



ВОДОВОЗДУШНОЕ АЭРОЗОЛЬНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ РЯДОВ ИЗ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ*

А.Х. Абед, С.Е. Щеклеин, В.М. Пахалуев

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
д. 19, ул. Мира, Екатеринбург, 620002, Россия
тел.: +7(992)014-51-08; e-mail: akraaam82@yahoo.com

doi: 10.15518/isjaee.2019.28-33.063-072

Заключение совета рецензентов: 06.11.19 Заключение совета экспертов: 12.11.19 Принято к публикации: 15.11.19

Развитие как тепловой, так и ядерной энергетики в XXI веке привело к значительному увеличению потребности электростанций, работающих по термодинамическому циклу Ренкина, в водных ресурсах для отвода низкопотенциальной теплоты в окружающую среду. Основу современных технологий охлаждения конденсаторов паровых турбин составляют испарительные системы (градирни, брызгальные бассейны, пруды-охладители). Испаряющаяся в этих системах в значительных объемах вода требует постоянного восполнения из имеющихся на территории водных источников, а пары воды в зоне размещения электростанций создают повышенную влажность атмосферного воздуха и дополнительные условия для парникового эффекта. Разработка технологий охлаждения с малым потреблением водных ресурсов является важной задачей современной энергетики.

Проведены экспериментальные исследования теплообмена цилиндрических элементов с шахматной компоновкой в прямоугольном канале с мелкодисперсным водным аэрозольным потоком. Получены значения коэффициентов теплоотдачи в зависимости от числа Рейнольдса, степени увлажнения потока для каждого ряда цилиндров. Предложена физическая модель обтекания поверхностей цилиндрических элементов потоком, содержащим аэрозольные частицы воды. Модель позволяет оценить осаждение этих частиц на нагретой поверхности. Произведена оценка относительной массы капельной влаги, оседающей на поверхности цилиндров, в зависимости от плотности орошения для первого, второго и третьего рядов. Получено критериальное уравнение, обобщающее экспериментальные данные в виде зависимости числа Нуссельта от режимных параметров (чисел Рейнольдса и Вебера) и положения элементов в канале. Показано, что микрокапельное увлажнение воздушного потока позволяет повысить эффективность теплообменника в 1,5–3,5 раза. Наибольшее повышение эффективности происходит на двух первых рядах труб, что требует создания конструкции мало-рядного теплообменника или дополнительного микрокапельного промежуточного ввода воды перед последующими рядами по направлению движения воздушного потока.

Ключевые слова: водовоздушный аэрозольный поток; плотность орошения; коэффициент теплоотдачи; цилиндрические элементы; осаждение капельной влаги.

* Абед А.Х., Щеклеин С.Е., Пахалуев В.М. Водовоздушное аэрозольное охлаждение рядов из цилиндрических элементов в прямоугольном канале // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2019;28-33:63-72.



WATER-AIR AEROSOL COOLING OF CYLINDRICAL ELEMENT ROWS IN A RECTANGULAR CHANNEL

A.H. Abed, S.E. Shcheklein, V.M. Pakhaluev

Ural Federal University Named after the First President of Russia B.N. Yeltsin
19 Mir Str., Ekaterinburg, 620002, Russia
tel.: +7(992)014-51-08, e-mail: akraaam82@yahoo.com

doi: 10.15518/isjiae.2019.28-33.063-072

Referred 6 November 2019 Received in revised form 12 November 2019 Accepted 15 November 2019

The development of both thermal and nuclear energy in the 21st century has led to a significant increase in water resources demand for removal of low-grade heat into the environment from power plants operating on the Rankine thermodynamic cycle. The evaporative systems (cooling towers, spray basins) form the basis of modern technologies for cooling condensers of steam turbines. Water that evaporates in a significant volume requires constant replenishment from water sources available on the territory, and water vapor forms in the zone where the power plants are located, increased atmospheric humidity and creates an additional condition for the occurrence of a “greenhouse effect”. The development of cooling technologies with low water consumption is one of the important tasks of modern energy.

The paper performs the experimental investigations of heat transfer from cylindrical elements in a staggered arrangement inside a rectangular channel with a fine water aerosol. We have obtained the heat transfer coefficients depending on the Reynolds number and the degree of flow moistening for each row of cylinders. A physical model is proposed for the flow around the surface of cylindrical elements that contains water aerosol particles. This model makes it possible to evaluate their deposition on a heated surface. We have estimated the relative mass of droplet moisture deposited on the cylinder's surface depending on the irrigation density for rows 1, 2 and 3 and obtained a criterion equation that generalizes the experimental data in the form of Nusselt number, operating parameters (Reynolds and Weber numbers), and the position of the elements in the channel. Micro-droplet humidification of the airflow is shown to make it possible to increase the heat transfer efficiency by 1.5–3.5 times. The greatest increase in efficiency occurs in the first two rows of cylindrical elements, which requires the construction of a heat exchanger with a low number of rows, or an additional micro-droplet intermediate water inlet in front of subsequent rows in the direction of airflow.

Keywords: water-air aerosol flow; irrigation density; heat transfer coefficient; cylindrical elements; water droplet deposition.



*Акрам Хамзах Абед
Akram Hamzah Abed*

Сведения об авторе: аспирант, инженер-исследователь кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Образование: Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ по специальности «Теплоэнергетика и теплотехника» (2014 г.).

Награды: Почетная грамота министерства образования и науки республики Татарстан за большие успехи в учебе и высокие творческие достижения (2014 г.).

Область научных интересов: теплоперенос; поток жидкости; накопление тепловой энергии; солнечная энергия.

Публикации: более 25.

Information about the author: Ph.D. Student, Researcher at Department of Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin.

