

environmental entrepreneurship are the keys to a sustainable future and economic security. This is the only way technological progress can improve people's lives and promote economic growth.

## References

1. MJB Kabeyi. Sustainable Energy Transition for Renewable and Low Carbon Grid Electricity Generation and Supply: Industrial Engineering Department, Durban University of Technology, Durban, South Africa – URL: <https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2021.743114/full> (date of access: 24.03.2022)
2. C. O. Nwamekwe. Design Principles and Challenges in Achieving Zero-Energy Manufacturing Facilities / C. O. Nwamekwe, C. C. Okpala, E. C. Nwabunwanne – 1st ed. – 2025. – 22 pp.
3. J. Skea. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change / J. Skea, P. R Shukla, A. Reisinger, R. Slade. – 5th ed. – 2022. – 65 pp.
4. Владимир Сидорович. Мощности ВИЭ в мире вырастут на 2400 ГВт в период 2022-2027 гг. / Владимир Сидорович. - Международное энергетическое агентство (МЭА), 2022 – URL: <https://renen.ru/moshhnosti-vie-v-mire-vyrastut-na-2400-gvt-v-period2022-2027-gg/> (дата обращения 06.12.2022)

УДК 621.565.93/.95-0.46.54

**Е.С. Данильчик, А.Б. Сухоцкий, Г.С. Маршалова**

Белорусский государственный технологический университет  
Минск, Беларусь

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО ШАГА УСТАНОВКИ ТРУБ СО СПИРАЛЬНЫМИ РЕБРАМИ НА ТЕПЛОТДАЧУ ШАХМАТНЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПУЧКОВ ТРУБ В РЕЖИМЕ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА**

*Аннотация.* В работе представлены результаты экспериментального исследования теплоотдачи к воздуху в условиях свободной конвекции горизонтальных одно-, двух- и четырехрядных шахматных пучков равносторонней компоновки из оребренных труб теплообменников охлаждения. Коэффициент оребрения труб  $\varphi = 21$ , межтрубный шаг 90 и 120 мм.

**E.S. Danil'chik, A.B. Sukhotskii, G.S. Marshalova**  
Belarusian State Technological University  
Minsk, Belarus

**EXPERIMENTAL STUDIES OF THE EFFECT OF INTERTUBE  
TRANSVERSE PITCH OF SPIRAL-FINNED TUBE  
INSTALLATION ON THE HEAT TRANSFER OF  
STAGED HORIZONTAL TUBE BUNDLES IN  
FREE AIR CONVECTION MODE**

*Abstract.* The paper presents the results of an experimental study of heat transfer to air under free convection conditions in horizontal single-, double-, and four-row staggered bundles of equilaterally arranged finned tubes of cooling heat exchangers. The tube finning coefficient is  $\phi = 21$ , and the intertube pitch is 90 and 120 mm.

Теплообменники воздушного охлаждения (ТВО) широко применяются в промышленности для конденсации и охлаждения технологических сред, включая энергоносители и различные продукты производственных процессов.

В настоящее время ТВО чаще всего работают в режиме вынужденной конвекции, что обеспечивает высокий коэффициент теплопередачи и уменьшение габаритных размеров аппарата. Однако такой режим требует значительных затрат электроэнергии на привод вентиляторов, что увеличивает эксплуатационные расходы.

Одним из перспективных подходов к снижению энергопотребления является перевод ТВО в режим свободной конвекции. В котором при определенной температуре охлаждающего воздуха вентиляторы теплообменника могут быть частично или полностью отключены при обеспечении нормативной тепловой мощности аппарата [1]. Главным недостатком данных ТВО является малые коэффициенты теплопередачи и существенные габаритно-массовые характеристики. Поэтому для повышения эффективности процессов теплоотдачи целесообразно проводить оптимизацию геометрических параметров и компоновки пучка, а также числа рядов.

Целью работы является экспериментальное определение оптимального межтрубного шага горизонтальных одно-, двух- и четырехрядных шахматных пучков равносторонней компоновки из труб со спиральными ребрами (коэффициент оребрения  $\phi = 21$ ) в условиях свободной конвекции к воздуху.

Данная работа является продолжением экспериментальных исследований теплоотдачи горизонтальных шахматных пучков равносторонней компоновки в режиме свободной конвекции [2, 3], где пучки собирались с числом рядов  $z = 1, 2, 4$  при  $S_1 = 58; 61, 64$  и  $70$  мм (относительный шаг  $\sigma_1 = S_1 / d = 1,021; 1,09; 1,13; 1,23$ ). Геометрические параметры биметаллических оребренных труб следующие:  $d \times h \times s \times \Delta \times d_0 \times l = 0,0568 \times 0,0152 \times 0,00243 \times 0,00055 \times 0,0264 \times 0,3$  м,  $\varphi = 21$  (материал ребристой оболочки – алюминиевый сплав АД1М, материал несущей трубы – сталь).

В данной работе на том же измерительном оборудовании и по той же методике [3] представлены экспериментальные исследования шахматных горизонтальных пучков из аналогичных биметаллических труб ( $\varphi = 21$ ) с поперечными шагами  $S_1 = 90$  и  $120$  мм ( $\sigma_1 = 1,58$  и  $2,11$ ). Результаты экспериментальных исследований теплоотдачи в различных тепловых режимах обрабатывались и представлялись в виде зависимостей числа Нуссельта  $Nu$  от чисел Релея  $Ra$ .

Во время экспериментального исследования средняя температура стенки у основания ребер составляла  $t_{ст} = 34–180$  °С. Относительная погрешность экспериментальных значений чисел подобия  $Nu$  и  $Ra$  соответственно составила 3,2 и 4,3%.

