

УДК 621.573(047):536.24

В. Б. Кунтыш, А. Б. Сухоцкий, Г. С. Маршалова, В. Н. Фарафонов
Белорусский государственный технологический университет

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРА
НА ТЕПЛООТДАЧУ ТЕПЛООБМЕННЫХ СЕКЦИЙ
АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА**

В известных обобщенных уравнениях подобия по конвективному теплообмену поперечно обтекаемых вынужденным потоком воздуха шахматных пучков, предложенных В. Б. Кунтышем для теплового расчета аппаратов воздушного охлаждения (АВО) с секциями из биметаллических труб со спиральными алюминиевыми ребрами, Е. Н. Письменным и В. Ф. Юдиным, используемых при расчетах энергетических теплообменников из монометаллических труб с шайбовыми и спиральными стальными ребрами не отражено влияние температурного фактора на интенсивность теплоотдачи. В указанных обобщенных уравнениях подобия при внешнем поперечном обтекании газовым потоком пучков из ребристых труб физические свойства потока в числах подобия Nu и Re принимаются постоянными, не зависящими от температуры, что имеет место при изотермическом течении. В действительности процесс конвективного теплообмена между твердой стенкой и потоком является неизотермическим, вызывающим изменение физических свойств потока воздуха (газа) с переменностью температуры. Для учета влияния этого фактора вводится температурный фактор, представляющий отношение абсолютных средних температур стенки трубы и потока.

В известных публикациях влияние температурного фактора на теплообмен всесторонне теоретически и экспериментально изучено при продольном течении газового потока внутри труб и гладких кольцевых каналов, а также при внешнем поперечном отрывном обтекании гладкотрубных шахматных и коридорных пучков. Однако количество исследований по температурному фактору применительно к ребристым пучкам в потоке воздуха весьма ограничено, при этом результаты их имеют противоречивый качественный и количественный характер. Для обеспечения надежности и достоверности теплового расчета АВО, учитывая огромные масштабы их применения в различных отраслях народного хозяйства, промышленности и науки, необходимы дальнейшие эксперименты в этом направлении. Поэтому нами выполнены опыты, учитывающие диапазон изменения температурного фактора для условий эксплуатации теплообменных секций АВО природного газа на компрессорных станциях магистральных газопроводов.

Ключевые слова: температурный фактор, биметаллическая ребристая труба, поток воздуха, конвективная теплоотдача, шахматный пучок, аппарат воздушного охлаждения.

V. B. Kuntysch, A. B. Sukhotski, G. S. Marshalova, V. N. Farafontov
Belarusian State Technological University

**EXPERIMENTAL RESEARCH
OF INFLUENCE OF THE TEMPERATURE FACTOR
ON HEAT TRANSFER OF SECTIONS
OF AIR COOLED HEAT EXCHANGERS OF NATURAL GAZ**

In the known generalised equations of similarity on convective heat exchange cross-section flowed round the compelled flow of air of the chess bunches offered by V. B. Kuntysch for thermal calculation of air cooled heat exchangers (AVO) with sections from bimetallic pipes with spiral aluminium edges, E. N. Pismennyi and V. F. Yudin, power heat exchangers used at calculations from monometallic tubes with washer and spiral steel edges does not reflect influence of the temperature factor on intensity of heat exchange. In the specified generalised equations of similarity at an external cross-section flow from ridge pipes physical properties of a flow in numbers of similarity Nu and Re are accepted by a gas flow of bunches by the constants which are not dependent on temperature that takes place at an isothermal current. Actually process convective heat exchange between a firm wall and a flow is not isothermal, causing change of physical properties of a flow of air (gas) with variability of temperature. For the account of influence of this factor the temperature factor representing the relation of absolute average temperatures of a wall of tube and flow is entered.

In known publications influence of the temperature factor on heat exchange comprehensively theoretically also is experimentally studied at a longitudinal current of a gas flow in tubes and smooth ring channels, and also at external cross-section brake-off flow smooth tubes chess and corridor bunches.