Education: Kazan National Research Technical University. A.N. Tupolev - KAI in the specialty “Heat and Power Engineering”, 2014.

Awards: Certificate of Honor from the Ministry of Education and Science of the Republic of Tatarstan for great academic success and high creative achievements, 2014.

Research interests: heat and mass transfer; fluid flow; thermal energy storage; solar energy.

Publications: more than 25.



Сергей Евгеньевич
Щеклеин
Sergey Shcheklein

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; действительный член Международной энергетической академии; член редколлегии журнала «Известия вузов. Ядерная энергетика»; Международного научного журнала «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE); сборника трудов УГТУ-УПИ «Теплофизика ядерных энергетических установок»; Трудов Одесского национального политехнического университета; Научно-технического журнала «Энергоэффективность и анализ».

Награды: Заслуженный энергетик России; Национальная экологическая премия им. В.И. Вернадского; медаль «Ветеран атомной энергетики и промышленности».

Образование: Уральский политехнический институт (УГТУ-УПИ) (1972 г.).

Область научных интересов: термодинамика ядерных энергетических установок; проблемы атомной энергетики и теплофизики двухфазных потоков; продление ресурса и повышение надежности оборудования АЭС; солнечная энергетика; ветроэнергетика; биоэнергетика.

Публикации: более 350, включая 2 монографии, 20 изобретений.
h-index 11

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Professor, the Head of Atomic Stations and Renewable Energy Sources Department, Urals Federal University; a member of International Energy Academy; a member of the editorial board of "Institute of Higher Education News. Nuclear Power"; International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE); "Nuclear Power Units Heat Engineering" USTU; Odessa National Polytechnic University article collection; Scientific Journal of "Energy Effectiveness and Analysis".

Awards: Honored Power Engineer of the Russian Federation; V.I. Vernadsky National Environmental Award; Medal "Veteran of Nuclear Energy and Industry".

Education: Urals Polytechnic Institute, 1972.

Research interests: nuclear power units thermodynamics; questions of nuclear energy and thermophysics of the two-phase flows; NPP equipment lifetime enduring and reliability increasing; solar, wind and bioenergetics.

Publications: more than 350, including 2 monographs, 20 inventions.



Валерий Максимович
Пахалуев
Valery Pakhaluev

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; действительный член Международной академии наук о природе и обществе.

Образование: Уральский политехнический институт (УГТУ-УПИ) (1961 г.).

Награды: Почетная грамота министерства энергетики и жилищно-коммунального хозяйства Свердловской области (2011 г.).

Область научных интересов: теплофизические и физико-химические процессы в теплоэнергетике и металлургической теплотехнике; разработка физических основ нетрадиционных и возобновляемых источников энергии.

Публикации: более 90, в том числе 1 монография.
h-index 3

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Professor at Department of Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources, Urals Federal University; Member of International Academy of Natural and Social Sciences.

Education: Ural State Technical University, 1961.

Awards: Diploma of the Ministry of Energy and Housing and Utilities of the Sverdlovsk region, 2011.

Research interests: thermophysical and physical and chemical processes in thermal power generation and metallurgical engineering with the development of the physical foundations of alternative and renewable energy sources.

Publications: more than 90, including 1 monograph.

1. Введение

В современной тепловой и атомной энергетике широко используются так называемые мокрые градирни, где тепло передается в атмосферу в основном через испарение воды, что улучшает работу системы охлаждения, но приводит к большому количеству воды, испаряемой в движущийся воздушный поток [1, 2]. Как правило, шлейфы водяного пара можно увидеть поднимающимися из башни охлаждения, что увеличивает влажность окружающего воздуха и при-

водит к потерям до $5 \div 7$ % от количества циркулирующей воды (рис. 1) [3]. Насыщение атмосферного воздуха парами воды способствует развитию парникового эффекта [4, 5], то есть оказывает негативное влияние на окружающую среду.

В последние десятилетия в энергетике стали находить все более широкое применение сухие градирни, где тепло рассеивается путем конвективной теплопередачи через поверхность теплообмена без испарения жидкости в атмосферу [6]. Это создает воз-

возможности для сохранения водных ресурсов и особенно важно в маловодных регионах.



Рис. 1 – Антропогенное воздействие АЭС с испарительными градирнями на региональный климат
Fig. 1 – Anthropogenic effect of nuclear power plants with evaporative cooling towers on the regional climate

Таким образом, сухая градирня становится привлекательной для использования в структуре

АЭС и ТЭС вследствие отсутствия потребности в значительных водных ресурсах и парникового эффекта, связанного с переносом влаги в атмосферу [7–10].

Несмотря на преимущества, присущие сухим градирням, система сухого охлаждения оказывается в ряде случаев менее эффективной, чем система влажного охлаждения. Повышенная температура окружающей среды приводит к значительному снижению эффективности охлаждения в сухих градирнях [11], а в летние дни может привести к снижению мощности электростанций с системой сухого охлаждения до 20÷30 %. В данной работе рассматривается возможность гибридного подхода к охлаждению с сухой градирней с увлажнением воздуха микрокапельным орошением (туманом). Такое охлаждение значительно повышает эффективность теплообмена при снижении количества подаваемой в воздух воды. Впервые экспериментально определен диапазон изменения значений влагосодержания и скорости потока, при которых достигается максимальный эффект интенсификации теплообмена. Даются рекомендации по использованию предлагаемой системы охлаждения для многорядных теплообменных поверхностей.



