

УДК 621.565.83:004.942

Бельских Анна Михайловна

студент,
Уральский государственный горный
университет,
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева 30
e-mail: belskikh-2015@mail.ru

Арсланов Азамат Альфизович

студент,
Уральский государственный горный
университет

Макаров Николай Владимирович

кандидат технических наук, доцент,
Уральский государственный горный
университет

Макаров Владимир Николаевич

доктор технических наук, доцент,
Уральский государственный горный
университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ В АППАРАТАХ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕРМОВИХРЕВОГО ТЕПЛООБМЕНА

Аннотация:

Используемые в настоящее время аппараты воздушного охлаждения отличаются недостаточной экономической эффективностью, что в значительной степени обусловлено низким коэффициентом теплоотдачи. Предложен способ повышения их эффективности с помощью устойчивой системы вихрей, создающих эффект «Торнадо», формирующий процесс термовихревого теплообмена. Математическое моделирование термовихревого теплообмена соответствует внешней задаче поперечного обтекания потоком пучка оребренных труб и базируется на гипотезе снижения температуры охлаждающего воздуха за счет циркуляции потока в спиралевидном вихревом турбулизаторе. Термовихревое снижение температуры охлаждающего воздуха приводит к росту разности температур между охлаждаемым газом, стенками трубы и охлаждающим воздухом и эффективного значения критерия Рейнольдса $Re_{эф}$, обусловленного эффектом «Торнадо», и как результат повышения критерия его теплофизического подобия. С использованием теорем Стокса, Гельмгольца, уравнений Клайперона и Бернулли, теории подобия и гипотезы о доминанте влияния скорости циркуляционного потока в спиралевидном вихревом турбулизаторе на снижение температуры охлаждающего воздуха получена математическая модель термовихревого теплообмена в аппаратах воздушного охлаждения. Спиралевидный вихревой турбулизатор позволяет увеличивать коэффициент теплоотдачи до величины $\alpha = 108 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

Ключевые слова: теплообменные аппараты, оребренные трубы, вентиляторы, спираль Архимеда, теплоотдача, эффект «Торнадо», газ, спиралевидный турбулизатор.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.02.086

Belskikh Anna M.

student,
Ural State Mining University,
620144 Ekaterinburg, 30 Kuibysheva Str.
e-mail: belskikh-2015@mail.ru

Arslanov Azamat A.

student,
Ural State Mining University

Makarov Nikolay V.

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Ural State Mining University

Makarov Vladimir N.

Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor,
Ural State Mining University

MODELING OF THERMAL VORTEX HEAT EXCHANGE IN AIR COOLING DEVICES

Abstract:

Currently used air cooling devices are characterized by insufficient economic efficiency, largely due to the low coefficient of heat transfer. The article suggests a way to increase their efficiency with the help of a stable system of vortices that create a "Tornado" effect that forms the process of thermal vortex heat exchange. Mathematical modeling of thermal vortex heat transfer corresponds to the external problem of transverse flow around a bundle of finned pipes and is based on the hypothesis of a decrease in the temperature of the cooling air due to the circulation of the flow in a spiral vortex turbulator. A thermal vortex decrease in the temperature of the cooling air leads to the increase in the temperature difference between the cooled gas, the pipe walls and the cooling air and the effective value of the Reynolds criterion Re_{ef} , due to the "Tornado" effect, and as a result of an increase in the criterion of its thermophysical similarity. Using of the Stokes theorem and the Helmholtz' one, the Klayperon and Bernoulli equations, the similarity theory and the hypothesis of the dominant influence of the velocity of the circulation flow in a spiral vortex turbulator on a decrease in the temperature of the cooling air, a mathematical model of thermal vortex heat exchange in air cooling devices is obtained. Spiral vortex turbulator allows increasing the heat transfer coefficient to the value $\alpha = 108 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

Key words: heat exchangers, finned pipes, fans, Archimedes spiral, heat transfer, Tornado effect, gas, spiral turbulator.

Введение

Используемые в настоящее время в теплообменниках воздушного охлаждения (ТВО) аппаратов воздушного охлаждения (АВО) оребренные трубы отличаются недостаточным коэффициентом теплоотдачи, не превышающим $90 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$. По этой причине общая площадь теплообменных поверхностей только в нефтегазовой и химической отраслях превышает 4 млн м^2 , при этом на охлаждение газов и жидкостей ежегодно расходуется свыше 12 млрд кВт·ч электроэнергии [1 – 3], что приводит к низкой эффективности АВО, вследствие чего до 15 % газа расходуется на его транспортирование, и это существенно снижает конкурентоспособность газотранспортной системы РФ.

