

ISSN 1561-2430 (Print)  
 ISSN 2524-2415 (Online)  
 УДК 536.25  
<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2021-57-1-108-118>

Поступила в редакцию 14.01.2019  
 Received 14.01.2019

**Г. С. Маршалова, А. Б. Сухоцкий**

*Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь*

## **АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА И МЕТОДИКА РАСЧЕТА СКОРОСТИ ВОЗДУХА В ОДНО- И МНОГОРЯДНЫХ ОРЕБРЕННЫХ ПУЧКАХ С ВЫТЯЖНОЙ ШАХТОЙ**

**Аннотация.** Перспективным способом повышения энергетической эффективности эксплуатации воздухоохлаждаемых теплообменников является периодическое отключение вентиляторов при определенных температурах окружающего воздуха при постоянной тепловой мощности. Дополнительное оснащение данных теплообменных аппаратов устройствами, увеличивающими тягу (например, вытяжной шахтой), способствует интенсификации теплоотдачи за счет усиления свободного движения воздуха подъемными силами. При этом теплообменник переходит в режим смешанной конвекции. При проведении расчета воздухоохлаждаемых теплообменников с вытяжной шахтой необходимо наличие данных по аэродинамическому сопротивлению трубных пучков при малых числах Рейнольдса ( $Re < 1000$ ), которые позволят вычислить скорость течения воздуха в пучке. Однако в настоящее время исследования аэродинамического сопротивления при смешанной конвекции практически отсутствуют. Также существует необходимость учета влияния внешних воздушных потоков на гравитационную тягу, создаваемую шахтой, так как воздухоохлаждаемые теплообменники предназначены для работы вне помещений. По результатам проведенных экспериментальных исследований получено представление о массообменных процессах в оребренном пучке и вытяжной шахте, разработана методика расчета скорости воздуха в одно- и многорядных оребренных пучках с вытяжной шахтой и определено их аэродинамическое сопротивление при малых числах Рейнольдса. Также выявлено влияние внешних воздушных потоков на гравитационную тягу, создаваемую шахтой.

**Ключевые слова:** воздухоохлаждаемый теплообменник, смешанная конвекция, вытяжная шахта, гравитационное давление воздуха, аэродинамическое сопротивление, внешний воздушный поток

**Для цитирования.** Маршалова, Г. С. Аэродинамическое сопротивление при малых числах Рейнольдса и методика расчета скорости воздуха в одно- и многорядных оребренных пучках с вытяжной шахтой / Г. С. Маршалова, А. Б. Сухоцкий // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2021. – Т. 57, № 1. – С. 108–118. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2021-57-1-108-118>

**Galina S. Marshalova, Albert B. Sukhotskii**

*Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus*

## **AERODYNAMIC DRAG AT SMALL REYNOLDS NUMBERS AND THE METHOD OF CALCULATION OF THE AIR VELOCITY IN ONE- AND MANY-ROW FINNED BEAMS WITH AN EXHAUST SHAFT**

**Abstract.** The periodic switching of fans at certain ambient air temperatures and a constant power is a promising method to enhance the energy operating efficiency of air-cooled heat exchangers. Equipping these heat exchangers with devices increasing the propulsion (for example, an exhaust shaft) facilitates the intensification of heat transfer due to strengthening the free movement of air by lifting forces. Meanwhile, the heat exchanger is used at the mixed convection regime. To make the thermal design of air-cooled heat exchangers with an exhaust shaft, we must have data on the aerodynamic drag of tube beams at small Reynolds numbers ( $Re < 1000$ ) that permit to calculate the air flow velocity. However, at present, studies on the aerodynamic drag at mixed convection are virtually missing. Moreover, it is necessary to take into account the influence of external air flows on the gravitational pull created by the shaft since air-cooled heat exchangers are designed for outdoor use. Using the results of the experimental investigation, we obtained information about the mass-exchange processes in the finned beam and the exhaust shaft, developed a method for calculating the air velocity in one- and many-row finned beams with the exhaust shaft and determined their aerodynamic drag at small Reynolds numbers. We also established the influence of external air flows on the gravitational pull created by the shaft.

**Keywords:** air-cooled heat exchangers, mixed convection, gravitational air pressure, exhaust shaft, aerodynamic drag, external air flows

**For citation.** Marshalova G. S., Sukhotskii A. B. Aerodynamic drag at small Reynolds numbers and the method of calculation of the air velocity in one- and many-row finned beams with an exhaust shaft. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2021, vol. 57, no. 1, pp. 108–118 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2021-57-1-108-118>

**Введение.** В настоящее время применимость воздухоохлаждаемых теплообменников ввиду их экономичности и универсальности достаточно обширна. Они используются в нефтехимической, химической, газовой, целлюлозно-бумажной промышленности, энергетике и т. д. [1]. Опыт применения воздухоохлаждаемых теплообменников и технико-экономические расчеты показывают, что воздушное охлаждение снижает потребность в пресной охлаждающей воде, улучшает состояние окружающей среды, является более экономичным, при этом они удобны в эксплуатации, их очистка от загрязнений и ремонт не являются трудоемкими, а коррозия и загрязнения наружной поверхности практически отсутствуют [2].

Перспективным направлением повышения экономичности эксплуатации воздухоохлаждаемых теплообменников является периодическое выключение вентиляторов при достаточно низких температурах воздуха, т. е. применение естественной тяги воздуха через теплообменные секции вместо вынужденной. В работах [3, 4] отмечается, что при расчетной температуре воздуха и отключенных вентиляторах обеспечивается до 20–30 % номинальной тепловой нагрузки аппарата, а при температурах ниже  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  обеспечивается полная номинальная нагрузка<sup>1</sup>. При оснащении воздушных теплообменников дополнительными устройствами, усиливающими тягу, их теплопроизводительность может быть сохранена и при более высоких температурах окружающего воздуха без потребления электроэнергии приводом вентилятора [5]. Одним из таких устройств является устанавливаемая над теплообменным пучком вытяжная шахта, которая способствует интенсификации теплообмена за счет дополнительного усиления свободного движения воздуха подъемными силами. При этом вклад в теплоотдачу свободной и вынужденной конвекции сопоставим. Такой режим теплоотдачи называется смешанной конвекцией [6]. Техническая реализация смешанной конвекции не требует значительных материальных затрат, а получаемый теплоперенос в несколько раз выше, чем при свободной конвекции, что делает возможным значительную экономию энергоресурсов [7–10].