Список обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
α	Коэффициент теплоотдачи, Вт/м ² ·К
λ	Теплопроводность, Вт/м·К
ν	Кинематическая вязкость, м ² /с
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
C	Теплоемкость, Дж/кг·К
d	Диаметр, м
F	Площадь, м ²
G	Масса распыляемой воды в единицу времени, кг/ч
j	Плотность орошения, кг/м ² ч
q	Тепловой поток, Вт/м ²
Q	Теплопотери, Вт
P	Мощность нагревателя, Вт
Nu	Число Нуссельта
n	Параметр осаждения
Pr	Число Прандтля
Re	Число Рейнольдса
r	Теплота парообразования, Дж/кг
Stk	Число Стокса
T	Температура, °С
u	Скорость, м/с
We	Число Вебера
<i>Индексы</i>	
i	Номер ряда
воз	Воздух
ж	Жидкость
к	Конвективный
кан	Канал
п	Потери
ср	Среда
ц	Цилиндр
<i>Аббревиатуры</i>	
КТО	Коэффициент теплоотдачи

2. Теоретический анализ и экспериментальные исследования

Исследования теплообмена цилиндрических элементов с водовоздушным аэрозольным потоком осуществлялись на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 2. Восемь цилиндрических элементов из меди диаметром d 14 мм с внутренними электронагревателями располагались в вертикальном прямоугольном канале размером 55x117 мм в виде шахматного пучка с продольным и поперечным расстояниями $S_1 = 30$ мм и $S_2 = 40$ мм

соответственно. Водовоздушный поток создавался путем смешения воздушного потока и потока аэрозольных капель от генератора аэрозолей с ультразвуковым излучателем частотой $f = 1,7$ МГц.

Средний размер капель в соответствии с формулой Ланга d_k составлял 2,7 мкм. В процессе проведения опытов производились измерения подводимой электрической мощности к электронагревателям цилиндров, температура поверхности которых, а также температура водовоздушного потока в узле смешения измерялись ХК термомпарами.

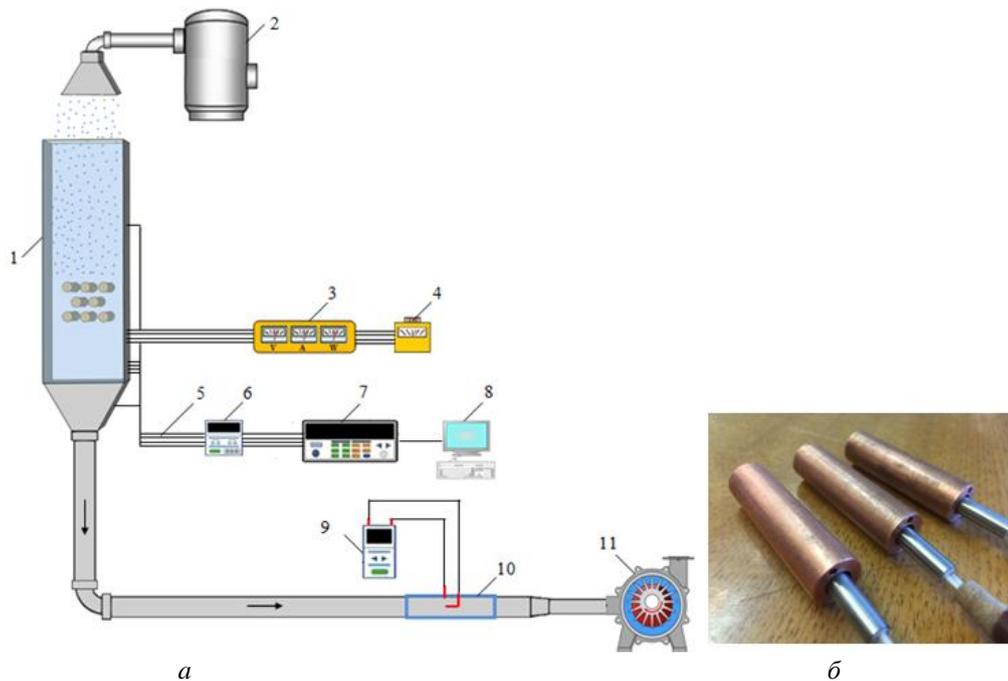


Рис. 2 – Схема экспериментальной установки: а) 1 – канал с цилиндрами; 2 – ультразвуковой генератор аэрозолей; 3 – мультиметр; 4 – автотрансформаторы; 5 – термомпары; 6 – аналоговый модуль вывода; 7 – модуль сбора данных; 8 – компьютер; 9 – дифманометр; 10 – расходомер с трубкой Пито; 11 – воздуходувка; б) цилиндры с нагревательными элементами [12]

Fig. 2 – The experimental setup: "а)" 1 – channel with cylinders; 2 – ultrasonic water mist generator; 3 – multimeter; 4 – voltage regulator; 5 – thermocouples; 6 – analog output module; 7 – data acquisition module; 8 – computer; 9 – manometer; 10 – flow meter with Pitot tube; 11 – air blower; "б)" cylinders with heating elements [12]

Значения коэффициента теплоотдачи (КТО) определялись при постоянной плотности теплового потока на поверхности цилиндров, разности температур на их поверхности T_{Π} и набегающего водовоздушного потока T_{cp} с поправкой на теплотеперу Q_{Π} в узле крепления цилиндров к стенкам канала:

$$\alpha = \frac{P_{эл} - Q_{\Pi}}{F_{\Pi} \cdot (T_{\Pi} - T_{cp})} \quad (1)$$

Расчетные параметры, используемые для анализа процесса теплообмена цилиндров в канале, включали:

– число Рейнольдса потока

$$Re = \frac{u \cdot d_{\Pi}}{v_{cp}} \quad (2)$$

– число Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_{\Pi}}{\lambda_{cp}} \quad (3)$$

– плотность орошения на входе в канал

$$j = G/F_{кан} \quad (4)$$

где G – масса распыляемой воды в единицу времени; u – скорость потока в узком сечении канала; v_{cp} и λ_{cp}

– кинематическая вязкость и коэффициент теплопроводности среды (потока) соответственно; $F_{\text{кан}}$ – площадь канала в поперечном сечении.