Протяженность магистральных газопроводов ПАО «Газпром» составляет более 170 тыс. км, где эксплуатируются свыше 35 000 АВО [4].

Эксплуатация АВО с низкой теплоотдачей требует дополнительных затрат на электроэнергию и обслуживание, что приводит к снижению эффективности газоперекачивающих станций, ухудшая структуру внутреннего валового продукта РФ более чем на 2%.

Таким образом, задача повышения эффективности ТВО, являющегося одним из основных энергоемких элементов АВО за счет совершенствования механизма теплоотдачи, снижения температуры газа, совмещения достоинств штыревого, лепесткового и дискового оребрений, и как результат снижения затрат на его транспортирование актуально, позволяет повысить конкурентоспособность предприятий нефтегазового комплекса РФ [4].

В основе идеи повышения эффективности теплоотдачи ТВО лежит использование устойчивого турбулентного вихревого движения охлаждающего воздуха в форме «Вихревой дорожки Кармана», создаваемого посредством лепестковых охлаждающих элементов оребрения пучка труб, выполненных в форме спирали Архимеда типа "Спиралевидных турбулизаторов", закрепленных на теплообменных трубах, что позволяет сформировать устойчивую систему вихрей, взаимодействующую с трубами ТВО и создающую эффект «Торнадо» [5 – 7].

Задачи исследования

Задача повышения теплоотдачи ТВО решается путем закручивания охлаждающего воздуха спиралевидными элементами лепестков, что приводит к существенному снижению статического давления охлаждающего воздуха за счет его интенсивной закрутки и увеличения времени контакта охлаждающего воздуха с пучком оребренных труб. "Спиралевидный вихревой турбулизатор" как основной элемент эффективного охлаждения газа в ТВО выполнен в форме лепестков пространственной спирали Архимеда. Исследования механизма взаимодействия устойчивой «Вихревой дорожки Кармана» в спиралевидном вихревом турбулизаторе подтверждают существенное снижение статического давления за счет интенсивного вихревого движения, что приводит к существенному снижению температуры охлаждающего воздуха в соответствии с теорией Клайперона.

На рис. 1 приведен элемент одноходового многорядного пучка труб, в котором оребрение выполнено вложенными друг в друга желобами 1, скрепленными с трубой 2 и между собой средними частями оснований 3 с боковыми образующими в виде лепестков с образованием равномерно расположенных стержней, выполненных в форме пространственной спирали Архимеда-4, выполняющих роль Спиралевидного вихревого турбулизатора.

Газ в трубах многорядного одноходового трубного пучка ТВО охлаждают за счет подачи воздуха в межтрубное пространство с формированием зигзагообразного характера движения с интенсивной турбулентностью, закручивают относительно осей, радиальных по отношению к трубам, в устойчивое вращательное движение за счет наружного оребрения, выполненного в форме пространственной спирали Архимеда [5, 6, 8].

Применение данного способа охлаждения газа АВО на базе технических решений, учитывающих специфику конструкции и условий их эксплуатации, позволяет поднять на качественно новый уровень термодинамическую эффективность АВО за счет снижения температуры с помощью закрутки воздуха, статистического давления и увеличения времени контакта с пучком оребренных труб (см. рис. 1).