В работах [11, 12] на основе проведенных экспериментальных исследований смешанно-конвективного теплообмена в пучках с вытяжной шахтой получены зависимости для расчета числа Нуссельта от числа Рейнольдса  $Nu = f(Re)$ , которое пропорционально скорости воздуха в сжатом сечении пучка. Сложность применения данной формулы заключается в определении значения этой скорости, которое необходимо рассчитать из условия аэродинамического баланса движения потока воздуха в шахте:

$$\Delta p^{\text{гп}} = \Delta p^{\text{соп}}, \quad (1)$$

где  $\Delta p^{\text{гп}}$  – общее гравитационное давление воздуха в пучке и вытяжной шахте, Па;  $\Delta p^{\text{соп}}$  – общее аэродинамическое сопротивление пучка и вытяжной шахты, Па.

Для расчета  $\Delta p^{\text{соп}}$  необходимо значение аэродинамического сопротивления пучка, исследования которого при малых числах Рейнольдса ( $Re < 1000$ ) практически отсутствуют. Известна работа [13], в которой изучалось сопротивление поперечно-омываемых труб при малых числах Рейнольдса для коридорного с  $S_1/d = 1,47$  и  $1,5$  и шахматного гладкотрубных пучков с  $S_1/d = 1,3$  и  $1,5$  при  $Re = 50\text{--}9000$  и  $Gr = (6,5\text{--}22) \cdot 10^4$ . В работе [14] изложены результаты экспериментального исследования сопротивления восьми поперечно-омываемых потоком воздуха гладких пучков труб в области чисел Рейнольдса  $1000\text{--}10\ 000$ . В монографии [15] изучались пуч-

<sup>1</sup> Аппарат воздушного охлаждения: пат. 9446 Респ. Беларусь, МПК 7 F 24 F 3/00, F 28 D 1/00 / В. Б. Кунтыш, А. Б. Сухоцкий, А. Ш. Миннигалеев, В. П. Мулин; заявитель Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет». № и 20130091, заявл. 31.01.2013; опубл. 30.08.2013 // Афіц. бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2013. № 9. С. 70.

ки со спиральным оребрением. Авторами была получена формула для практических расчетов гидравлического сопротивления одного глубинного ряда шахматных пучков оребренных труб при  $Re = 100–1000$ ,  $\varphi = 1,5–16$ ,  $\sigma_1 = 1,13–2$ ,  $\sigma_2 = 1,06–2$ . Детальные исследования шахматных пучков со спиральным оребрением проведены в статье [16] при  $Re = 100–1000$ , коэффициенте оребрения  $\varphi = 1,5–16$ . В исследовании [17] авторами получена критериальная аэродинамическая зависимость для систем воздушно-водяного охлаждения с аппаратом воздушного охлаждения, который оборудован устройством, обеспечивающим движение охлаждающего воздуха, при  $Re = 1500–2000$ . В [18] получена формула для расчета сопротивления при  $Re = 5–121$  для шахматного пакета оребренных труб при  $\varphi = 9,12$ ,  $S_1/S_2 = 1,16$ .

Более того, в работе [19] было замечено влияние внешних воздушных потоков на аэродинамическое сопротивление пучка оребренных труб в аппаратах воздушного охлаждения при отключенных вентиляторах. Поэтому для разработки корректной методики определения скорости воздуха в одно- и многорядных оребренных пучках с вытяжной шахтой также возникла необходимость исследования влияния внешних воздушных потоков на аэродинамическое сопротивление при малых числах Рейнольдса.

Таким образом, анализ литературных источников выявил, что экспериментальные исследования аэродинамического сопротивления пучков при малых числах Рейнольдса проводились в основном на гладкотрубных пучках, а существующие немногочисленные работы по изучению сопротивления оребренных пучков не позволили разработать методику расчета аэродинамического сопротивления при теплообмене в режиме смешанной конвекции. Также, ввиду установленного влияния внешних воздушных потоков на аэродинамическое сопротивление воздухоохлаждаемых теплообменников, существует необходимость изучения их влияния на аэродинамическое сопротивление одно- и многорядных пучков с вытяжной шахтой, работающих в диапазоне малых чисел Рейнольдса.

Цель настоящей работы состоит в определении аэродинамического сопротивления при малых числах Рейнольдса ( $Re < 1000$ ) и разработке методики расчета скорости воздуха в одно- и многорядных оребренных пучках с вытяжной шахтой с учетом влияния внешних воздушных потоков.

**Методы исследования.** Для определения аэродинамического сопротивления и разработки методики расчета скорости воздуха исследовались одно-, двух-, трех- и четырехрядные шахматные равносторонние пучки, состоящие из горизонтально расположенных труб со спирально-накатными алюминиевыми ребрами с поперечным шагом  $S_1 = 58$  мм, которому соответствует относительный шаг  $\sigma_1 = S_1/d = 1,036$ , и продольным шагом  $S_2 = 50,2$  мм, которому соответствует относительный шаг  $\sigma_2 = S_2/d = 0,896$ . Трубы установлены между фанерными досками толщиной 4 мм, а их торцы для снижения тепловых потерь защищены фторопластовыми втулками.

Геометрические размеры исследуемой биметаллической оребренной трубы следующие, мм: наружный диаметр ребра  $d = 56$ ; диаметр трубы по основанию ребра  $d_0 = 26$ ; высота, шаг, средняя толщина ребра соответственно  $h = 15$ ;  $s = 2,5$ ;  $\Delta = 0,5$ ; длина оребренной части трубы  $l = 300$ . Коэффициент оребрения трубы  $\varphi = 21$ .

Для организации смешанно-конвективной теплоотдачи в потоке нагретого воздуха теплом, отводимым от трубного пучка, над экспериментальным пучком устанавливались два типа вытяжных шахт – с регулируемой высотой и регулируемым проходным сечением.

Первым типом являлась шахта с прямоугольным основанием, переходящим через конфузор в цилиндрическую трубу диаметром 0,105 м, регулируемой высотой:  $H = 0,52; 1,16; 1,48; 2,10$  м. Для снижения тепловых потерь шахта снаружи покрыта слоем минерального волокна толщиной 0,02–0,03 м.