С целью анализа особенностей теплообмена пучка цилиндрических элементов, помещенных в стесненных условиях прямоугольного канала, осуществлялись варианты их обтекания как водовоздушным аэрозольным, так и воздушным потоками при одинаковых гидродинамических режимах с числом Рейнольдса $2,5 \cdot 10^3 \leq Re \leq 12,5 \cdot 10^3$ и плотностью теплового потока $q = 5\ 000\ \text{Вт/м}^2$. Полученные результаты позволяют оценить существенные факторы, определяющие теплообмен в обоих случаях.

На рис. 3а приведены значения КТО (числа Nu) для 1, 2 и 3 рядов цилиндрических элементов, последовательно обтекаемых воздушным потоком.

Характер теплообмена цилиндров соответствовал классической зависимости и схеме, отражающей последовательное возрастание интенсивности тепло-

обмена с увеличением числа Рейнольдса и номера ряда в канале:

$$Nu = C_i \cdot Re^{0,62} \cdot Pr^{0,33}, \quad (5)$$

где значения коэффициентов C_i составляли $C_1 = 0,26$; $C_2 = 0,30$; $C_3 = 0,31$ для 1, 2 и 3 рядов соответственно.

Для сравнения полученных данных с известными значениями из [12], на рис. 3б нанесены средние значения числа Nu для пучка из трех рядов (осредненные опытные данные и средние по формуле (5), а также данные А. Жукаускас [13].

Отклонения экспериментальных значений числа Nu от рассчитанных по известным формулам [8] в диапазоне $Re = 2,5 \cdot 10^3 \div 12,5 \cdot 10^3$ не превышают 6 %, как и соответствующие значения коэффициентов C_i в формуле (5).

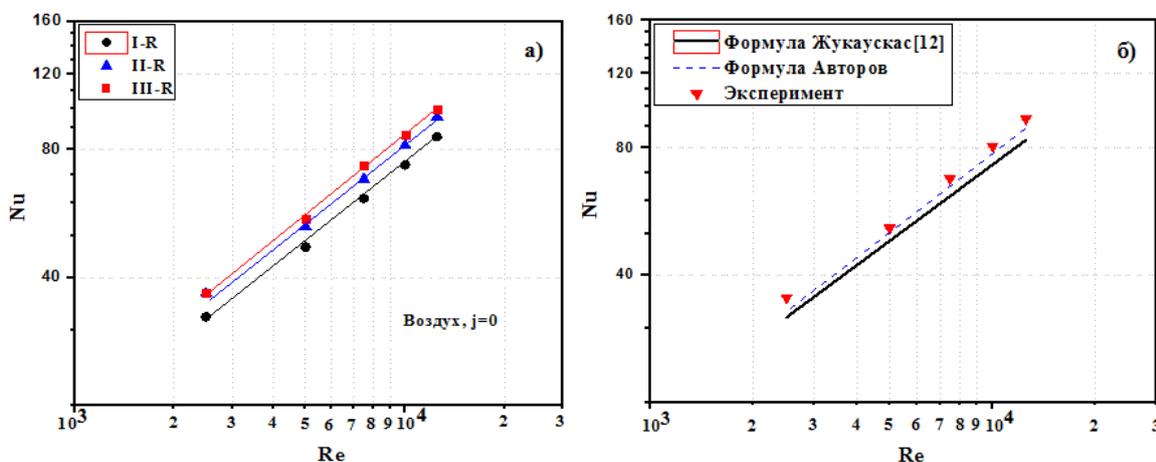


Рис. 3 – Теплообмен цилиндров в канале с воздушным потоком: а – опытные значения числа Nu для отдельных рядов; б – средние значения числа Nu для пучка из 3-х рядов и аналогичные данные [13]

Fig. 3 – Heat transfer of cylinders in a channel with air flow: "а" – experimental values of Nu for individual rows; "б" – average values of Nu for a bundle of 3 rows and similar data [13]

При использовании в качестве охлаждающего теплоносителя водовоздушного аэрозольного потока наблюдалась совершенно иная картина изменения КТО в зависимости от номера ряда (рис. 4). Вследствие испарения капельной влаги, оседающей на поверхности нагретых цилиндров, интенсивность охлаждения их резко возрастает по сравнению с охлаждением потоком воздуха. Установлено, что КТО существенно зависит от концентрации капельной влаги, оседающей на теплообменную поверхность. Данный эффект особенно заметно проявляется при сравнении интенсивности теплообмена рядов цилиндрических элементов в воздушных и водовоздушных потоках при одинаковых числах Рейнольдса.

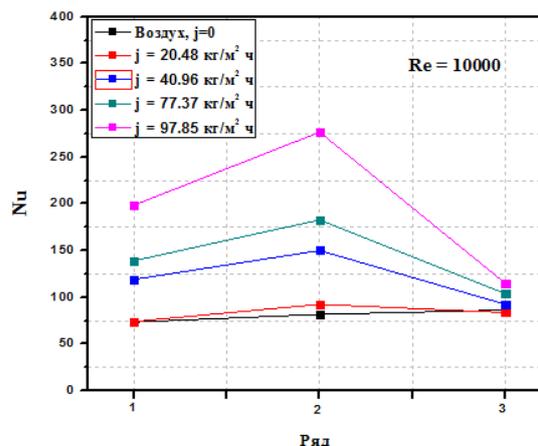


Рис. 4 – Значения КТО (числа Nu) для 1, 2 и 3-го рядов в водовоздушном и воздушном потоках в зависимости от плотности орошения j

Fig. 4 – HTC values (Nu number) for the 1, 2 and 3rd row in the air-water mist and air flows depending on the irrigation density

На рис. 4 отчетливо видно резкое снижение КТО для третьего ряда цилиндрических элементов как при больших значениях плотности орошения $j = 97,85$, так и при малом значении $j = 20,48$ до значений, мало отличающихся от соответствующих КТО для случая с воздушным потоком. Максимальные значения КТО приходятся на второй ряд цилиндрических элементов с интенсивностью теплоотдачи, заметно превышающей значения для первого ряда и в 1,1÷2,5 превышающие соответствующие значения третьего ряда.