Rather limited quantity of researches under the temperature factor with reference to ridge bunches in air flow is known, thus their results have inconsistent qualitative and quantitative character. For maintenance of reliability and reliability of thermal calculation AVO, considering huge scales of their application in various branches of a national economy, the industries and sciences are necessary the further researches in this direction. Therefore we execute the experiences considering a range of change of the temperature factor for service conditions heat exchangers of sections AVO of natural gas at compressor stations of the main gas tubelines.

Key words: temperature factor, bimetallic ribbed tube, flow of air, convective heat exchange, chess bunch, air cooled heat exchangers.

Введение. Затруднительно отыскать отрасль народного хозяйства, в которой не применялись бы аппараты воздушного охлаждения (АВО), но наиболее крупным потребителем их является газовая промышленность, в частности, компрессорные станции магистральных газопроводов, расположенные в различных климатических зонах от Крайнего Севера до юга и юго-восточных регионов России. Основным конструктивным элементом аппарата является теплообменная секция из биметаллических ребристых труб (БРТ) со спиральными алюминиевыми ребрами, поперечно обтекаемых принудительным потоком атмосферного воздуха. БРТ расположены в трубных решетках шахматно и образуют трубный пучок при числе поперечных рядов $z = 4-6$.

При проектировании отечественных АВО для теплового расчета теплообменных секций преимущественно используется обобщенное уравнение конвективного теплообмена для шахматных пучков БРТ с алюминиевыми спиральными накатными, навитыми завальцованными в стенку несущей трубы и KLM-ребрами, так называемое уравнение АГТУ (Архангельского государственного технического университета), предложенное В. Б. Кунтышем [2] в результате обработки большого объема опытных данных по теплоотдаче отдельных шахматных пучков с компоновочными параметрами труб, геометрическими размерами ребер и их материальным исполнением, характерных для таких аппаратов. В зарубежной практике проектирования АВО для расчетов применяется уравнение подобия Х. Уонга [3]. Для расчета энергетических теплообменников паровых котлов, тепловых и атомных электростанций применяются обобщенные уравнения конвективной теплоотдачи шахматных и коридорных пучков из монометаллических стальных ребристых труб, обтекаемых поперечным газовым потоком, которые предложены В. Ф. Юдиным [4] (ЦКТИ им. И. И. Ползунова) и Е. Н. Письменным [5] (Киевский политехнический институт – КПИ). Они базируются на данных по теплоотдаче пучков, компоновочные и геометрические параметры ребер которых значительно отличаются от БРТ АВО.

В числах подобия Nu , Re указываемых уравнений подобия, получаемых из дифференциальных уравнений для конвективного теплообмена и гидродинамики, физические свойства потока принимаются постоянными, не зависящими от температуры. В реальных процессах теплообмена физические свойства изменяются с температурой, и это учитывается дополнительным критерием $\psi = T_{ст} / T_{п}$, который представляет отношение абсолютных средних температур твердой стенки и газового потока, обтекающего стенку. Этот критерий принято называть температурным фактором, и его отсутствие в правой части уравнений подобия АГТУ, ЦКТИ, КПИ предполагает его равным единице. Количественное влияние его на интенсивность теплообмена неодинаково [6] и существенно зависит от направления движения газового потока относительно поверхности теплообмена и ее конструктивного типа. При внешнем обтекании трубы (пучка труб) газовым потоком оно слабее по сравнению с безотрывным течением внутри труб и каналов. К настоящему времени влияние температурного фактора достаточно полно изучено применительно к теплообмену гладкотрубных поверхностей для различных условий движения потока газа (воздуха) [7–10] и известны рекомендации [11] его количественного учета. Для гладкотрубных пучков, поперечно обтекаемых газовым потоком, при расчете теплоотдачи поправку на влияние температурного фактора вводить не следует.

