газа к жидкости, отнесенной к разности средних по объему элемента температур газа и жидкости. При этом предполагается, что указанная величина зависит только от конструкции данного варианта теплообменника, его режима работы в целом и не зависит от расположения элемента в направлениях поперек воздушного потока.

Такой подход соответствует принятым на практике методам расчета теплообменных устройств и отличается от них тем, что коэффициент теплопередачи не берется из эмпирических корреляций, а рассчитывается на основании решения дифференциальных уравнений гидродинамики и теплопереноса.

На втором этапе решается задача о течении воздуха в теплообменнике и прилегающих участках воздуховода. Внутренняя структура теплообменника не рассматривается. Область теплоотвода моделируется посредством распределенных источников импульса и энергии, величины которых рассчитаны на первом этапе. Результатом второго этапа являются величина производительности охладителя воздуха и распределение параметров потока в области теплообменника, дающее представление о степени неравномерности использования теплообменной поверхности и возможном наличии неэффективно работающих участков.

Для определения параметров течения охлаждаемого воздуха в расчетной области численно решаются уравнения Рейнольдса (RANS). Среда считается несжимаемой. Ее параметры соответствуют сухому воздуху.

Для расчета турбулентного переноса выбрана  $k$ - $\varepsilon$ -модель турбулентности для низких чисел Рейнольдса, рекомендованная для использования при решении аналогичных задач [8–17].

Расчетная область составлена из шестигранных элементов, количество которых равно количеству рядов конкретного типа теплообменника. Пример геометрии расчетной области для теплообменника, состоящего из восьми рядов первой ступени и двух рядов второй ступени, показан на рис. 4.

Результаты расчетов для режимов «Лето», «Зима» представлены в табл. 2, 3.

Расчет проводился с учетом полного контакта поверхности ребра к поверхности трубы. Расхождение от 5 до 20% с проектными данными может быть объяснено, в основном, тем, что в реальном случае не обеспечен достаточный контакт между ребром и теплообменной трубкой (особенность крепления оребрения к теплообменной трубке).

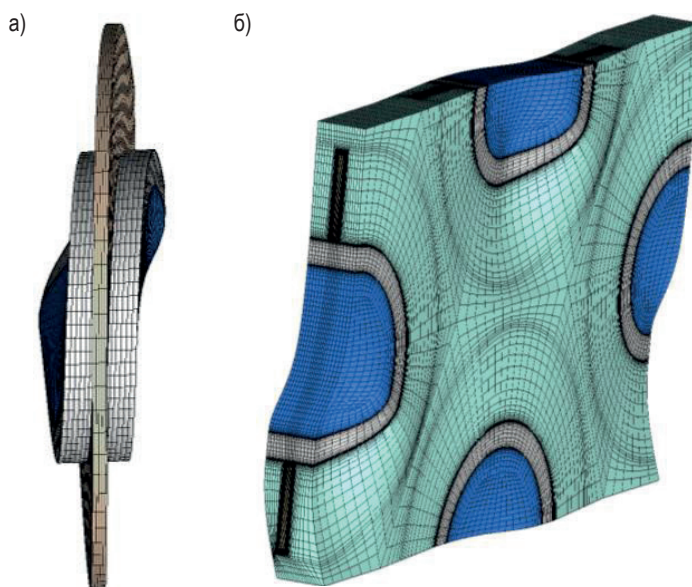


Рис. 4. Геометрия расчетной области: а) – область твердого тела (ребренная трубка); б) – область со стороны воздуха и охлаждающей воды

Таблица 2

**Сравнение результатов расчета и проектных данных для режима «Лето»**

Режим «Лето» (в работе ступень № 1 + ступень № 2)						
	$t_{\text{вх}} \text{ охлаждаемой среды, } ^\circ\text{C}$	$t_{\text{выхода}} \text{ охлаждаемой среды, } ^\circ\text{C}$	$G_{\text{охлаждаемой среды, м}^3/\text{ч}}$	$L_{\text{воздуха, м}^3/\text{ч}}$	$Q_{\text{ж, кВт}}$	Невязка, %
Ступень № 1 (проект)	33	36,5	125	90000	508,0	
Ступень № 2 (проект)	9	15	39	90000	271,5	
Ступень № 1 (расчет)	33,00	36,39	125	90000	479,8	-5
Ступень № 2 (расчет)	9,00	13,44	39	90000	203,6	-25