Сравнительные экспериментальные данные теплообмена цилиндров с водовоздушным и воздушными потоками приведены в виде отношения $Nu/Nu_{воз}$ на рис. 5. Значительное увеличение интенсивности теплообмена (в 1,5÷3,5 раза) наблюдалось для элементов 1 и 2-го рядов при $Re \geq 4 \cdot 10^4$ и плотности орошения $j \geq 40,96$ кг/м²·ч. При меньших числах Re введение аэрозольных капель в поток оказывало незначительное влияние на теплообмен.

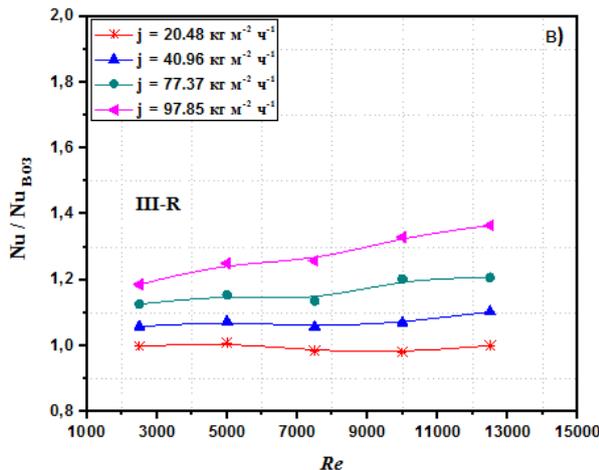
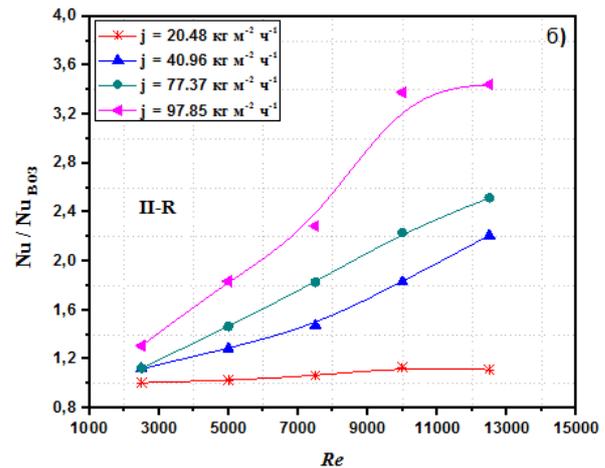
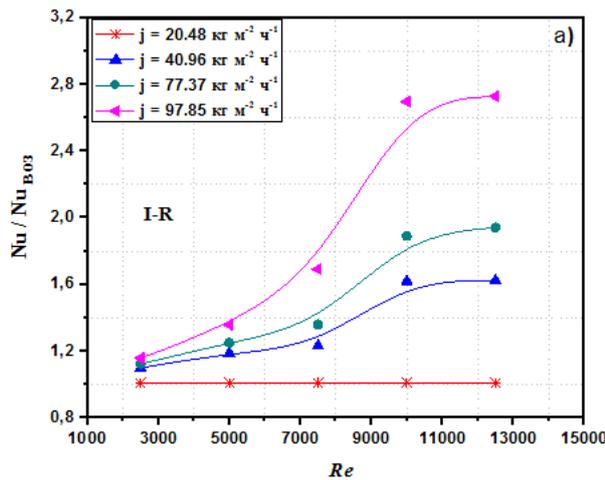


Рис. 5 – Относительные значения числа $Nu/Nu_{воз}$ для 3-х рядов цилиндрических элементов с $j = 20,48-97,85$ кг/м²·ч: а, б и в – 1, 2 и 3-й ряды
 Fig. 5 – Relative values of the Nusselt number Nu / Nu_{air} for 3 rows of cylindrical elements with $j = 20.48-97.85$ kg / m²·h: "а", "б" and "в" – 1, 2 and 3 rows

Таким образом, характер и интенсивность охлаждения цилиндрических элементов определяется совместным протеканием конвективного и теплообменного процессов, зависящих в свою очередь от скорости потока, плотности орошения и расположения элементов в канале.

Аппроксимация экспериментальных данных по теплообмену пучка цилиндров с шахматным расположением методом наименьших квадратов позволила получить обобщающую зависимость между относительными значениями критерия Нуссельта (водовоздушного и воздушного) и режимными параметрами

процесса – критериями Рейнольдса, Вебера для каждого ряда в виде:

$$\left(\frac{Nu}{Nu_{воз}} \right) = (1 + C_i^* \cdot Re^{1,19} \cdot We^{1,13}); \quad (6)$$

$$C_1^* = 371,05; C_2^* = 671,75; C_3^* = 170,20.$$

Результаты обработки экспериментальных данных с помощью формулы (6) можно видеть на рис. 6.