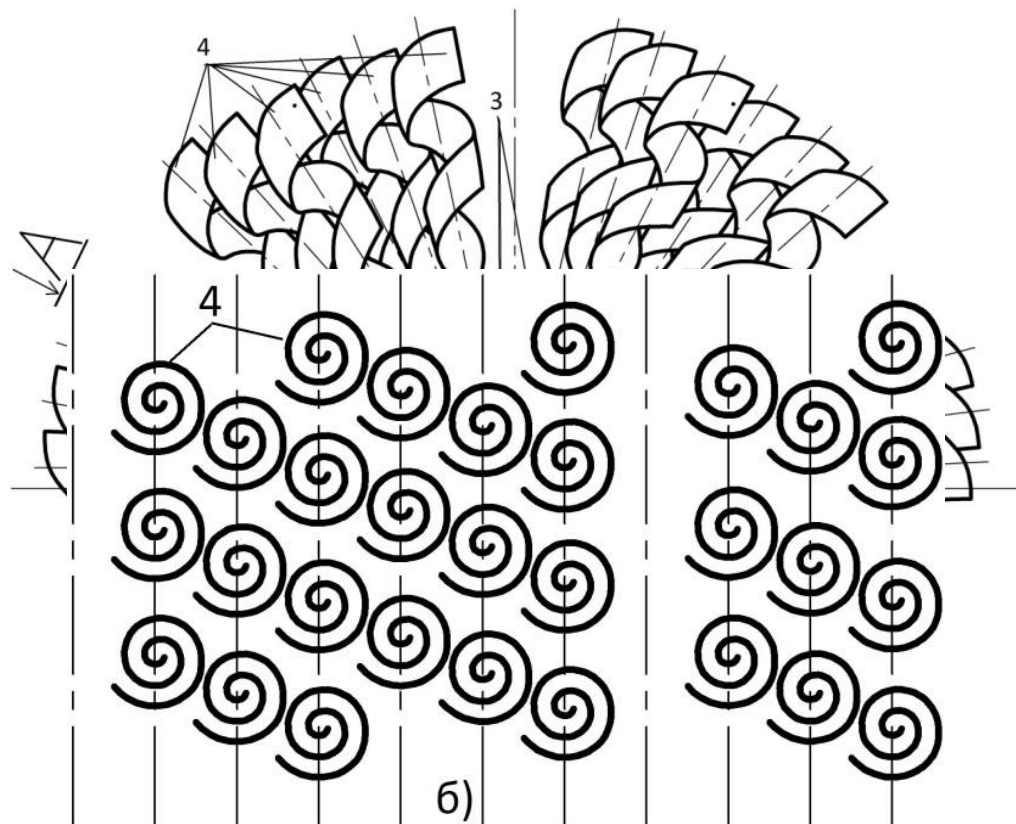


Рис. 1. Схема лепесткового оребрения трубы ТВО с термовихревым спиралевидным турбулизатором теплообмена: а) – вид по осям трубы; б) – вид перпендикулярно оси трубы

Результаты исследования и их обсуждение

Рабочий процесс в современных модулях теплообмена АВО соответствует условиям внутренней задачи, когда ядро потока находится во внутренней области по отношению к пограничному слою, покрывающему стенки канала, и условиям внешней задачи, когда ядро потока находится во внешней области по отношению к пограничному слою [4, 5].

В статье рассмотрено решение внешней задачи теплообмена при поперечном обтекании потоком пучка труб ТВО. Коэффициент теплоотдачи α в данном случае определяется из критериального уравнения конвективного теплообмена – критерия Нуссельта [3, 4]:

$$\alpha = Nu \frac{\sigma}{d_T};$$

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \varepsilon_e \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25}, \quad (1)$$

где $Re = \frac{V d_T \rho}{\mu}$ – критерий Рейнольдса; $Pr = \frac{\mu c_p}{\sigma}$ – критерий Прандтля; d_T – диаметр трубы трубного пучка ТВО, м; σ, ρ – коэффициент теплопроводности и плотность (кг/м^3) охлаждающего воздуха; V – расходная скорость охлаждающего воздуха, м/с; Pr и $Pr_{гс}$ – соответственно, критерии Прандтля охлаждающего воздуха при средней температуре $t_{ср}$ и

средней температуре стенки, равной t_{cp}^{CT} ; μ – коэффициент динамической вязкости охлаждающего воздуха при средней температуре $t_{cp} = \frac{t_{cp}^{CT} + t_{cp}}{2}$, кг/м · с; C_p – теплоемкость охлаждающего воздуха при средней температуре, Дж/кг · К; ε_e – коэффициент изменения теплоотдачи по длине трубы пучка труб ТВО.

Математическое моделирование термовихревого теплообмена, соответствующее внешней задаче поперечного обтекания потоком пучка оребренных труб ТВО, базируется на гипотезе снижения температуры охлаждающего воздуха в зоне его контакта с оребренной трубой за счет циркуляции потока в спиралевидном вихревом турбулизаторе в соответствии с теорией Клайперона. Снижение температуры охлаждающего воздуха приводит к росту разности температур между охлаждаемым газом, стенками трубы и охлаждающим воздухом и эффективного значения критерия Рейнольдса $Re_{эф}$, обусловленное эффектом «Торнадо» в результате повышения критерия его теплофизического подобия [8 – 10].

Циркуляцию охлаждающего воздуха при его движении в спиралевидном вихревом турбулизаторе ТВО определим по формуле [11 – 12]:

$$\Gamma_{\omega} = \frac{\pi^2}{2 \operatorname{tg} \beta} d_c \cdot V, \quad (2)$$

где β – угол наклона спирали вихрей турбулизатора, град; d_c – диаметр спирали вихревого турбулизатора, м.