Вторым типом являлась шахта с регулируемым проходным сечением, которая представляет собой параллелепипед из фанеры толщиной 0,004 м с прямоугольным внутренним основанием  $0,383 \times 0,313$  м, высотой 0,52 м. Снаружи для снижения тепловых потерь шахта покрыта слоем пенополиуретана толщиной 0,028 м и слоем минерального волокна толщиной 0,005 м. В выходном сечении шахты устанавливались крышки площадью  $f_{кр} = 0,125$  м<sup>2</sup> с круглым отверстием различного диаметра:  $d_{отв} = 0,09, 0,105, 0,137; 0,160; 0,187; 0,205$  м, которые изготавливались из фанеры

толщиной 0,01–0,015 м, а для снижения теплотерь покрывались слоем минерального волокна толщиной 0,004 м.

Экспериментальные исследования проводились методом полного теплового моделирования с обогревом всех оребренных труб пучка с помощью вставных теплоэлектронагревателей. Центральная труба в пучке являлась калориметром, т. е. содержала все необходимые для проведения измерений датчики. Схема экспериментальной установки, конструкция трубы-калориметра и ее оснащение температурными датчиками, аппаратное оформление установки измерительными приборами, методика исследования и порядок проведения экспериментов изложены в [20]. Оценка погрешности применяемой методики проведения эксперимента представлена в работе [21]. Во время проведения опытов температура поверхности трубы-калориметра у основания ребер (среднеарифметическая температура по показаниям термопар) изменялась в интервале  $t_{ст} = 30–165\text{ }^\circ\text{C}$ , температура окружающего воздуха в камере составляла  $t_0 = 17–26\text{ }^\circ\text{C}$ , подводимая к калориметру электрическая мощность  $W = 7–250\text{ Вт}$ .

**Результаты и их обсуждение.** В результате проведения серии экспериментов была установлена следующая картина структуры течения потока воздуха над теплообменным пучком с установленной вытяжной шахтой. При нагреве труб пучка внутри вытяжной шахты образуется столб воздуха с низкой плотностью, который под действием гравитационных сил пытается улетучиться из шахты. При этом над выходным отверстием шахты образуется область нагретого воздуха, которая увеличивает общее гравитационное давление воздуха. Высота данной области  $h_d$ , м, определяется кинетической энергией потока на выходе из шахты и условиями воздействия окружающей среды на эту область:

$$h_d = \psi w_{отв}^2 / (2g), \tag{2}$$

где  $\psi$  – коэффициент образования области нагретого воздуха над шахтой;  $w_{отв}$  – скорость потока воздуха на выходе из шахты, м/с,  $g$  – ускорение свободного падения, м<sup>2</sup>/с.

Высота области нагретого воздуха определяется экспериментально с помощью медь-константановой термопары как разность вертикальных координат:

$$h_d = z - z_0, \tag{3}$$

где  $z_0$  – координата сечения на выходе из отверстия, м;  $z$  – координата, в которой показания термопары были равны  $t = 0,5 (t_0 + t_{ш})$ , °C;  $t_{ш}$  – температура воздуха на выходе из шахты, °C.

Коэффициент образования  $\psi$  области нагретого воздуха над шахтой зависит от внешних воздушных потоков и от размера горизонтальной площадки вокруг выходного отверстия шахты. Для исследуемой системы пучок – вытяжная шахта в отсутствие внешних воздушных потоков на основе экспериментальных данных получено следующее уравнение:

$$\psi = 3,74 - 2,44 \cdot \chi_{кр}, \tag{4}$$

где  $\chi_{кр} = f_{отв}/f_{кр}$  – пропускной коэффициент крышки, где  $f_{отв} = \pi \cdot d_{отв}^2/4$  – площадь отверстия в крышке, м<sup>2</sup>. Для проведенных экспериментов  $\chi_{кр} = 0,069–1,0$ , для шахты с регулируемой высотой  $\chi_{кр} = 1,0$  и  $\phi = 1,3$ .

Также в процессе хода эксперимента обнаружена обратная тяга окружающего воздуха в вытяжную шахту по краям отверстия крышки, которая особенно ярко проявлялась на отверстиях диаметром более 0,20 м и, по-видимому, обусловлена давлением столба холодного воздуха над крышкой и образованием вакуумметрической области над теплообменным пучком из-за его аэродинамического сопротивления. Всасывание окружающего воздуха через отверстие приводит к уменьшению действительного проходного сечения и существенному росту аэродинамического сопротивления движению потока нагретого воздуха.

Потери на сжатие и расширение потока в отверстии  $E_{у_{сж}} + E_{у_{рас}}$  определяются соотношением площади отверстия к площади фронтального сечения пучка  $\chi_{отв} = f_{отв}/f_{фр}$ , где  $f_{фр} = S_1 \cdot n \cdot l$  – площадь фронтального сечения пучка, м<sup>2</sup>. Для проведенных экспериментов  $\chi_{отв}$  изменяется от 0,07 до 0,32.

Получены выражения для расчета числа подобия Эйлера, связанного с завихрениями потока для отверстия:

$$Eu_{зав} = Eu_{сж} + Eu_{рас} = 6,34 \chi_{отв} + 0,56, \quad (5)$$

для конфузора:

$$Eu_{зав} = Eu_{сж} + Eu_{рас} = 0,7. \quad (6)$$

Таким образом, при установке вытяжной шахты над пучком общее гравитационное давление воздуха  $\Delta p^{гп}$  в пучке и шахте равно их общему аэродинамическому сопротивлению  $\Delta p^{соп}$ :

$$\Delta p_{п}^{гп} + \Delta p_{ш}^{гп} = \Delta p_{п}^{соп} + \Delta p_{ш}^{соп}, \quad (7)$$

$$\Delta p_{ш}^{гп} = (H + h_{д})g(\rho_0 - \rho_{ш}), \quad \Delta p_{п}^{гп} = d g(\rho_0 - \rho_{п}),$$

$$\Delta p_{ш}^{соп} = Eu_{ш} \rho_{ш} w_{отв}^2, \quad \Delta p_{п}^{соп} = Eu_{п} \rho_{п} w_{п}^2,$$

где  $\Delta p_{п}^{гп}$ ,  $\Delta p_{ш}^{гп}$  – гравитационное давление воздуха в пучке и шахте, Па;  $\Delta p_{п}^{соп}$ ,  $\Delta p_{ш}^{соп}$  – аэродинамическое сопротивление пучка и шахты, Па;  $Eu_{п}$ ,  $Eu_{ш}$  – число Эйлера для теплообменного пучка и вытяжной шахты.

