

экономики на основе разработок: сборник статей VII Международной научно-технической конференции «Минские научные чтения-2024», в 3-х томах. Минск, 3-5 декабря 2024 г. [Электронный ресурс]. –Минск: БГТУ, 2024 – Т. 2. – с. 229-233.

УДК 536.25

**Д.В. Островская, Г.С. Маршалова**

Белорусский государственный технологический университет  
Минск, Беларусь

**ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНУЮ ТЕПЛООТДАЧУ ОДНОРЯДНОГО ПУЧКА АППАРАТА ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ С ВЫТЯЖНОЙ ШАХТОЙ**

*Аннотация.* В работе представлены результаты экспериментальное исследование влияния внешнего загрязнения на теплоотдачу однорядного пучка, состоящего из биметаллических труб со спирально накатными ребрами. При проведении экспериментальных исследований над пучком устанавливалась вытяжная шахта с регулируемым проходным сечением.

**D.V. Ostrovskay, G.S. Marshalova**

BSTU  
Minsk, Belarus

**INFLUENCE OF EXTERNAL FOULING ON FREE-CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN A SINGLE-ROW BUNDLE OF AN AIR-COOLING APPARATUS WITH AN EXHAUST SHAFT**

*Abstract.* The article presents an experimental study of the influence of external contamination on the heat transfer of a single-row bundle consisting of bimetallic tubes with spirally rolled fins. During the experimental studies, an exhaust shaft with an adjustable flow section was installed above the bundle.

Аппараты воздушного охлаждения (АВО) широко применяются в таких отраслях промышленности как химическая, нефтехимическая, газовая, целлюлозно-бумажная, в тепло- и электроэнергетике. Данные аппараты используются для охлаждения технологических продуктов, охлаждения и конденсации парогазовых смесей, для нагрева воздуха, а также утилизации тепла отходящих продуктов сгорания природного газа или других газообразных сред. Обширной областью применения

АВО также является необходимость охлаждения, транспортируемого на большие расстояния газа.

АВО, используемые в промышленности, в основном функционируют в режиме вынужденной конвекции, вследствие чего для их работы расходуется значительное количество электроэнергии. Это свидетельствует о том, что эффективность их эксплуатации напрямую зависит от количества потребляемой электрической энергии на привод вентиляторов.

Достичь экономии топливно-энергетических ресурсов возможно переходом при определенных условиях окружающей среды в режимы свободной конвекции воздуха и ее интенсификации при помощи установки вытяжной шахты над поверхностью теплообмена [1].

В связи с размещением АВО на открытом воздухе, одной из ключевых проблем их эксплуатации, является возникновение загрязнения на внешней поверхности оребрения труб. Структура загрязнителей на поверхности оребрения полидисперсна и зависит от географической местности эксплуатации АВО. Возможны загрязнения в виде заноса сухой землей, песком, гравием, смеси сухих листьев и травы, иголками сосновых и хвойных деревьев, цветочной пыльцой, также возможны загрязнения в виде отложений солей, возникающих вследствие осаждения и испарения влаги с теплообменных поверхностей [2, 3, 4]. Но в большинстве случаев загрязнение представляет различное сочетание отдельных чистых компонентов.

Это приводит к снижению эффективности теплоотдачи на поверхности охлаждения с воздушной стороны по ряду причин: отложение слоя загрязнения, имеющего высокое термическое сопротивление; снижение скорости воздуха, а иногда даже прекращение его поступления в те или иные каналы из-за их полной закупорки; изменение характера течения потока по каналам поверхности охлаждения из-за местных (локальных) отложений загрязнителя [5]. Это обуславливает актуальность изучения влияния внешнего загрязнения на интенсивность свободно-конвективного теплообмена оребренных пучков АВО.

Цель работы – экспериментальное исследование влияния внешнего загрязнения оребренных труб на свободно-конвективную теплоотдачу однорядного пучка аппарата воздушного охлаждения, оснащенного вытяжной шахтой.