С учетом теоремы Стокса угловая скорость вихревого движения охлаждающего воздуха в спиралевидном турбулизаторе ТВО может быть определена по формуле [10, 11]:

$$\omega = \frac{2\pi}{\operatorname{tg} \beta \cdot d_c} \cdot V, \quad (3)$$

где V – окружная составляющая расходной скорости охлаждающего воздуха, м.

С учетом формул (2, 3), второй теоремы Гельмгольца, уравнения Бернулли формулу для снижения статического давления охлаждающего воздуха в спиралевидном вихревом турбулизаторе ТВО в зависимости от действия эффекта «Торнадо», запишем в виде [11,12]:

$$\Delta P_{\omega} = \frac{2\pi^3}{\operatorname{tg}^2 \beta} \cdot \rho_{\omega} \cdot V^2 = \frac{2\pi^3}{\operatorname{tg}^2 \beta} m \cdot V, \quad (4)$$

где ρ_{ω} – плотность охлаждающего воздуха в спиралевидном вихревом турбулизаторе, кг/м³; m – массовый удельный расход охлаждающего воздуха, кг/м²с.

С учетом (4), формулы Клайперона, второй теоремы Гельмгольца снижение температуры охлаждающего воздуха в спиралевидном вихревом турбулизаторе ТВО в зависимости от действия эффекта «Торнадо» определим по формуле:

$$\Delta T_{\omega} = \frac{\Delta p_{\omega}}{\rho_{\omega} \cdot R} = \frac{2\pi^3}{\operatorname{tg}^2 \beta \cdot R} \cdot V^2 = \frac{2\pi^3}{R} \cdot V_{\omega}^2, \quad (5)$$

где R – газовая постоянная, м²/с²К; V_{ω}^2 – окружная скорость охлаждающего воздуха в спиралевидном вихревом турбулизаторе, м/с.

Эффективное значение критерия Рейнольдса при вихревом движении охлаждающего воздуха в спиралевидном вихревом турбулизаторе определяем по формуле [11]:

$$Re_{эф} = \frac{d_T \sqrt{V^2 + 0.25 \omega^2 d_c^2} \cdot \rho_{\omega}}{\mu}. \quad (6)$$

Из уравнения (4) и выражения для критерия Эйлера Eu [8] следует, что для спиралевидного вихревого турбулизатора термоаэродинамическая эффективность ТВО, определяемая отношением коэффициента теплоотдачи, учитывающего снижение температуры от эффекта «Торнадо» и критерия Эйлера, увеличивается с ростом окружной скорости охлаждающего воздуха, т.е. с уменьшением угла наклона спирали вихревого турбулизатора и увеличением расходной скорости.

Для подтверждения гипотезы о доминантном влиянии эффекта «Горнадо» на аэротермодинамическую эффективность ТВО со спиралевидными вихревыми турбулизаторами трубного пучка были проведены экспериментальные исследования.

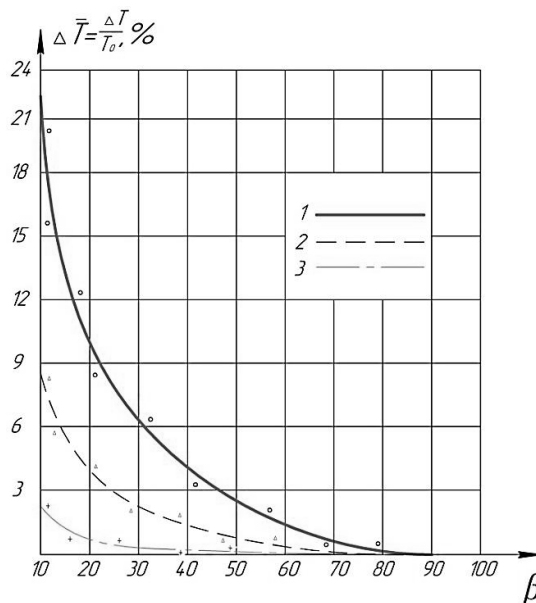


Рис. 2. Зависимость изменения относительной температуры охлаждающего воздуха от угла наклона спирали вихревого турбулизатора:
1 – $V_0 = 4 \text{ мс}^{-1}$; 2 – $V_{02} = 3 \text{ мс}^{-1}$; 3 – $V_{03} = 1,5 \text{ мс}^{-1}$