Аэродинамическое сопротивление шахты обусловлено сжатием, трением и расширением потока воздуха в канале шахты:

$$Eu_{ш} = Eu_{тр} + Eu_{сж} + Eu_{рас}. \quad (8)$$

Число Эйлера для трения потока в канале принимает существенные значения только для вытяжной шахты с регулируемой высотой и вычислялся по формуле

$$Eu_{тр} = \lambda \frac{(H - h_{конф})}{2d_{отв}}, \quad (9)$$

где  $\lambda$  – коэффициент трения;  $d_{отв} = 0,105$  м – эквивалентный диаметр сечения шахты, м;  $h_{конф} = 0,19$  м – высота конфузора над пучком.

Коэффициент трения вычислялся по формуле Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{68}{Re} + \frac{\Delta_s}{d_{отв}} \right)^{0,25}, \quad (10)$$

где  $\Delta_s$  – абсолютная эквивалентная шероховатость трубы ( $\Delta_s = 0,0003$  м для пластиковой трубы);  $Re = w \cdot d_0/\nu$  – число Рейнольдса,  $w$  – скорость потока воздуха в сжатом сечении пучка, м/с;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости м<sup>2</sup>/с. Тогда

$$\Delta p^{гп} = \left( H + \psi \frac{w_{отв}^2}{2g} + \frac{d}{2} \frac{\rho_{п}}{\rho_{ш}} \right) g(\rho_0 - \rho_{ш}), \quad (11)$$

$$\Delta p^{соп} = \left( \lambda \frac{(H - h_{конф})}{2d_{отв}} + Eu_{зав} + Eu_{п} \frac{\rho_{ш}}{\rho_{п}} \chi_{ш}^2 \right) \rho_{ш} w_{отв}^2, \quad (12)$$

где  $\rho_0$ ,  $\rho_{ш}$ ,  $\rho_{п}$  – плотности воздуха в окружающей среде, шахте и пучке, кг/м<sup>3</sup>, определенные, соответственно, по температурам  $t_0$ ,  $t_{ш}$  и  $0,5(t_0 + t_{ш})$ ;  $\chi_{ш} = f_{отв}/f_{сж}$  – коэффициент сужений площади сечения вытяжной шахты по отношению к сжатому сечению пучка.

В результате с использованием (7), (11), (12) получена формула для определения числа Эйлера для одно- и многорядных пучков при малых числах Рейнольдса:

$$Eu_{п} = \frac{\rho_{п}}{\rho_{ш} \chi_{ш}^2} \left( \theta \cdot \left( \frac{H \cdot g}{w_{отв}^2} + \frac{\psi}{2} \right) - \lambda \frac{(H - h_{конф})}{2d_{отв}} - Eu_{зав} \right), \quad (13)$$

где  $\theta = \frac{\rho_0 - \rho_{ш}}{\rho_{ш}}$  – относительная разность плотностей.

Для проведенных экспериментов на основании экспериментальных данных была получена зависимость

$$Eu_{\pi} = 191,12 \cdot Re^{-0,395} [0,656 - \exp(-0,459 \cdot z)], \tag{14}$$

где  $z$  – число рядов в пучке.

Сопротивление многорядных пучков выше в 11–24 раза, чем однорядных. В то же время для многорядных пучков при  $z > 6$  дальнейшее увеличение числа рядов не окажет существенного влияния на изменение аэродинамического сопротивления. Это связано с тем, что растущее сопротивление движению воздуха компенсируется за счет увеличения подъемной силы за счет добавления рядов.

Для анализа достоверности полученной формулы (13) для расчета аэродинамического сопротивления пучка на рис. 1 показаны экспериментальные зависимости (в виде значков) скорости воздуха в отверстии выходного сечения шахты от относительной разности плотностей  $\theta$  для разных типов вытяжных шахт и различного исполнения одно- и многорядных оребренных пучков. Расчетные зависимости (в виде линий) представлены с использованием следующего выражения для определения скорости воздуха в центральном сечении выходного отверстия вытяжной шахты методом итерации на основании формулы (13), м/с:

$$w_{отв} = \sqrt{\frac{H \cdot g \cdot \theta}{\lambda \frac{(H - h_{конф})}{2d_{отв}} + Eu_{зав} + Eu_{\pi} \chi_{ш}^2 - \frac{\Psi}{2} \theta}}. \tag{15}$$

Исходя из условия постоянства массового расхода, скорость потока воздуха в сжатом сечении пучка, м/с, составляет

$$w = w_{отв} \chi_{ш} \frac{\rho_{ш}}{\rho_{п}}, \tag{16}$$

где  $\chi_{ш} = 0,13–0,74$  для проведенных экспериментов.