К настоящему времени известны единичные исследования [12, 13] влияния температурного фактора на теплоотдачу пучков из ребристых труб при поперечном омывании газовым потоком. Опыты [12] выполнены на шестирядных пучках, собранных из стальных труб с диаметром по основанию ребра $d_0 = 120$ мм, высотой ребра $h = 60$ мм, шагом ребер $s = 25$ мм и толщиной ребра $\Delta = 3,75$ мм, коэффициент оребрения трубы $\phi = 8,35$, в условиях нагревания воздуха методом локального теплового моделирования, а при охлаждении дымовых газов применено полное тепловое моделирование. Калориметр устанавливался в 4-м поперечном ряду. Физические константы воздуха отнесены к температуре стенки трубы. Переход от случая

нагревания к охлаждению газового потока вызывает снижение числа Nu (безразмерной теплоотдачи) на 25%. Но полученный результат не нашел подтверждения в работе [4], в которой экспериментально установлено, что направление теплового потока не влияет на теплоотдачу ребристого пучка. Метод моделирования теплоотдачи локальный в обоих режимах, т. е. одинаков, теплоноситель также одинаков – воздух. Пучок собран из стальных ребристых труб $d_0 \times h \times s \times \Delta = 23 \times 10 \times 8 \times 2$ мм, $\varphi = 4,7$.

Для получения поправочных коэффициентов к обобщенным уравнениям подобия теплоотдачи пучков ребристых труб при поперечном обтекании потоком воздуха, работающих в различных температурных условиях, выполнено экспериментальное [13] исследование трех четырехрядных шахматных пучков локальным тепловым моделированием. Калориметр устанавливался в третьей по ходу потока поперечный ряд. Пучки собирались из монометаллических стальных точечных труб с $d_0 = 60$ мм; $h = 5; 20; 40$ мм; $s = 8$ мм; $\Delta = 3; 3,3; 3,5$ мм; $\varphi = 2,4; 7,9$ и $18,2$. Шаги труб в решетках пучка: поперечный $S_1 = 199,8$ мм, продольный $S_2 = 240$ мм.

Опыты проведены при температурах стенки трубы у основания ребер $t_{ст} = 50; 100; 200; 300; 400$ и 500°C , а температура потока воздуха была примерно $t_{п} = 30^\circ\text{C}$. По опытным данным вычисляли приведенный коэффициент теплоотдачи. Температурный фактор изменялся в интервале $\psi = 1,1-2,6$. Числа Nu для пучков ребристых труб с различным температурным фактором имеют значительное расхождение, причем оно более значительное при обработке опытных данных по температуре стенки, чем по температуре потока. Влияние температурных условий на теплоотдачу пучков ребристых труб в области изменения $\psi = 1,1-2,6$ может быть учтено критерием $(T_{ст}/T_{п})^{-0,3}$ вводимого в правую часть уравнения подобия теплоотдачи $Nu = f(Re)$ в качестве дополнительного множителя, а физические свойства газового потока принимаются в числах Nu и Re по температуре потока. Опыты проведены в диапазоне изменения числа $Re = w d_0 / \nu = 10^4-10^5$, где w – скорость потока теплоносителя в сжатом сечении пучка, м/с; ν – коэффициент кинематической вязкости теплоносителя, $\text{м}^2/\text{с}$.

Геометрические параметры изученных труб, их материальное исполнение, компоновочные характеристики пучков существенно отличаются от таковых, применяемых в шахматных пучках теплообменных секций АВО. Естественно, что непосредственное применение количественных результатов и рекомендаций не может быть использовано в тепловых расчетах АВО, что предопределило цель предлагаемого экспериментального исследования.

Цель работы – экспериментальное определение влияния температурного фактора на теплоотдачу биметаллического оребренного пучка для условий эксплуатации теплообменных секций АВО природного газа на компрессорных станциях магистральных газопроводов.