Таблица 3

**Сравнение результатов расчета и проектных данных для режима «Зима»**

Режим «Зима» (в работе ступень № 1)						
	$t_{\text{вх}} \text{ охлаждаемой среды, } ^\circ\text{C}$	$t_{\text{выхода}} \text{ охлаждаемой среды, } ^\circ\text{C}$	$G_{\text{охлаждаемой среды, м}^3/\text{ч}}$	$L_{\text{воздуха, м}^3/\text{ч}}$	$Q_{\text{ж, кВт}}$	Невязка, %
Ступень №1 (проект)	17	23	125	90000	870,8	
Ступень №1 (расчет)	17	21,91	125	90000	712,6	-15%



## СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ДАННЫХ ПО ХОЛОДОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И РЕЗУЛЬТАТОВ ПНР

Основными факторами, которые влияют на эффективность (холодопроизводительность) теплообменников вентиляционных установок, являются

- наличие (отсутствие) контакта между оребрением и трубками теплообменника;
- значение температуры охлаждающей среды на входе в теплообменник;
- значение расхода охлаждающей среды.

Оценка, проведенная с учетом влияния этих факторов, показала следующие закономерности:

- в случае полного контакта ребра и трубки холодопроизводительность теплообменника составляет 207 кВт, а в случае полного отсутствия контакта дополнительная передача тепла от трубки к оребрению происходит за счет излучения и холодопроизводительность теплообменника составит 71,5 кВт (рис. 5);

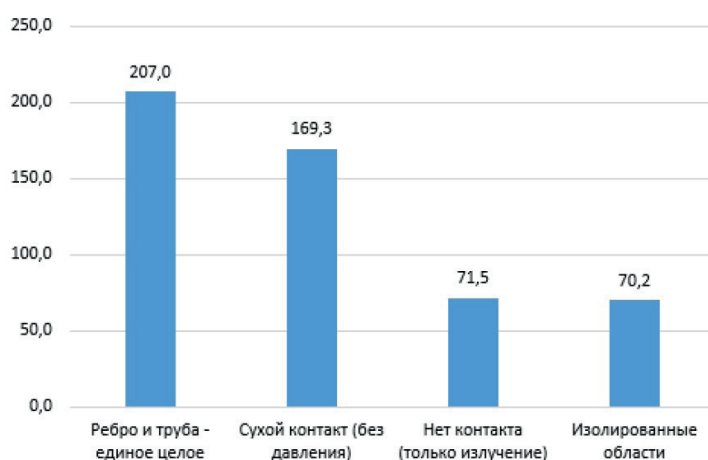


Рис. 5. Влияние контакта между оребрением и трубками теплообменника на его холодопроизводительность

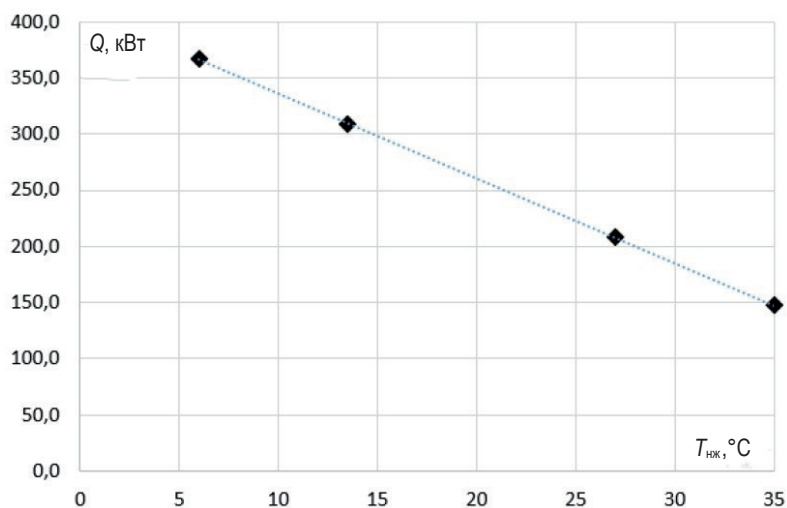


Рис. 6. Изменение холодопроизводительности ступени в зависимости от изменения температуры  $T_{нх}$  охлаждающей воды

- значение температуры охлаждающей среды на входе в теплообменник оказывает значительное влияние на холодопроизводительность ступеней – при изменении температуры на 10°C холодопроизводительность теплообменника изменяется в 1,26 раза (рис. 6, 7);
- изменение расхода охлаждающей воды не оказывает сильного влияния на изменение холодопроизводительности теплообменника. Причем, при ухудшении контакта между трубкой и ребром влияние расхода становится незаметным и сводится практически к нулю (рис. 8).