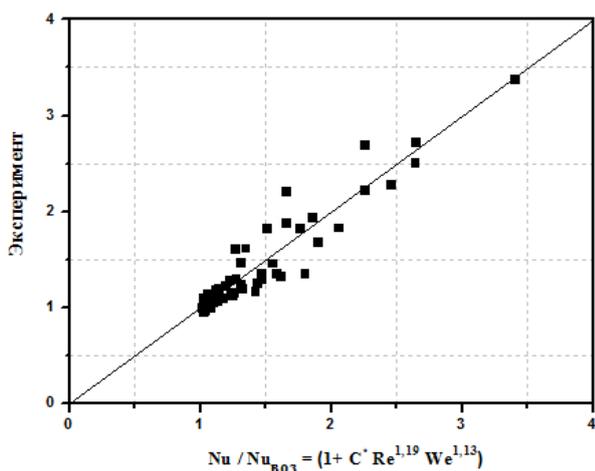


Рис. 6 – Результаты аппроксимации экспериментальных данных по теплообмену пучка цилиндров из 3-х рядов с водовоздушным потоком (шахматная компоновка)
Fig. 6 – The approximation results of the experimental data on heat transfer of bundle of cylinders from 3 rows with air-water mist flow (staggered arrangement)

Значения среднеквадратичной погрешности аппроксимации экспериментальных данных по теплообмену цилиндров не превышают 10 % в диапазоне $2,5 \cdot 10^3 \leq Re < 12,5 \cdot 10^3$ и $20,48 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч} \leq j \leq 97,85 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$.

3. Физическая модель процесса и параметры осаждения капель

Как уже отмечалось, характерной особенностью теплообмена трубных пучков в потоке воздуха является монотонное возрастание КТО, начиная с 1-го ряда, и стабилизация его значений к 3-му ряду.

В случае присутствия в потоке аэрозольных частиц, движущихся со скоростью несущего потока воздуха, общая картина обтекания цилиндрических элементов, естественно, сохраняется, но сопровождается торможением и осаждением частиц на обтекаемых поверхностях. Примерная картина траектории частиц и их осаждения с учетом снижения их концентрации в кормовой зоне и на поверхности по мере обтекания последующих элементов иллюстрируется физической моделью, приведенной на рис. 7а.

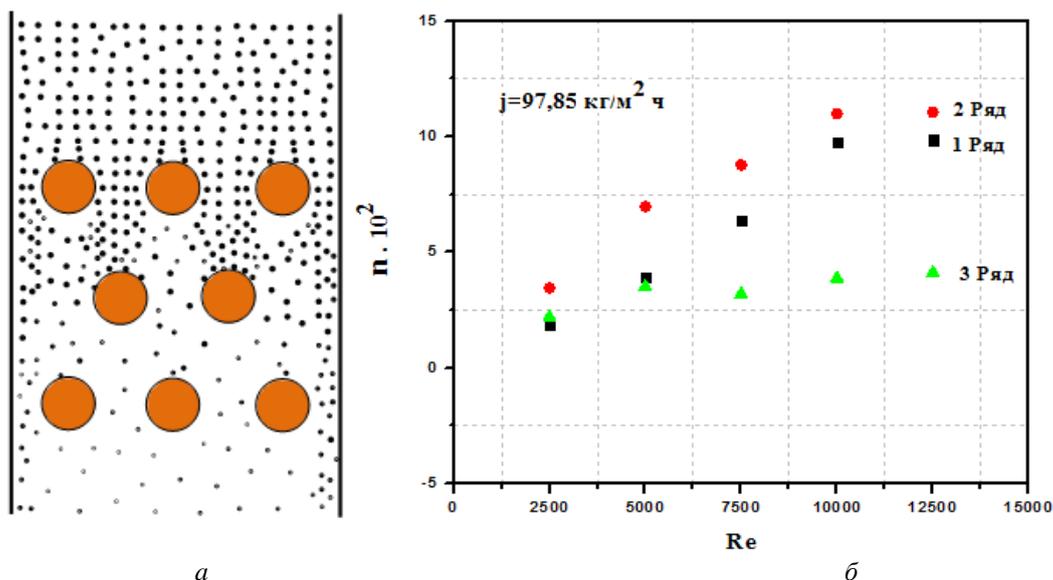


Рис. 7 – Физическая модель: а – модель осаждения аэрозольных частиц на поверхность цилиндров; б – численное значение относительного количества капельной влаги, оседающей на 1, 2 и 3-м ряду в зависимости от числа Re потока ($j = 97,85 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$)

Fig. 7 – Physical model: "a" – model for the deposition of aerosol particles on the surface of cylinders; "б" – the numerical value of the relative amount of droplet moisture deposited on the 1st, 2nd 3rd rows depending on the Re number of the flow ($j = 97.85 \text{ kg / m}^2 \cdot \text{h}$)

Осаждение неиспаряющихся частиц на поверхность в общем случае определяется числом Стокса Stk и Re потока [14, 15]. Для частиц размером 2,7 мкм параметр эффективности осаждения (доля оседающих частиц) составляет $\eta = 0,26 \sim 0,45$ в диапазоне $Re = 2,5 \cdot 10^3 \sim 12,5 \cdot 10^3$. Частично осаждаясь на цилиндрическую поверхность 1-го ряда, остальные частицы движутся вместе с потоком в виде плоских струй, которые попадают на поверхность 2-го ряда, где концентрация оседающих частиц оказывается выше,

чем на поверхностях 1-го и 3-го рядов вследствие шахматного расположения элементов

С учетом испарения аэрозольных частиц на поверхности 1-го и 2-го рядов, третий ряд цилиндров оказывается в зоне с минимальной концентрацией частиц, то есть практически в однофазном паровоздушном потоке.