Основная часть. Объектом опытов явился шахматный шестирядный пучок с шагами труб $S_1 = 68$ мм, $S_2 = 50$ мм, которым соответствовали относительные шаги $\sigma_1 = S_1 / d = 1,214$ и $\sigma_2 = S_2 / d = 0,893$. Пучок собирался из серийных биметаллических труб с накатными однозаходными алюминиевыми ребрами $d \times d_0 \times h \times s \times \Delta = 56 \times 26,8 \times 14,6 \times 2,5 \times 0,5$ мм, $\varphi = 19,26$. Здесь $d_0 = d - 2h$ – диаметр трубы по основанию ребер. Ребра накатаны на гладкой (стальной) трубе наружного диаметра 25 мм. Отрезная длина труб составляла 330 мм при длине оребренной части 300 мм. Трубные решетки пучка выполнены из древесно-стружечной плиты толщиной 20 мм.

Пучок устанавливался в рабочем участке аэродинамической трубы разомкнутого типа с поперечным сечением в свету 300×300 мм и обтеканием принудительным перпендикулярным продольной оси труб потоком воздуха.

Для измерения теплоотдачи применено локальное тепловое моделирование с помощью электрокалориметра [14], устанавливаемого в середине третьего поперечного ряда пучка. Температуру поверхности трубы по основанию ребер измеряли четырьмя термопарами, подводимую к калориметру электрическую мощность – ваттметром. Также измеряли трубкой Прандтля динамический напор воздуха, температуру воздуха перед и за пучком. Торцевые потери тепла калориметром составляли 10 Вт.

По данным измерений рассчитывали средний приведенный коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$:

$$\alpha = Q / (F(t_{ст} - t_{п})), \quad (1)$$

где Q – тепловой поток, переданный воздуху конвекцией, Вт; $t_{ст}$ – средняя температура по основанию ребер трубы-калориметра, $^\circ\text{C}$; $t_{п}$ – средняя температура потока воздуха, набегающего на калориметр, $^\circ\text{C}$; F – полная площадь внешней теплоотдающей поверхности калориметра, м^2 .

В опытах температура $t_{п}$ изменялась в интервале $19,2-20,9^\circ\text{C}$, а при расчетах температурного фактора принята $t_{п} = 20^\circ\text{C}$ ($T_{п} = 293$ К).

Экспериментальные данные обрабатывались в безразмерных числах подобия Нуссельта $Nu = \alpha d_0 / \lambda$, Рейнольдса $Re = \omega d_0 / \nu$, где λ – коэффициент теплопроводности воздуха, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; ω – скорость воздуха в сжатом попе-

речном сечении пучка, м/с; ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с. Физические параметры воздуха λ , ν определялись по его средней температуре в пучке.

Скорость воздуха соответствовала интервалу $\omega = 1,7\text{--}10,7$ м/с и охватывала рабочие режимы эксплуатации АВО.

При проектировании отечественных АВО на давление охлаждающего газа 7,4 МПа закладываются следующие температурные режимы: температура газа на входе $t_{21} = 75^\circ\text{C}$, на выходе $t_{22} = 45^\circ\text{C}$, температура окружающего воздуха $t_{\text{воз}} = 30^\circ\text{C}$.

В связи с этим опыты проводились при трех постоянных значениях температуры стенки трубы-калориметра $t_{\text{ст}} = 39,5; 70,3; 101^\circ\text{C}$ ($T_{\text{ст}} = 312,5; 343,3; 374$ К), значения температурного фактора для которых были $\psi = 1,066; 1,17; 1,28$. Постоянство температуры стенки обеспечивалось регулированием подводимой электрической мощности к калориметру, несмотря на изменение скорости воздуха в указанном интервале. В АВО природного газа всегда $\psi > 1$, так как температура стенки $T_{\text{ст}}$ БРТ больше температуры потока $T_{\text{п}}$ воздуха.

Результаты опытов приведены на рис. 1 в логарифмических координатах.