Рис. 7. Сравнение расчетных данных по холодопроизводительности и данных ПНР

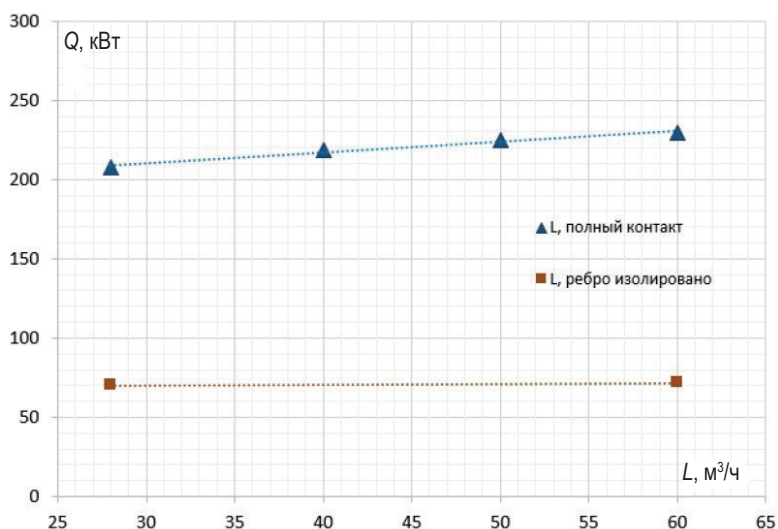


Рис. 8. Зависимость холодопроизводительности теплообменника от расхода охлаждающей воды

## ВЫВОДЫ

Рассмотрены особенности теплообменников вентиляционных устройств герметичного ограждения энергоблоков № 1, 2 Нововоронежской АЭС-2.

Проведена оценка теплообменных характеристик охлаждаемых трубок, разработана их CFD-модель, выполнен анализ работы теплообменника с использованием расчетного кода STAR-CCM+.



По результатам расчета выявлено расхождение по производительности теплообменников в диапазоне 5–25% по сравнению с проектными данными, что может быть объяснено особенностью изготовления теплообменных трубок с оребрением. В данном случае ребро плотно прилегает к трубке и удерживается на ней за счет натяжения и (частично) сварки.

Проведен анализ факторов, наиболее сильно влияющих на холодопроизводительность вентиляционных установок. Наибольшее воздействие оказывают температура охлаждающей среды на входе в теплообменник и конструкция теплообменной поверхности охлаждающих ступеней (см. рис. 6, 7).

По результатам проведенной работы авторы пришли к следующим выводам: имеющаяся конструкция теплообменной поверхности охлаждающих ступеней вентиляционных установок (трубка и лента) эквивалентна голой трубке с улучшенными характеристиками по теплообмену за счет турбулизации и перемешивания потока воздуха металлической лентой, а также частичным (неплошным) тепловым контактом последней к наружной поверхности теплообменной трубки. При этом изменение расхода охлаждающей воды не оказывает сильного влияния на изменение холодопроизводительности теплообменника.