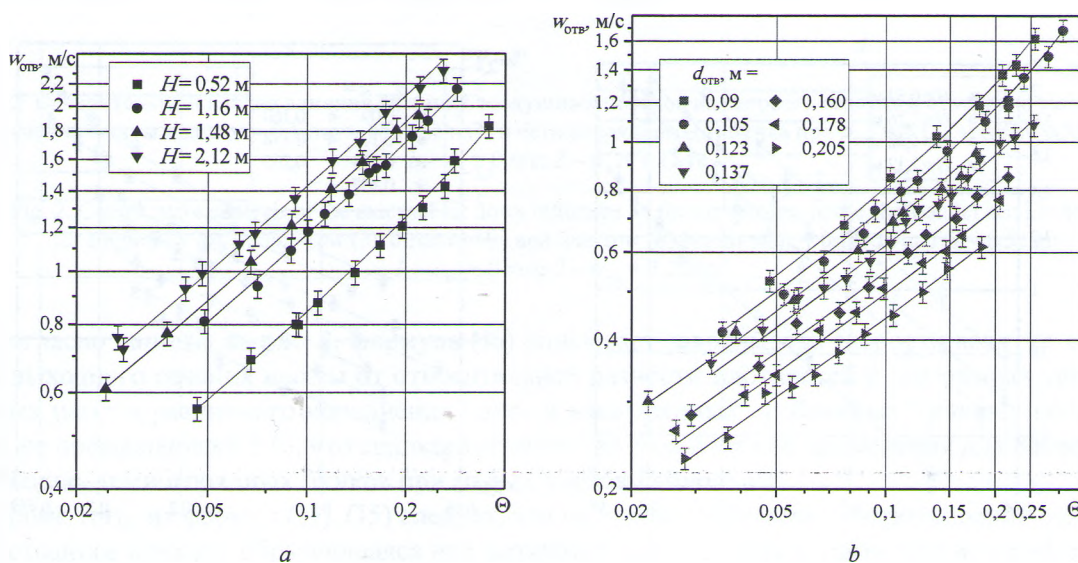


Рис. 1. Зависимость скорости воздуха на выходе из шахты от относительной разности плотностей  $\theta$  для однорядных (а, б) пучков

Fig. 1. Dependence of the air velocity at the shaft exit on the relative difference of densities for single-row (a, b) beams

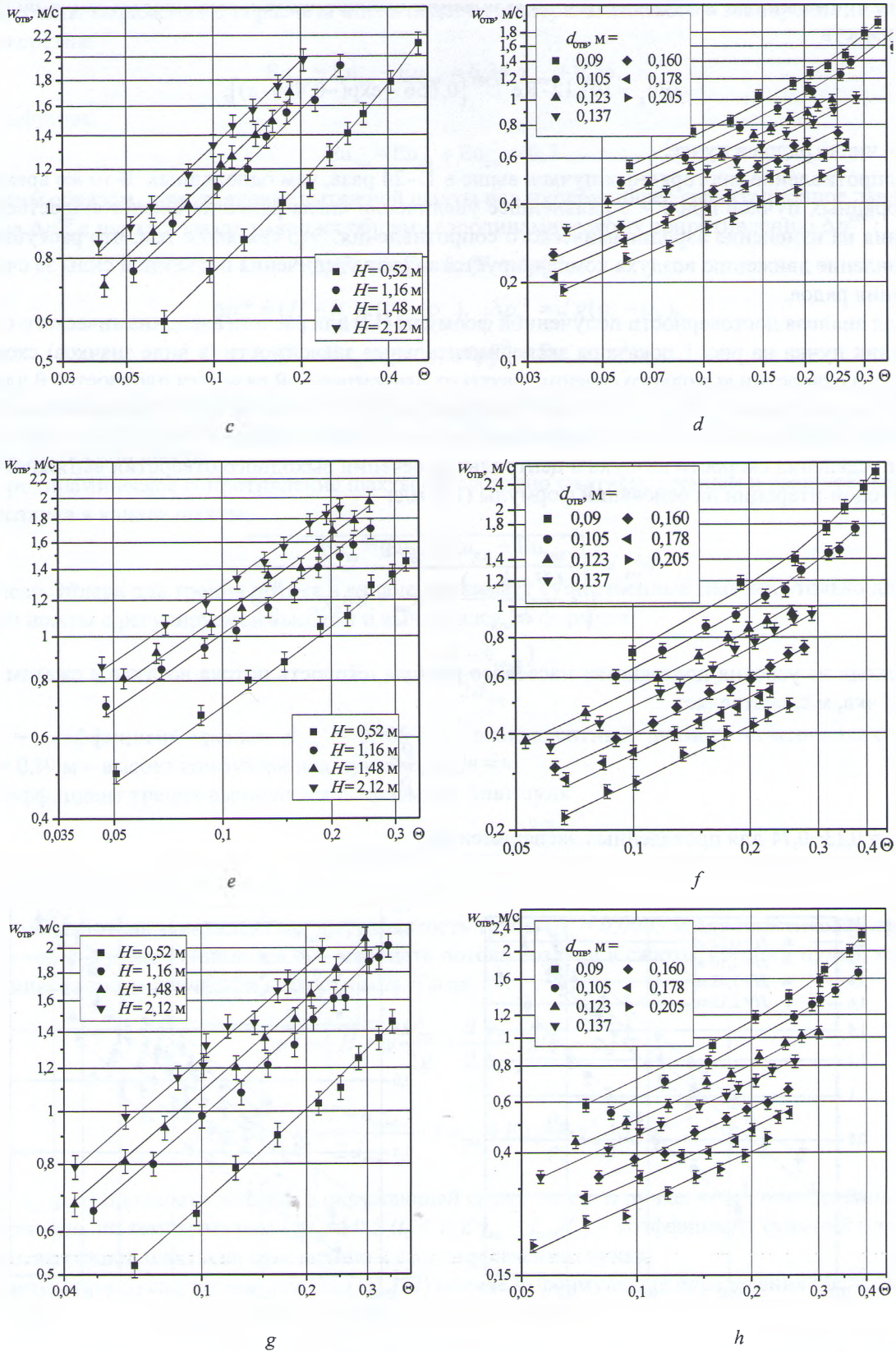


Рис. 1 (продолжение). Зависимость скорости воздуха на выходе из шахты от относительной разности плотностей  $\Theta$  для двух- (c, d), трех- (e, f) и четырехрядных (g, h) пучков

Fig. 1 (continuation). Dependence of the air velocity at the shaft exit on the relative difference of densities for double-row (c, d), three-row (e, f) and four-row (g, h) beams