На рис. 2, 3 приведены результаты испытаний одноходового многорядного пучка труб АВО, в котором оребрение изготовлено в форме пространственных спиралей Архимеда, выполняющих роль спиралевидного вихревого турбулизатора, обеспечивающего турбовихревой теплообмен (см. рис.1)

Из анализа рис. 2, 3 видно, что с уменьшением угла наклона спирали вихревого турбулизатора снижается температура охлаждающего воздуха и как результат увеличивается коэффициент теплоотдачи по отношению к его значению для ТВО с классическим дисковым оребрением. При этом увеличение расходной скорости охлаждающего воздуха в 2,7 раза увеличивает максимальный прирост снижения температуры более чем в 8 раз, а коэффициент теплоотдачи на 15 %, что позволяет достичь его значения не менее $\alpha = 108 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

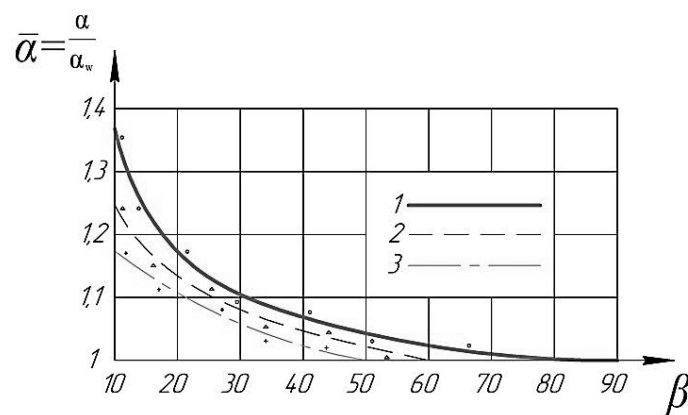


Рис. 3. Зависимость относительного коэффициента теплоотдачи охлаждающего воздуха от угла закрутки спиралевидного вихревого турбулизатора:
1 – $V_0 = 4 \text{ мс}^{-1}$; 2 = 3 мс^{-1} ; 3 = $1,5 \text{ мс}^{-1}$

Выводы

1. На базе гипотезы о доминанте влияния скорости циркуляционного потока в спиралевидном вихревом турбулизаторе на снижение температуры охлаждающего воздуха предложена математическая модель термовихревого теплообмена в АВО.

2. Предложена конструкция многорядного одноходового пучка труб с оребрением в виде пространственной спирали Архимеда, объединяющая лучшие качества дисковых и штырьковых охлаждающих элементов ТВО.

3. Спиралевидный вихревой турбулизатор повышает коэффициент теплоотдачи на 15 % до величины $\alpha = 108 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ при скорости охлаждающего воздуха 4 м/с и угле спирали Архимеда 10° .

Список литературы

1. Бродов Ю.М, Аронсон К.Э., Рябчиков А.Ю., Ниренштейн М.А.; под общ. ред. Бродова Ю.М., 2016. *Справочник по теплообменным аппаратам паротурбинных установок*. Москва: Издательский дом МЭИ.

2. Bautin S.G., Krutova I.Y., Obukhov A.G., 2015. Twisting of a fire vortex subject to gravity and coriolis forces. *High temperature*, Vol. 53, № 6, P. 928 – 930. DOI: 10.1134/S0018151X1505003X

3. Макаров В.Н., Макаров Н.В., Плотников Н.С., Потапов В.В., 2018. Математическое моделирование вихревого гидрообеспыливания на горно-обогатительных предприятиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень МГГУ*, № 4, С. 210 – 217.

4. Лойцянский Л.Г., 2003. *Механика жидкости и газа. Учебник для вузов. 7-е изд., испр.* Москва: Дрофа, 840 с.

5. Зысин Л.В., Калютник А.А., 2010. *Теплообменное оборудование: Учеб. пособие.* Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 230 с.

6. Sadik Kakas, Hongtan Liu, Anchasa Pramuanjaroenkij, 2020. Heat Exchangers. *Selection, Rating and Thermal Design*, P. 205 – 212, ISBN 978-1-138-60186-4

7. Сидягин А.А., Косырев В.М., 2009. *Расчет и проектирование аппаратов воздушного охлаждения: учеб. пособие для студентов вузов.* Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Алексея Р.Е., 150 с.

8. Dawid Taler, 2020. Numerical Modelling and Experimental Testing of Heat Exchangers. *Part of the Studies in Systems, Decision and Control book series*, vol. 161, P. 45 – 70, ISBN978-3-319-91128-1

9. Макаров Н.В., Макаров В.Н., Бельских А.М., 2019. Исследование влияния остаточной циркуляции на аэротермодинамическую эффективность АВО. *Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромышленного оборудования: материалы VI Международной научно-практической конференции: Горная и нефтяная электромеханика – 2019, Пермь 21 – 24 октября 2019 г.*, С. 87 – 91.