### **Литература**

1. Андрушечко С.А., Афров А.М., Васильев Б.Ю. и др. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. – М.: Логос, 2010. – 604 с.
2. Маргулова Т.Х. Атомные электрические станции. Учебник для вузов, 5-е изд. – М.: ИздАТ, 1994. – 288 с.
3. НП-036-05. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила устройства и эксплуатации систем вентиляции важных для безопасности. – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2005. – 14 с.
4. Тихомиров К.В., Сергеев Э.С. Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция. Учебник для вузов, 4-е изд. – М.: Стройиздат, 1991. – 480 с.
5. Богословский В.Н., Кокорин О.Я., Петров Л.В. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение. Учебник для вузов. – М.: Стройиздат, 1985. – 367 с.
6. Кокорин О.Я. Установки кондиционирования воздуха. Основы расчета и проектирования. Учебник для вузов, 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1978. – 264 с.
7. Слонимский И.Б. Монтаж систем вентиляции и кондиционирования воздуха ТЭС и АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 133 с.
8. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. – М.: Наука, 1989. – 432 с.
9. Денисихина Д.М. Использование программы STAR-CCM+ при проектировании систем вентиляции. Учебное пособие. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – СПбГАСУ: СПб, 2013. – 68 с.
10. Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. – СПб.: Судостроение, 2005. – 392 с.
11. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 124 с.
12. Пейре Р., Тейлор Т.Д. Вычислительные методы в задачах механики. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 351 с.
13. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т. II. – М.: Мир, 1991. – 552 с.

14. Кирилов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 296 с.
15. Ланин Ю.В., Стрелец М.Х. Внутренние течения газовых смесей. – М.: Наука, 1989. – 366 с.
16. Chui E.H., Raithby G.D. Computation of Radiant Heat Transfer on a Non-Orthogonal Mesh Using the Finite-Volume Method. // Numerical Heat Transfer, Part B. – 1993. – № 23. – PP. 269–288.
17. Ferziger J.H., Peric M. Computational method for fluid dynamics. – Berlin, Heidelberg, 1999. – 389 p.

Поступила в редакцию 21.10.2023

### Авторы

Соловьев Сергей Леонидович, научный руководитель, д.т.н.,

E-mail: SLSoloviev@vniiaes.ru

Шишов Андрей Владимирович, главный эксперт, к.т.н.,

E-mail: AVShishov@vniiaes.ru

Поваров Владимир Петрович, заместитель Генерального директора / директор, д.т.н.,

E-mail: PovarovVP@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Яуров Сергей Васильевич, ведущий инженер по управлению реактором РЦ № 6,

E-mail: YaurovSV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

UDC 621.039

### Evaluation of the Heat Exchange Characteristics of Cooling Tubes with External Fins for Ventilation Units of the NPP-2006 Design Containment

Soloviev S.L.<sup>1</sup>, Shishov A.V.<sup>1</sup>, Povarov V.P.<sup>2</sup>, Yaurov S.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation JSC,  
25 Ferganskaya St., 109507 Moscow, Russia

<sup>2</sup>Novovoronezh Nuclear Power Plant, Branch of «Concern Rosenergoatom»,  
1 Yuzhnaya Industrial Zone, 396072 Novovoronezh, Voronezh Reg., Russia

### Abstract

The paper analyses the factors that affect the cooling capacity of the ventilation units used for cooling air inside the containment of the Novovoronezh NPP II. The heat exchange devices for air cooling represent bundles of rectilinear tubes of the same type, having fins on their outside, arranged in several rows across the ventilation duct perpendicular to the air flow. Each heat exchanger unit consists of two heat exchangers (stages), in which the cooling medium (water) is pumped by different independent process systems. As part of the package of activities to search for the areas for upgrading the containment ventilation system at the Novovoronezh NPP II, the authors undertook a series of calculations aimed at determining the causes for the low efficiency of the heat exchange units of the NPP's ventilation system. The study aimed to estimate the effect of the contact between the fins and the heat exchanger tubes, estimate the effect of the cooling water temperature at the heat exchanger inlet, and estimate the effect of the cooling water flow on the cooling capacity. Based on the results of the study, the following conclusions have been made: the existing design of the heat exchange surface of the ventilation unit cooling stages (tube and band) is equivalent to a bare tube with an improved heat exchange performance due to turbulence and mixing of the air flow using a metallic band, as well as to partial (discontinuous) thermal contact of the latter to the outer surface of the heat exchange tube. At the same time,

a variation in the cooling water flow does not have a major effect on the change in the cooling capacity of the heat exchanger.

**Keywords:** NPP-2006, ventilation, upgrading, containment, operating experience, numerical simulation, heat exchange tubes, finning, cooling medium.