При проведении экспериментальных исследований использовался однорядный пучок, собранный из шести биметаллических труб со спиральными накатными ребрами. Материал ребристой оболочки – алюминиевый сплав АД1М, материал несущей

трубы – углеродистая сталь. Геометрические параметры оребренных труб: наружный диаметр  $d = 56,8$  мм; диаметр трубы по основанию  $d_0 = 26,4$  мм; высота ребра  $h = 15,2$  мм; шаг ребра  $s = 2,43$  мм; средняя толщина ребра  $\Delta = 0,55$  мм; длина трубы  $l_{\text{п}} = 330$  мм (теплоотдающая длина  $l = 300$  мм), коэффициент оребрения трубы  $\phi = 21,0$ .

Внешнее загрязнение межреберного пространства труб было создано путем равномерного плотного кольцевого наматывания льняного шнура со средней теплопроводностью  $\lambda_3 = 0,0243$  Вт/(м·°C). В результате был образован слой загрязнения средней толщиной  $\delta_3 = 2,0$ ; 3,4 и 6,8 мм с неравномерностью  $\pm 0,4$  мм.

Экспериментальное исследование проводились методом полного теплового моделирования на экспериментальной установке, представленной в работе [1]. Подвод теплового потока к оребренным поверхностям обеспечивался за счет установки внутри оребренных труб трубчатых электронагревателей (ТЭНов). Мощность, подводимая к оребренным трубам, измерялась ваттметром. Для снижения торцевых потерь на концах труб устанавливались фторопластовые втулки.

В ходе экспериментов электрическая мощность, подводимая к оребренным трубам, изменялась в пределах  $W = 10\text{--}320$  Вт, средняя температура стенки у основания ребер составляла  $t_{\text{ст}} = 20\text{--}120^\circ\text{C}$ , а температура окружающего воздуха в камере  $t_0 = 16\text{--}27^\circ\text{C}$ .

С целью изучения влияния внешнего загрязнения на теплоотдачу однорядного пучка, были проведены экспериментальные исследования в режиме свободной конвекции воздуха и при ее интенсификации при помощи вытяжной шахты.

Для интенсификации свободно-конвективного теплообмена над однорядным пучком устанавливалась вытяжная шахта высотой  $H = 0,52; 1,04; 1,72$  и  $2,24$  м с площадью выходного отверстия  $f_{\text{отв}} = 0,086$  м<sup>2</sup>.

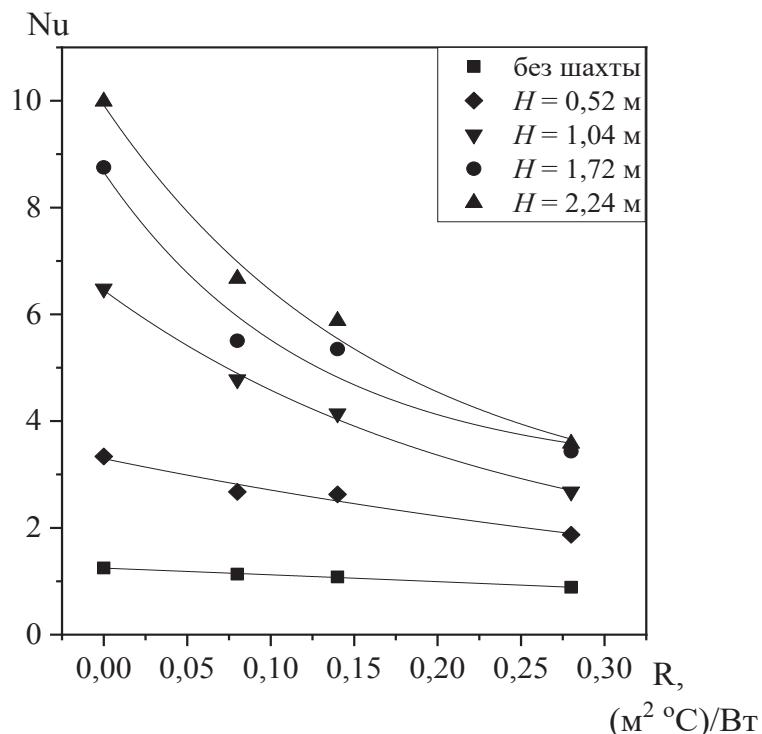
Для анализа влияния внешнего загрязнения на теплоотдачу однорядного пучка с внешним кольцевым межреберным загрязнением в режимах свободной конвекции воздуха и при ее интенсификации при помощи вытяжной шахты различной высоты, на рисунке 1 представлены экспериментальные зависимости числа Нуссельта Nu от термического сопротивления внешнего слоя загрязнения  $R_3$  (1) при постоянном числе  $Ra = 10^5$ , где