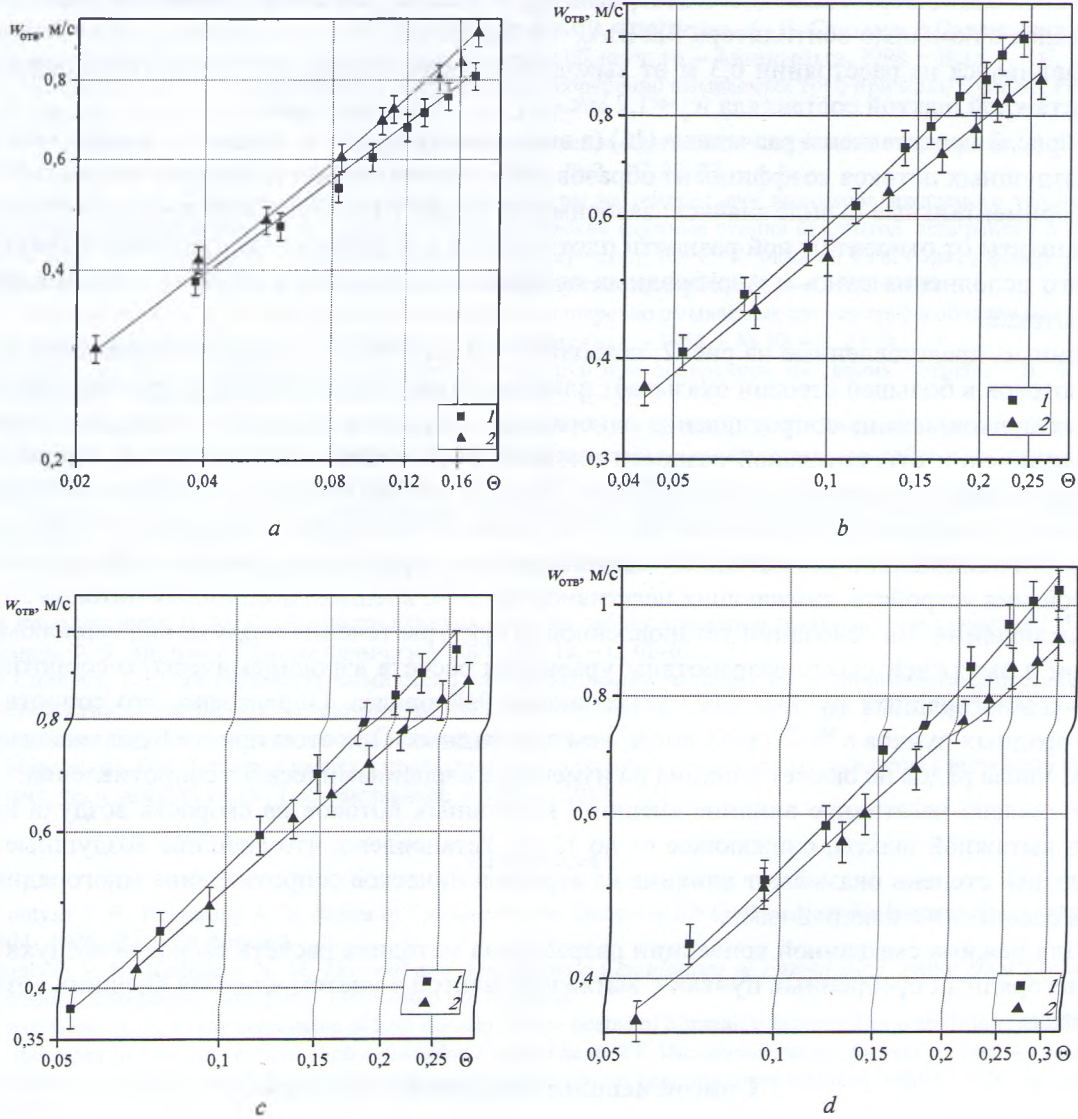


Рис. 2. Сравнительный анализ влияния внешних воздушных потоков на скорость воздуха в отверстии выходного сечения шахты для одно- (a), двух- (b), трех- (c) и четырехрядного (d) пучка при  $d_{отв} = 0,123$  м и  $H = 0,52$  м:  $1 - w_b = 0$  м/с;  $2 - w_b = 1,2$  м/с

Fig. 2. Comparative analysis of the external air flows influence on the air velocity in the shaft outlet section hole for single-row (a), double-row (b), three-row (c) and four-row (d) beams at  $d_h = 0.123$  m and  $H = 0.52$  m:  $1 - w_{air} = 0$  m/s;  $2 - w_{air} = 1,2$  m/s

Согласно данным на рис. 1, формула (16) описывает зависимость скорости воздуха в отверстии выходного сечения шахты от относительной разности плотностей  $\theta$  для разных типов вытяжных шахт и различного исполнения одно- и многорядных оребренных пучков с погрешностью, не превышающей 5 %, что свидетельствует о возможности ее применения для расчета скорости одно- и многорядных пучков при малых числах Рейнольдса.

Кроме того, из формул (13), (15) следует, что на аэродинамическое сопротивление оказывает существенное влияние образующаяся над вытяжной шахтой область нагретого воздуха, которая увеличивает общее гравитационное давление. При этом коэффициент образования  $\psi$  области нагретого воздуха над шахтой зависит от внешних воздушных потоков и размера горизонтальной площадки вокруг выходного отверстия шахты.

Для экспериментального изучения влияния наличия внешних воздушных потоков на аэродинамическое сопротивление исследовалась вытяжная шахта с прямоугольным основанием



и крышкой с диаметром выходного отверстия  $d_{\text{отв}} = 0,123$  м, для которой внешний поток воздуха создавался с помощью вентилятора БЕЛВАР ТВ 2,0/1,6 «М 214» мощностью 2 кВт. Вентилятор устанавливался на расстоянии 0,3 м от выходного отверстия шахты. Скорость потока воздуха над вытяжной шахтой составляла  $w_b = 1,2$  м/с.

На рис. 2 представлены расчетные (16) (в виде линий), с учетом того, что при наличии внешних воздушных потоков коэффициент образования области нагретого воздуха над шахтой  $\psi = 0$ , и экспериментальные (в виде значков) зависимости скорости воздуха в отверстии выходного сечения шахты от относительной разности плотностей  $\theta$  для разных типов вытяжных шахт и различного исполнения одно- и многорядных оребренных пучков при влиянии внешних воздушных потоков.

Данные, представленные на рис. 2, позволяют сделать вывод, что наличие внешних воздушных потоков в большей степени оказывает влияние на аэродинамическое сопротивление многорядных пучков, чем на сопротивление однорядных. При этом для всех пучков характерно, что при увеличении относительной разности плотностей (т. е. тепловой мощности) отрицательное влияние внешних воздушных потоков растет, скорость потока воздуха в отверстии выходного сечения шахты снижается интенсивнее (до 12 %). Таким образом, при эксплуатации воздухоохлаждаемых теплообменников с вытяжной шахтой в ветреных районах возникает необходимость проектирования устройств, снижающих негативное влияние внешних воздушных потоков<sup>2</sup>.