Для сравнительного анализа влияния поперечного шага установки труб на рис. 1 представлена зависимость  $Nu = f(S_1)$  при  $Ra = 50\ 000$  и  $150\ 000$  для однорядного, двухрядного и четырехрядного пучка. Пунктирной линией показано значение числа Нуссельта для одиночной оребренной трубы [2].

Как видно из рис. 1, при малых межтрубных шагах ( $S_1 = 58–64$  мм) число Нуссельта четырехрядного пучка ниже, чем у одиночной трубы и других пучков из-за его высокого аэродинамического сопротивления.

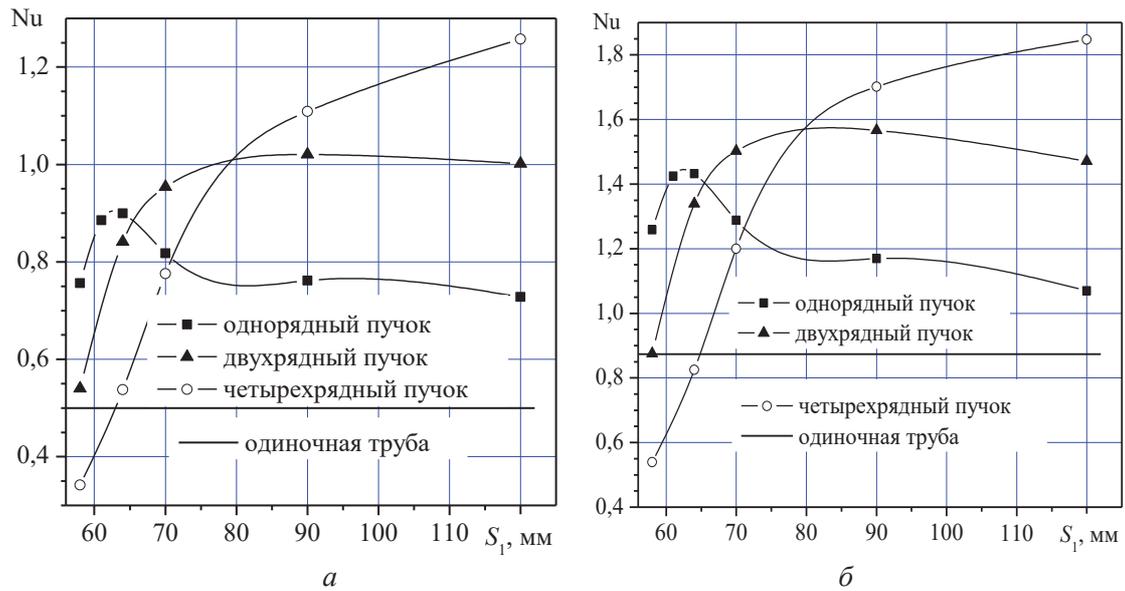


Рис. 1- Зависимости теплоотдачи однорядного, двухрядного и четырехрядного горизонтальных оребренных пучков от поперечного шага установки труб в режиме свободной конвекции воздуха при  $Ra = 50\,000$  а,  $Ra = 150\,000$  б

При увеличении межтрубного шага интенсивность теплоотдачи растет и достигает максимума при  $S_1 \approx 62\text{--}63$  мм (более чем в 1,6 раза по сравнению с одиночной трубой) для однорядного пучка и при  $S_1 \approx 83\text{--}88$  мм (более чем в 1,8 раза по сравнению с одиночной трубой) для двухрядного пучка. Это обусловлено, как ростом подъемной силы в пучке (эффект «вытяжной трубы»), так и турбулизацией потока воздуха первыми рядами. При дальнейшем увеличении межтрубных шагов теплоотдающие характеристики труб пучков снижаются и стремятся к характеристикам одиночной трубы. В пределах исследований межтрубных шагов, максимум интенсивности теплоотдачи для четырехрядных пучков не достигнут.

Работа выполнена в рамках проекта Государственной программы научных исследований «Энергетические и ядерные процессы и технологии» подпрограммы «Энергетические процессы и технологии» (задание 2.37, ГБ21-104) а также при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Т23РНФМ-005).

### Список использованных источников

1. Кунтыш В.Б., Сухоцкий А.Б., Самородов А.В. Инженерный метод теплового расчета аппарата воздушного охлаждения в режиме

свободно-конвективного теплообмена // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2013. № 12. С. 3–6.

2. 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 с.

3. Данильчик Е. С. Повышение эффективности теплообменников воздушного охлаждения при свободно-конвективном теплообмене. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / Е. С. Данильчик. – Минск, 2022. – 194 с.

УДК 658.567.1

**М.Е. Евдокимова**

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II  
Санкт-Петербург, Россия

## **ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТИТАНОВОГО ШЛАМА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОАГУЛЯНТА**

*Аннотация.* Утилизация отходов переработки руд цветных металлов является важным фактором устойчивого развития минерально-сырьевого комплекса. В исследовании рассматривается титановый шлам как сырье для производства коагулянта на основе титана. Экспериментально подтверждена эффективность титансодержащего коагулянта по снижению мутности сточных вод.

**M.E. Evdokimova**

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University  
St Petersburg, Russia

## **FEASIBILITY OF USING TITANIUM SLUDGE FOR COAGULANT PRODUCTION**

*Abstract.* The utilization of waste generated from processing non-ferrous metal ores is an important factor for the sustainable development of the mineral resource complex. This study examines titanium sludge as a raw material for the production of a titanium-based coagulant. The effectiveness of the titanium-containing coagulant in reducing the turbidity of wastewater has been experimentally confirmed.

Получение товарных продуктов посредством утилизации отходов переработки руд цветных металлов является ключевым условием обеспечения устойчивого развития объектов минерально-