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_k d_0}{\lambda}, \quad (1)$$

(2)

$$Ra = Gr Pr = \frac{g \beta d_0^3 (t_{cr} - t_0)}{\nu a},$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°C);  
 $Gr$  – число Грасгофа;  
 $Pr$  – число Прандтля;  
 $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  
 $\beta = 1 / (273 + t_0)$  – коэффициент температурного расширения, К<sup>-1</sup>;  
 $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с;  
 $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с.



**Рис. 1- Зависимости числа Нуссельта Nu от термического сопротивления внешнего слоя загрязнения  $R_3$  в режимах свободной конвекции воздуха и при ее интенсификации при помощи вытяжной шахты различной высоты, при постоянном числе Рэлея  $Ra = 10^5$**

**Выводы.** Проведены экспериментальные исследования теплоотдачи однорядного пучка оребренных труб с внешним межреберным загрязнением различной толщины в режимах свободной конвекции воздуха и при ее интенсификации при помощи вытяжной шахты. Анализ данных, представленных на рисунке 1, позволяет сделать вывод, что при увеличении внешнего слоя загрязнения  $\delta_3$ , а, следовательно, и термического сопротивления  $R_3$  интенсивность

теплоотдачи уменьшается на 5–41 % в зависимости от высоты вытяжной шахты по сравнению с теплоотдачей при свободной конвекции. Также наблюдается, что с ростом высоты вытяжной шахты негативный эффект от наличия внешнего загрязнения увеличивается.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Т23РНФМ-005), в рамках проекта Государственной программы научных исследований «Энергетические и ядерные процессы и технологии» подпрограммы «Энергетические процессы и технологии» (задание 2.37, ГБ 21-104), Гранта Министерства образования РБ (ГБ 25-031).

### **Список использованных источников**

1. Маршалова Г. С. Тепловой расчет и проектирование аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / Г. С. Маршалова. – Минск, 2019. – 153 л.
2. Камалетдинов И. М. Энергосбережение при эксплуатации аппаратов воздушного охлаждения на магистральных газопроводах. Автореферат канд. диссертации. Уфа, 2002.
3. Беркутов Р. А. Повышение энергоэффективности систем охлаждения газа на компрессорных станциях. Автореферат канд. диссертации. Уфа, 2010.
4. Кунтыш В.Б., Сухоцкий А.Б., Филатов С.О., Жданович А.Ю. Исследование теплопроводности внешних загрязнителей теплообменных секций аппаратов воздушного охлаждения // Химическая техника. – 2013. – № 11. – С. 40–43.
5. Жукаускас А. А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982.

УДК 658.8:628.4.047

**Д.М. Павловская, В.А. Усевич**  
Белорусский государственный технологический университет  
Минск, Беларусь

### **РОЛЬ УПАКОВКИ КАК КЛЮЧЕВОГО ФАКТОРА В ПАРАДИГМЕ «ЗЕЛЕНОГО» МАРКЕТИНГА**