**Заключение.** На основании установленной структуры течения воздуха над теплообменным пучком в вытяжной шахте разработаны уравнения расчета аэродинамического сопротивления одно- и многорядных пучков при малых числах Рейнольдса. Определено, что сопротивление многорядных пучков в 11–24 раза выше, чем однорядных. При этом при  $z > 6$  дальнейшее увеличение числа рядов не окажет влияния на изменение аэродинамического сопротивления.

Выявлено негативное влияние внешних воздушных потоков на скорость воздуха на выходе из вытяжной шахты, снижающее ее до 12 %. Установлено, что внешние воздушные потоки в большей степени оказывают влияние на аэродинамическое сопротивление многорядных пучков в сравнении с однорядными.

Для режима смешанной конвекции разработана методика расчета скорости воздуха в одно- и многорядных оребренных пучках с вытяжной шахтой с учетом влияния внешних воздушных потоков.

### Список использованных источников

1. Кунтыш, В. Б. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения / В. Б. Кунтыш, А. Н. Бессонный. – СПб.: Недра, 1996. – 512 с.
2. Кунтыш, В. Б. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения / В. Б. Кунтыш, Н. М. Кузнецов. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 280 с.
3. Новожилова, А. В. К расчету теплообмена коридорных пучков из биметаллических ребристых труб при различных углах наклона труб в режиме свободной конвекции / А. В. Новожилова, З. Г. Марьяна, Е. А. Львов // Тез. докл. и сообщ. XV Междунар. форума по тепло- и массообмену, Минск, 23–26 мая 2016 г. – Минск, 2016. – С. 157–161.
4. Кунтыш, В. Б. Перевод эксплуатации аппаратов воздушного охлаждения в энергосберегающий режим. Технические решения с расчетом экономического эффекта / В. Б. Кунтыш, А. Б. Сухоцкий, А. В. Самородов // Хим. техника. – 2014. – № 6. – С. 20–25.
5. Мильман, О. О. Экспериментальное исследование теплообмена при естественной циркуляции воздуха в модели воздушного конденсатора с вытяжной шахтой / О. О. Мильман // Теплоэнергетика. – 2005. – № 5. – С. 16–19.
6. Свободноконвективные течения: тепло- и массообмен: в 2 кн.: пер. с англ. / Б. Гебхарт [и др.]; под ред. О. Г. Мартыненко. – М.: Мир, 1991. – Кн. 1. – 678 с.
7. Мартыненко, О. Г. Свободно-конвективный теплообмен: справочник / О. Г. Мартыненко, Ю. А. Соколов. – Минск: Наука и техника, 1982. – 400 с.
8. Новожилова, А. В. Анализ методик определения теплоотдачи воздуха на оребренных поверхностях нагрева при свободной конвекции / А. В. Новожилова // Проблемы теплоэнергетики Европейского севера: сб. науч. тр. – Архангельск: Сев. (Аркт.) федер. ун-т, 2010. – С. 88–97.

<sup>2</sup> Аппарат воздушного охлаждения с вытяжной шахтой: пат. 12163 Респ. Беларусь, МПК 7 F 24 F 3/00, F 28 D 1/00 / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Маршалова, Е. С. Данильчик; заявитель Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет». № u 20190104, заявл. 23.04.2019; опублик. 30.12.2019 // Афіц. бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2019. № 6. С. 135.

9. Кунтыш, В. Б. Экспериментальная установка и методика исследования теплоотдачи пучков из оребренных труб при смешанной конвекции воздуха / В. Б. Кунтыш, А. В. Самородов, А. И. Самылов // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: сб. науч. тр. – Архангельск, 1998. – Вып. 4. – С. 139–149.
10. Полюновский, Я. Л. Теплоотдача и сопротивление поперечно омываемых труб при малых числах Рейнольдса / Я. Л. Полюновский // Изв. ВТИ. – 1952. – № 9. – С. 12–17.
11. Сухоцкий, А. Б. Повышение энергоэффективности теплообменников воздушного охлаждения / А. Б. Сухоцкий, Г. С. Сидорик // Экология и промышленность. – 2017. – № 2. – С. 72–77.
12. Сидорик, Г. С. Влияние определяющей температуры на теплоотдачу воздухоохлаждаемого теплообменника при смешанной конвекции / Г. С. Сидорик // Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых – 2017: сб. материалов конф. [Электронный ресурс] / сост. Ю. С. Кузнецова; Сев. (Аркт.) федер. ун-т. им. М. В. Ломоносова. – Электронные текстовые данные. – Архангельск: САФУ, 2017. – С. 1831–1836.
13. Полюновский, Я. Л. Теплоотдача и сопротивление поперечно омываемых пучков труб в области малых чисел Рейнольдса / Я. Л. Полюновский, К. И. Беляков // Теплоэнергетика. – 1954. – № 10. – С. 27–31.
14. Юдин, В. Ф. Сопротивление пучков ребристых труб при поперечном омывании потоком / В. Ф. Юдин, Л. С. Тохтарова // Энергомашиностроение. – 1974. – № 1. – С. 30–32.
15. Гидродинамика и вибрации обтекаемых пучков труб / А. Жукаускас [и др.]. – Вильнюс: Моклас, 1984. – 312 с.
16. Локшин, В. А. Обобщение материалов по экспериментальному исследованию ребристых пучков труб / В. А. Локшин, В. Н. Фомина // Теплоэнергетика. – 1978. – № 6. – С. 36–39.
17. Васильев, Ю. Н. Системы охлаждения компрессорных и нефтеперекачивающих станций / Ю. Н. Васильев, Г. А. Марголин. – М.: Недра, 1977. – 222 с.
18. Теплообмен и сопротивление оребренных труб при низких числах Рейнольдса / Ю. А. Кошмаров [и др.] // Темат. сб. науч. тр. МАИ. – 1978. – № 6. – С. 33–37.
19. Камалетдинов, И. М. Особенности влияния ветра на работу аппаратов воздушного охлаждения / И. М. Камалетдинов, Ф. Ф. Абузова // Газовая пром-сть. – 2001. – № 12. – С. 61–62.
20. Сидорик, Г. С. Экспериментальный стенд для исследования тепловых и аэродинамических процессов смешанно-конвективного теплообмена круглобребристых труб и пучков / Г. С. Сидорик // Тр. БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2018. – № 1. – С. 85–93.
21. 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.