Для того чтобы оценить количество влаги, оседающей на поверхности цилиндров по отношению к первоначальному на входе в канал, можно восполь-

зываются уравнением теплового баланса с учетом подогрева аэрозольных капель до температуры поверхности цилиндров. В уравнении относительное количество капельной влаги n , оседающей на поверхности цилиндров из водовоздушного потока, определяется как конвективная, так и теплообменная составляющая общего теплового потока [12, 16].

$$q = \alpha_k \cdot (T_{\text{п}} - T_{\text{ср}}) \cdot (1 - n) + j [r + C_{\text{ж}} (T_{\text{п}} - T_{\text{ср}})] \cdot n; \quad (7)$$

$$q = \alpha \cdot (T_{\text{п}} - T_{\text{ср}}), \quad (8)$$

где α_k – конвективная составляющая общего коэффициента теплоотдачи α цилиндров с водовоздушным потоком.

При известных (экспериментальных) значениях КТО α_k и α , численные значения параметра осадения n_i определяются для цилиндров каждого ряда при условии, что капельная влага оседает и испаряется на верхней половине поверхности цилиндров:

$$n_i = \left[1 - \left(\frac{\alpha}{\alpha_k} \right)^{-1} \right] \frac{q_i}{0,5 jr \left[1 + \frac{C_{\text{ж}} (T_{\text{п}} - T_{\text{ср}})}{r} \right]}. \quad (9)$$

Следует отметить, что в формуле (9) не учитывался параметр n_i ($\alpha_k/\alpha \ll 1$ ввиду малости каждого из сомножителей).

На рис 7б нанесены значения относительного количества аэрозольной влаги, оседающей на поверхности цилиндров, в зависимости от Re потока при плотности орошения $j = 97,85 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$. Анализ полученных данных показал, что численные значения n_i определяются положением ряда цилиндрических элементов в канале и практически не зависят от плотности орошения. Наблюдаемые отклонения n_i от общей закономерности определяются погрешностями измерений параметров и допущениями при формулировке теплового баланса охлаждения цилиндров.

Можно предположить, что ряды из цилиндров в аэрозольном потоке создают своеобразный экранирующий эффект, связанный с уменьшением концентрации частиц непосредственно в вихревом следе за ними и увеличением их концентрации на периферии следа. Поэтому второй ряд цилиндров при шахматной упаковке оказывается в зоне с повышенной концентрацией частиц, в результате чего создается эффект немонотонного изменения КТО цилиндров в направлении течения потока. Элементы 3-го ряда оказываются практически в области паровоздушного потока с содержанием капельной влаги менее 2 % от первоначального на входе в канал с КТО, мало отличающимся от условий обдува потоком воздуха (рис. 7б).

Предложенная физическая модель в целом отражает особенности теплообмена трубных пучков при их шахматном расположении с водовоздушным по-

током и вместе с уравнением (6) может быть использована в расчетах аппаратов воздушного охлаждения с введением в поток водного аэрозоля.

4. Заключение

Проведенное исследование показало возможности значительной интенсификации (повышения эффективности теплообменников) модели сухих градирен при микрокапельном увлажнении основного воздушного потока.

Поскольку расход подаваемой воды крайне мал, возможно создание пневмо-гидроаккумулирующих систем для интенсификация теплоотвода в градирнях даже при отсутствии электроснабжения собственных нужд АЭС.

Теплообмен цилиндрических элементов (пучки труб) в прямоугольном канале с водовоздушным аэрозольным потоком характеризуется значительной неравномерностью в распределении КТО в направлении течения потока. Максимальные значения КТО соответствуют 2-му ряду шахматного пучка и превышают в 1,5÷3,5 раза значения КТО с воздушным потоком. Минимальные значения КТО приходятся на 3-й ряд элементов, находящихся в паровоздушной среде испарившихся капель.

Для эффективной работы аппаратов с трубными пучками и водовоздушной аэрозольной системы охлаждения потребуется установка системы впрыска водного аэрозоля через каждые 3÷4 ряда в направлении течения воздушного потока.

Список литературы

- [1] Chen, G. The efficiency of high-level water collecting cooling tower with the installation of cross wall affect by the evolution of aerodynamic field / G. Chen [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2019. – Vol. 161. – P. 114181.
- [2] Cortinovi, G.F. A systemic approach for optimal cooling tower operation / G.F. Cortinovi [et al.] // Energy Convers. Manage. – 2009. – Vol. 50. – P. 2200–2209.
- [3] Sturman, A. Predicting the frequency of occurrence of visible water vapour plumes at proposed industrial sites / A. Sturman, P. Zawar-Reza // Atmospheric Environment. – 2011. – Vol. 45. – Iss. 12. – P. 2103–2109.
- [4] Мильман, О.О. Воздушно-конденсационные установки / О.О. Мильман, В.А. Федоров. – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 208 с.
- [5] Болдырев, В.М. Похоже, альтернатив для сухих градирен нет / В.М. Болдырев // Росэнергоатом РЭА. – 2008. – № 6. – С. 6–9.
- [6] Еперин, А.П. О проблеме охлаждения технической воды атомных электрических станций / А.П. Еперин // Биосфера. – 2011. – Т. 3. – № 1. – С. 38–40.
- [7] Мильман О.О., Ананьев П.А. Сухие градирни и воздушно-конденсационные установки: (обзор) / О.О. Мильман, П.А. Ананьев // Теплоэнергетика. – 2016. – № 3. – С. 3–14.



[8] Kong, Y.Q. Wind leading to improve cooling performance of natural draft air-cooled condenser / Y.Q. Kong [et al.] // *Appl. Therm. Eng.* – 2018. – Vol. 136. – P. 63–83.

[9] Conradie, A. Performance evaluation of dry-cooling systems for power plant applications / A. Conradie, D. Kröger // *Applied Thermal Engineering*. – 1996. – Vol. 16. – Iss. 3. – P. 219–232.

[10] Wei, H.M. Entransy dissipation based optimization of a large-scale dry cooling system / H.M. Wei [et al.] // *Appl. Therm. Eng.* – 2017. – Vol. 125. – P. 254–265.