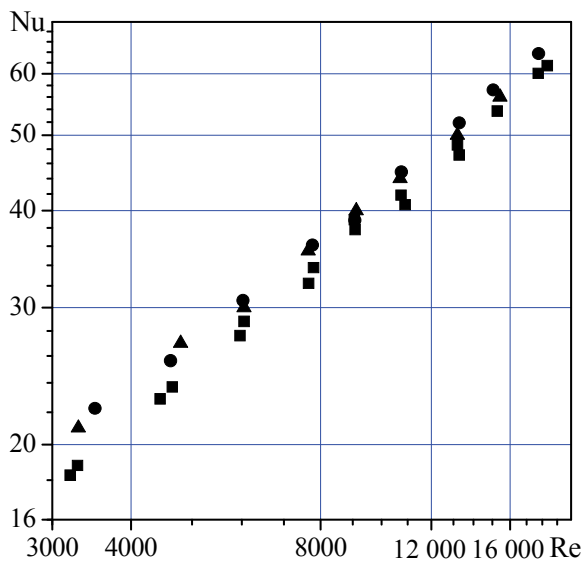


Рис. 1. График приведенной теплоотдачи третьего ряда пучка:

■, ●, ▲ – соответственно, температура стенки $t_{\text{ст}} = 39,5; 70,3; 101^\circ\text{C}$

Опытами охвачено изменение числа $Re = 3000\text{--}19\,000$, при котором ранее выполненные исследования не проводились. При увеличении температурного фактора ψ от 1,066 до 1,17 (рост $t_{\text{ст}}$ от 39,5 до 70,3) приведенная средняя теплоотдача (число Nu при $Re = \text{const}$) снижается в среднем на 5%, но дальнейший рост ψ

от 1,17 до 1,28 не оказывает влияния на теплоотдачу, которая при $Re = \text{const}$ остается постоянной.

Наглядное представление по количественному влиянию температурного фактора на теплоотдачу ребристого пучка АВО для числа $Re = 10^4$ можно представить по рис. 2 и 3, построенных в логарифмических координатах по данным рис. 1.

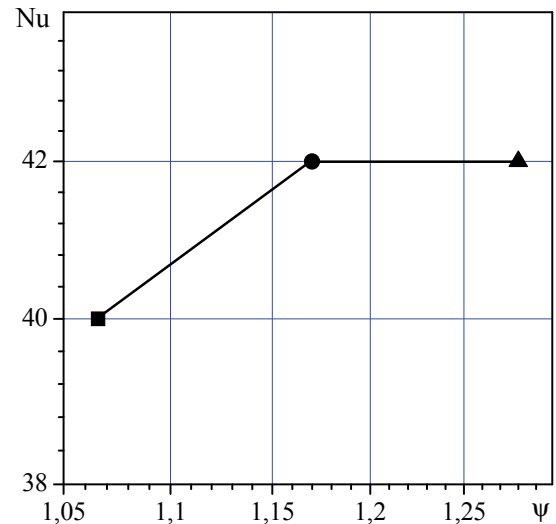


Рис. 2. Зависимость температурного фактора от изменения средней теплоотдачи пучка:

■, ●, ▲ – соответственно, температура стенки $t_{\text{ст}} = 39,5; 70,3; 101^\circ\text{C}$

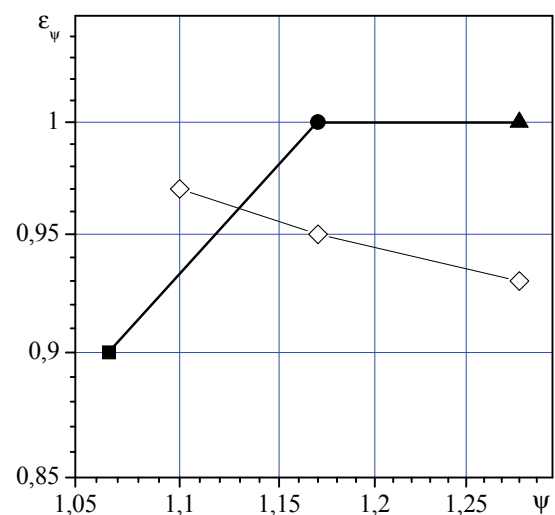


Рис. 3. Поправочный коэффициент к средней приведенной теплоотдаче ребристого пучка АВО:

■, ●, ▲ – соответственно, температура стенки $t_{\text{ст}} = 39,5; 70,3; 101^\circ\text{C}$

Из рис. 3 следует, что существует, прежде всего, качественное различие характера изменения поправочного коэффициента ϵ_ψ в исследованном нами диапазоне ψ с данными [13]. По результатам [13] значение ϵ_ψ непрерывно

уменьшается в соответствии влияния симплекса $(T_{ст} / T_{п})^{-0,3}$ с ростом ψ . Однако результаты эксперимента противоположны. С ростом ψ от 1,066 до 1,17 теплоотдача повышается на 5%, но последующее увеличение ψ от 1,17 до 1,28 не отражается на теплоотдаче. Это можно объяснить существенным различием в геометрических сравниваемых пучков. В области перегибаемых значений $\psi = 1,1-1,28$ и Re различие в ϵ_{ψ} не превышает 7%.

Заключение. По результатам проведенного исследования разработаны рекомендации по учету влияния температурных условий на ко-

эффициент теплоотдачи от оребрения к воздуху при тепловом расчете АВО для рабочих режимов эксплуатации.

Для пучков АВО в случае расчета конвективного коэффициента теплоотдачи α_k по обобщенному уравнению [1, 2], в котором физические свойства воздуха λ, ν приняты по его средней температуре в пучке, необходимо его пересчитать на приведенный коэффициент теплоотдачи α и в интервале температурного фактора $\psi = 1,17-1,28$ не следует учитывать его влияние. При $\psi < 1,17$ значение α необходимо умножить на величину ϵ_{ψ} из рис. 3.

Список литературы

1. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: справочник / под общ. ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессонного. СПб.: Недра, 1996. 512 с.
2. Кунтыш В. Б., Кузнецов Н. М. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения. СПб.: Энергоатомиздат, 1992. 280 с.
3. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. Справочник. М.: Атомиздат, 1979. 218 с.
4. Юдин В. Ф. Теплообмен поперечнооребранных труб. Л.: Машиностроение, 1982. 189 с.
5. Письменный Е. Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребранных труб. Киев: Альтерпресс, 2004. 244 с.
6. Кутателадзе С. С., Ляховский Д. Н., Пермяков В. А. Моделирование теплоэнергетического оборудования. М; Л.: Энергия, 1986. 351 с.
7. Антуфьев В. М., Белецкий Г. С. Влияние температурного фактора на теплоотдачу трубчатых поверхностей нагрева в поперечном потоке газа // Советское котлотурбостроение. 1948. № 4. С. 1-4.
8. Кузнецов Н. В., Турилин С. И. Влияние температурных условий на теплоотдачу и сопротивление трубчатых поверхностей в поперечном потоке // Изв. ВТИ. 1952. № 11. С. 23-27.
9. Дубровин И. В. Влияние температурного фактора на теплоотдачу // Теплоэнергетика. 1960. № 4. С. 69-74.
10. Ильин Л. Н. Влияние температурных условий на теплоотдачу и сопротивление при течении воздуха в трубе // Советское котлотурбостроение. 1951. № 1. С. 3-7.
11. Мигай В. К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 364 с.
12. Антуфьев В. М., Белецкий Г. С. Теплопередача и аэродинамическое сопротивление трубчатых поверхностей в поперечном потоке. М; Л.: Машгиз, 1948. 207 с.
13. Юдин В. Ф., Тохтарова Л. С. Влияние температурного фактора на теплоотдачу пучков ребристых труб // Наука и техника. 1979. № 1. С. 112-121.
14. Экспериментальное исследование теплообмена, аэродинамического и контактного сопротивления шахматных пучков из труб со спиральными накатными ребрами аппаратов воздушного охлаждения / В. Б. Кунтыш [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2019. № 1. С. 14-19.