## References

1. Kuntyshev V. B., Bessonnyj A. N. *Basics of Calculation and Design of Air Cooling Heat Exchangers*. Saint-Petersburg, Nedra Publ., 1996. 512 p. (in Russian).
2. Kuntyshev V. B., Kuznetsov N. M. *Thermal and Aerodynamic Calculations of Finned Air Cooling Heat Exchangers*. Saint-Petersburg, Energoatomizdat Publ., 1992. 280 p. (in Russian).
3. Novozhilova A. V. To the calculation of heat transfer in-line beams of bimetallic finned tubes with different inclination angles of the pipes in free convection. *Tezisy dokladov i soobshhenii XV Mezhdunarodnogo foruma po teplo- i massoobmenu* [Scientific conference abstracts of the XV International forum on heat and mass transfer]. Minsk, 2016, pp. 157–161 (in Russian).
4. Kuntyshev V. B. Transfer of operation of air cooling devices to energy-saving mode. Technical solutions with calculation of economic effect. *Himicheskaya tehnika* [Chemical Engineering], 2014, no. 6, pp. 20–25 (in Russian).
5. Mil'man O. O. Experimental study of heat transfer at natural air circulation in the model of an air condenser with an exhaust shaft. *Teploenergetika = Thermal Engineering*, 2005, no. 5, pp. 16–19 (in Russian).
6. Gebhart B., Jaluria Y., Mahajan Roop L., Sammakia B. *Buoyancy-Induced Flows and Transport*. Springer-Verlag, 1988. 1001 p.
7. Martynenko O. G., Sokovishin Ju. A. *Free-Convective Heat Transfer*. Minsk, Nauka i tehnika Publ., 1982. 400 p. (in Russian).
8. Novozhilova A. V. Analysis of methods for determining the heat transfer of air on finned heating surfaces under free convection. *Problemy teploenergetiki Evropeiskogo severa: sbornik nauchnykh trudov* [Problems of heat power engineering of the European North: Collection of Scientific Works]. Arkhangelsk, 2010, pp. 88–97 (in Russian).
9. Kuntyshev V. B., Samorodov A. V., Samylov A. I. The experimental stand and method of investigation of heat transfer of finned tube beams under mixed air convection. *Okhrana okruzhayushchei sredy i ratsional'noe ispol'zovanie prirodnykh resursov: sb. nauch. tr.* [Environmental protection and rational use of natural resources: Collection of Scientific Works]. Arkhangelsk, 1998, no. 4, pp. 139–149 (in Russian).
10. Polynovskii Ja. L. Heat transfer and resistance of cross-washed pipes at low Reynolds numbers. *Izvestiya Vsesoyuznogo teplotekhnicheskogo instituta* [Bulletin of the All-Union Thermal Engineering Institute], 1952, no. 9, pp. 12–17 (in Russian).
11. Suhockij A. B., Sidorik G. S. Improving energy efficiency of air cooling heat exchangers. *Ekologiya i promyshlennost'* [Ecology and Industry], 2017, no. 2, pp. 72–77 (in Russian).
12. Sidorik G. S. Influence of determining temperature on heat transfer of air-cooled heat exchanger at mixed convection. *Lomonosovskie nauchnye chteniya studentov, aspirantov i molodykh uchennykh – 2017: sbornik materialov konferentsii* [Lomonosov scientific readings of students, postgraduates and young scientists – 2017: conference proceedings]. Arkhangelsk, 2017, pp. 1831–1836 (in Russian).

13. Polynovskii Ja. L., Belyakov K. I. Heat transfer and resistance of cross-washed tube bundles in the region of small Reynolds numbers. *Teploenergetika = Thermal Engineering*, 1954, no. 10, pp. 27–31 (in Russian).
14. Judin V. F., Tohtarova L. S. The resistance of finned tubes bundles in cross stream flow. *Energomashinostroenie [Power Plant Engineering]*, 1974, no. 1, pp. 30–32 (in Russian).
15. Zhukauskas, A., Ulinskas R., Katinas V. *Hydrodynamics and vibrations of streamlined tube bundles*. Vilnius: Mokslas Publ., 1984. 312 p. (in Russian).
16. Lokshin V. A., Fomina V. N. Generalization of the experimental study of finned tube bundles. *Teploenergetika = Thermal Engineering*, 1978, no. 6, pp. 36–39 (in Russian).
17. Vasil'ev Ju. N. *Cooling Compressor and Pumping Stations*. Saint Petersburg, Nedra Publ., 1977. 222 p. (in Russian).
18. Koshmarov Yu. A., Svirishchevskii S. B., Inozemtseva E. H. Heat transfer and resistance of finned tubes at low Reynolds numbers. *Tematicheskii sbornik nauchnykh trudov MAI [Thematic Collection of Scientific Works of MAI]*, 1978, no. 6, pp. 33–37 (in Russian).
19. Kamaletdinov I. M., Abuzova F. F. Features of the influence of wind on the operation of air cooling devices *Gazovaya promyshlennost' = Gas Industry Magazine*, 2001, no. 12, pp. 61–62 (in Russian).
20. Sidorik G. S. The experimental stand for a research of thermal and aerodynamic processes of mixed convection heat exchange for round-finned pipes and bunches. *Trudy BGTU. Seriya 1, Lesnoe khozyaistvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyаемыkh resursov = Proceedings of BSTU. Series 1, Forestry. Environmental Management. Reprocessing of Renewable Resources*, 2018, no. 1, pp. 85–93 (in Russian).
21. Marshalova G. S. *Thermal Design and Making of Air-Cooled Exhaust Shaft Apparatus*. Minsk, 2019. 153 p.

### Информация об авторах

**Маршалова Галина Сергеевна** – кандидат технических наук, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: galiana.sidorik@gmail.com

**Сухоцкий Альберт Борисович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: alk2905@mail.ru

### Information about the authors

**Galina S. Marshalova** – Ph. D. (Engineering), Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: galiana.sidorik@gmail.com

**Albert B. Sukhotskii** – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor of the Department of Energy Saving, Hydraulics and Heat Engineering, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alk2905@mail.ru