[11] Ma, H. Effects of ambient temperature and crosswind on thermo-flow performance of the tower under energy balance of the indirect dry cooling system / H. Ma [et al.] // *Appl. Therm. Eng.* – 2015. – Vol.78. – P. 90–100.

[12] Abed, A.H. Experimental investigation of hydrodynamics and heat transfer of sphere cooling using air/water mist two phase flow / A.H. Abed, S.E. Scheklein, V.M. Pakhaluev // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 552. – P. 012001.

[13] Жукаускас, А. Теплоотдача пучков труб в поперечном потоке жидкости / А. Жукаускас. – Монография. Вильнюс: Минтис, 1968. – 191 с.

[14] Домбровский, Л.А. Инерционное осаждение частиц из газодисперсного потока в окрестности точки торможения / Л.А. Домбровский // *ТВТ*. – 1986. – Т. 24. – Вып. 3. – С. 558–563.

[15] Моренко, В. Влияние турбулентности потока вязкой жидкости на гидродинамические характеристики и теплообмен обтекаемых тел / В. Моренко, В.Л. Федяев // *Проблемы энергетики*. – 2010. – № 7–8. – С. 558–563.

[16] Абед А.Х., Щеклеин С.Е., Пахалуев В.М. Интенсификация теплообмена воздушных теплообменников аварийного расхолаживания и сухих градирен АЭС с использованием водовоздушного аэрозоля (тумана) / А.Х. Абед, С.Е. Щеклеин, В.М. Пахалуев // *Известия вузов Ядерная энергетика*. – 2019. – Т. 3. – С. 16–27.

References

[1] Chen G., Zhao Y., Li W., Ge W. The efficiency of high-level water collecting cooling tower with the installation of cross wall affect by the evolution of aerodynamic field. *Applied Thermal Engineering*, 2019;161:114181 (in Eng.).

[2] Cortinovis G.F., Paiva J.L., Song T.W., Pinto J.M., A systemic approach for optimal cooling tower operation. *Energy Convers. Manage*, 2009;50:2200–2209 (in Eng.).

[3] Sturman A., Zawar-Reza P. Predicting the frequency of occurrence of visible water vapour plumes at proposed industrial sites. *Atmospheric Environment*, 2011;45(12):2103–2109 (in Eng.).

[4] Milman O.O., Fedorov V.A. Air condensing units (Vozdushno-kondensatsionnye ustanovki). Moscow: Publishing House MPEI, 2002; p. 208 (in Russ.).

[5] Boldyrev V.M. It seems that there are no alternatives for dry cooling towers (Pokhozhe, al'ternativ dlya sukhikh gradiren net). *Rosenergoatom REA*, 2008;(6):6–9 (in Russ.).

[6] Eperin A.P. About the problem of cooling industrial water of nuclear power plants (O probleme okhlazhdeniya tekhnicheskoi vody atomnykh elektricheskikh stantsii). *Biosphere*, 2011;3(1):38–40 (in Russ.).

[7] Milman O.O., Ananiev P.A. Dry cooling towers and air-condensing units: (review) (Sukhie gradirni i vozdushno-kondensatsionnye ustanovki: (obzor). *Thermal Engineering*, 2016;(3):3–14 (in Russ.).

[8] Kong Y.Q., Wang W.J., Huang X.W., Yang L.J., Du X.Z., Yang Y.P. Wind leading to improve cooling performance of natural draft air-cooled condenser. *Appl. Therm. Eng.*, 2018;136:63–83 (in Eng.).

[9] Conradie A., Kröger D. Performance evaluation of dry-cooling systems for power plant applications. *Applied Thermal Engineering*, 1996;16(3):219–232 (in Eng.).

[10] Wei H.M., Du X.Z., Yang L.J., Yang Y.P. Entransy dissipation based optimization of a large-scale dry cooling system. *Appl. Therm. Eng.*, 2017;125:254–265 (in Eng.).

[11] Ma H., Si F.Q., Li L., Yan W.S., Zhu K.P. Effects of ambient temperature and crosswind on thermo-flow performance of the tower under energy balance of the indirect dry cooling system. *Appl. Therm. Eng.*, 2015;78:90–100 (in Eng.).

[12] Abed A. H., Scheklein S.E., Pakhaluev V.M. Experimental investigation of hydrodynamics and heat transfer of sphere cooling using air/water mist two phase flow. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019;552:012001 (In Eng.).

[13] Zhukauskas A. Heat transfer of tube bundles in a transverse fluid flow (Teplootdacha puchkov trub v poperechnom potoke zhidkosti). Monograph. Vilnius: Min-tis, 1968; p. 191 (in Russ.).

[14] Dombrovsky L.A. Inertial deposition of particles from a gas-dispersed stream in the vicinity of the stagnation point (Inertsionnoe osazhdenie chastits iz gazodispersnogo potoka v okrestnosti tochki tormozheniya). *TVT*, 1986;24(3):558–563 (in Russ.).

[15] Morenko V., Fedyayev V.L. The effect of turbulence of a viscous fluid flow on the hydrodynamic characteristics and heat transfer of streamlined bodies (Vliyanie turbulentnosti potoka вязкой жидкости на гидродинамические характеристики i teploobmen obtekaemykh tel). *Problems of Energy*, 2010;(7–8):36–45 (in Russ.).

[16] Abed A.H., Scheklein S.E., Pakhaluev V.M. Heat transfer intensification in emergency cooling heat exchanger and dry cooling towers on nuclear power plant using air-water mist flow (Intensifikatsiya teploobmena vozdushnykh teploobmennikov avariinogo rashkolazhivaniya i sukhikh gradiren aes s ispol'zovaniem vodovozdushnogo aerezolya (tumana)). *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*, 2019;3:16–27 (in Russ.).

Транслитерация по BSI