**For citation:** Soloviev S.L., Shishov A.V., Povarov V.P., Yaurov S.V. Evaluation of the Heat Exchange Characteristics of Cooling Tubes with External Fins for Ventilation Units of the NPP-2006 Design Containment. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2024, no. 3, pp. 6–17; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.3.01> (in Russian).

### References

1. Andrushechko S.A., Afrov A.M., Vasilyev B.Y., Generalov V.N., Kosourov K.V., Semchenkov Yu.M., Ukraitsev V.F. *NPP with VVER-1000 TYPE reactor. From Physical Basics of Exploitation to Evolution Design*. Moscow. Logos Publ., 2010, 604 p. (in Russian).
2. Margulova T.Kh. *Nuclear Power Plants*. Textbook for Universities. Moscow. Izdat Publ., 1994, 288 p. (in Russian).
3. NP-036-05. *Federal norms and rules in the field of the use of atomic energy. Rules for the installation and operation of ventilation systems important for safety*. FBU «NTC YARB», 2005, 14 p. (in Russian).
4. Tikhomirov K.V., Sergeenko E.S. *Heat engineering, heat and gas supply and ventilation*. Textbook for universities, 4<sup>th</sup> ed. Moscow. Stroyizdat Publ., 1991, 480 p. (in Russian).
5. Bogoslovsky V.N., Kokorin O.Ya., Petrov L.V. *Air conditioning and refrigeration*. Textbook for universities. Stroyizdat Publ., 1985, 367 p. (in Russian).
6. Kokorin O.Ya. *Air conditioning installations. Fundamentals of calculation and design*. Textbook for universities, 2<sup>nd</sup> ed., Mechanical Engineering Publ., 1978, 264 p. (in Russian).
7. Slonimsky I.B. *Installation of ventilation and air conditioning systems of thermal power plants and nuclear power plants*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1987, 133 p. (in Russian).
8. Samarsky A.A., Gulin A.V. *Numerical methods*. Moscow. Nauka Publ., 1989, 432 p. (in Russian).
9. Denisikhina D.M. *The use of the STAR-CCM+ program in the design of ventilation systems*. St. Petersburg. SPbGASU Publ., 2013, 68 p. (in Russian).
10. Bystrov Yu.A., Isaev S.A., Kudryavtsev N.A., Leontiev A.I. *Numerical modeling of vortex intensification of heat transfer in pipe packages*. St. Petersburg. Shipbuilding Publ., 2005, 392 p. (in Russian).
11. Patankar S. *Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1984, 124 p. (in Russian).
12. Peire R., Taylor T. D. *Computational methods in problems of mechanics*. St. Petersburg. Hydrometeoizdat Publ., 1986, 351 p. (in Russian).
13. Fletcher K. *Computational methods in fluid dynamics*. Vol. II. Moscow. Mir Publ., 1991, 552 p. (in Russian).
14. Kirillov P.L., Yuryev Y.S., Bobkov V.P. *Handbook of thermohydraulic calculations. (nuclear reactors, heat exchangers, steam generators)*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1984, 296 p. (in Russian).
15. Lapin Yu.V., Strelets M.H. *Internal flows of gas mixtures*. Moscow. Nauka Publ., 1989, 366 p. (in Russian).
16. Chui E. H., Raithby G. D. Computation of Radiant Heat Transfer on a Non-Orthogonal Mesh Using the Finite-Volume Method. *Numerical Heat Transfer, Part B*, 1993, no. 23, pp. 269–288.
17. Ferziger J. H., Peric M. *Computational method for fluid dynamics*. Berlin. Heidelberg Publ., 1999, 389 p.

**Authors**

Sergey L. Soloviev, Scientific Supervisor, Dr. Sci. (Engineering),

E-mail: [LSoloviev@vniiaes.ru](mailto:SLSoloviev@vniiaes.ru)

Andrey V. Shishov, Chief Expert, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: [AVShishov@vniiaes.ru](mailto:AVShishov@vniiaes.ru)

Vladimir P. Povarov, Deputy Director General / Director, Dr. Sci. (Engineering),

E-mail: [PovarovVP@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:PovarovVP@nvnpp1.rosenergoatom.ru)

Sergey V. Yaurov, Lead Reactor Control Engineer,

E-mail: [YaurovSV@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:YaurovSV@nvnpp1.rosenergoatom.ru)