References

1. Kuntyshev V. B., Bessonnyu A. N. *Osnovy rascheta i proektirovaniya teploobmennikov vozdušnogo okhlazhdeniya* [Basic of calculation and design of air-cooled heat exchangers]. St. Petersburg, Nedra Publ., 1996. 512 p.
2. Kuntyshev V. B., Kuznecov N. M. *Teplovoy i aerodinamicheskiy raschety orebrennykh teploobmennikov vozdušnogo okhlazhdeniya* [Thermal and aerodynamic calculations ribbed heat exchangers of air cooling]. St. Petersburg, Energoatomizdat Publ., 1992. 280 p.
3. Wang H. *Osnovnyye formuly i dannyye po teploobmenu dlya inzhenerov. Spravochnik* [Basic formulas and data on heat transfer for engineer]. Moscow, Atomizdat Publ., 1979. 218 p.
4. Judin V. F. *Teploobmen poperechnoorebrennykh trub* [Heat exchange is transverse ribbe pipes]. St. Petersburg, Mashinostroeniye Publ., 1982. 189 p.

5. Pis'menny E. N. *TeplООbmen i aerodinamika paketa poperechno-orebrennykh trub* [Heat exchange and aerodynamics of packages is transverse-ribbed tubes]. Kiev, AI'terpress Publ., 2004. 244 p.
6. Kutateladze S. S., Lyakhovsky D. N., Permyakov V. A. *Modelirovaniye teploenergeticheskogo oborudovaniya* [Modeling of heat power equipment]. Moscow; Leningrad, Energy Publ., 1986. 351 p.
7. Antufiev V. M., Beletsky G. S. Influence of the temperature factor on the heat transfer of tubular heating surfaces in transverse gas stream. *Sovetskoye kotloturbostroyeniye* [Soviet boiler turbine construction], 1948, no. 4, pp. 1–4 (In Russian).
8. Kuznetsov N. V., Turilin S. I. Influence of temperature conditions on heat transfer and resistance of tubular surfaces in a transverse flow. *Izvestiya Vsesoyuznogo teplotekhnicheskogo instituta* [Bulletin of the All-Union Thermotechnical Institute], 1952, no. 11, pp. 23–27 (In Russian).
9. Dubrovin I. V. Influence of the temperature factor on heat transfer. *Teploenergetika* [Thermal engineering], 1960, no. 4, pp. 69–74 (In Russian).
10. Ilyin L. N. Influence of temperature conditions on heat transfer and resistance during air flow in tube. *Sovetskoye kotloturbostroyeniye* [Soviet boiler turbine construction], 1951, no. 1, pp. 3–7 (in Russian).
11. Migai V. K. *Modelirovaniye teploobmennogo energeticheskogo oborudovaniya* [Modeling of heat-exchange power equipment]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1987. 364 p.
12. Antufiev V. M., Beletsky G. S. *Teploperedacha i aerodinamicheskoye soprotivleniye trubchatykh poverkhnostey v poperechnom potoke* [Heat transfer and aerodynamic resistance of tubular surfaces in transverse flow]. Moscow; Leningrad, Mashgiz Publ., 1948. 207 p.
13. Yudin V. F., Tokhtarova L. S. Influence of the temperature factor on the heat transfer of bundles of ribbed tubes. *Nauka i tekhnika* [Science and technology], 1979, no. 1, pp. 112–121 (In Russian).
14. Kunttysh V. B., Suhotsky A. B., Farafontov V. N., Dudarev V. V., Sidorik G. S. Experimental study of heat transfer, aerodynamic and contact resistance of chess beams from pipes with spiral knurled fins of air-cooled devices. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2019, no. 1, pp. 14–19 (In Russian).

Информация об авторах

Кунтыш Владимир Борисович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: egit@belstu.by

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

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

Фарафонов Валерий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь).

Information about the authors

Kunttysh Vladimir Borisovich – DSc (Engineering), Professor, Professor, the Department of Energy-saving, Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: egit@belstu.by

Sukhotski Al'bert Borisovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, 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

Marshalova Galina Sergeevna – PhD (Engineering), Assistant lecturer, the Department of Energy-saving, Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: galiana.sidorik@gmail.com

Farafontov Valery Nikolaevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Energy-saving, Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus).

Поступила 15.03.2020