10. Макаров Н.В., Макаров В.Н., Волежанин И.А., Угольников А.В., 2018. Аддитивная математическая модель аэродинамики энергетического регулятора шахтных радиальных вентиляторов. *Горный информационно-аналитический бюллетень МГГУ*, № 5, С. 171 – 177.

11. Petrik M., Szepesi L.G. & Jarmai K., 2020. Heat transfer analysis for finned tube heat exchangers. *Solutions for Sustainable Development*, P. 57 – 63.

12. Макаров Н.В., Макаров В.Н., Лифанов А.В., Угольников А.В., Таугер В.М., 2019. Модификация вихревой теории круговых решеток турбомашин. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 10, С. 206 – 214. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-184-194.

References

1. Brodov Yu.M., Aronson K.E., Ryabchikov A.Yu., Nirenshtein M.A.; pod obshch. red. Brodova Yu.M., 2016. Spravochnik po teploobmennym apparatam paroturbinnnykh ustanovok [Handbook on heat exchangers of steam turbine installations]. Moscow: Izdatel'skii dom MEI.
2. Bautin S.G., Krutova I.Y., Obukhov A.G., 2015. Twisting of a fire vortex subject to gravity and coriolis forces. *High temperature*, Vol. 53, № 6, P. 928 – 930. DOI: 10.1134/S0018151X1505003X.
3. Makarov V.N., Makarov N.V., Plotnikov N.S., Potapov V.V., 2018. Matematicheskoe modelirovanie vikhrevogo gidroobespylivaniya na gorno-obogatitel'nykh predpriyatiyakh [Mathematical modeling of vortex hydraulic spraying at mining and processing enterprises]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' MGGU*, № 4, P. 210 – 217.
4. Loitsyanskii L.G., 2003. Mekhanika zhidkosti i gaza. Uchebnik dlya vuzov [Mechanics of liquid and gas. Textbook for universities]. 7-e izd., ispr. Moscow: Drofa, 840 p.
5. Zysin L.V., Kalyutik A.A., 2010. Teploobmennoe oborudovanie: Ucheb. posobie [Heat exchange equipment: Textbook]. Sankt-Peterburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 230 p.
6. Sadik Kakac, Hongtan Liu, Anchasa Pramuanjaroenkij, 2020. Heat Exchangers. Selection, Rating and Thermal Design, P. 205 – 212, ISBN 978-1-138-60186-4.
7. Sidyagin A.A., Kosyrev V.M., 2009. Raschet i proektirovanie apparatov voz-dushnogo okhlazhdeniya: ucheb. posobie dlya studentov vuzov [Calculation and design of air cooling devices: textbook for university students]. Nizhnii Novgorod: Nizhegorod. gos. tekhn. un-t im. Alekseeva R.E., 150 p.
8. Dawid Taler, 2020. Numerical Modelling and Experimental Testing of Heat Exchangers. *Part of the Studies in Systems, Decision and Control book series*, vol. 161, P. 45 – 70, ISBN 978-3-319-91128-1.
9. Makarov N.V., Makarov V.N., Bel'skikh A.M., 2019. Issledovanie vliyaniya ostatochnoi tsirkulyatsii na aerotermodinamicheskuyu effektivnost' AVO [Investigation of the effect of residual circulation on the aerothermodynamic efficiency of AVO]. Aktual'nye problemy povysheniya effektivnosti i bezopasnosti ekspluatatsii gorno-shakhtnogo i neftepromyslovogo oborudovaniya: materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: Gornaya i neftyanaya elektromekhanika – 2019, Perm' 21 – 24 oktyabrya 2019 g., P. 87 – 91.
10. Makarov N.V., Makarov V.N., Volegzhanin I.A., Ugol'nikov A.V., 2018. Additivnaya matematicheskaya model' aerodinamiki energeticheskogo regulatora shakhtnykh radial'nykh ventilyatorov [Additive mathematical model of aerodynamics of the energy regulator of shaft radial fans]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' MGGU*, № 5, P. 171 - 177.
11. Petrik M., Szepesi L.G. & Jarmai K., 2020. Heat transfer analysis for finned tube heat exchangers. *Solutions for Sustainable Development*, P. 57 – 63.
12. Makarov N.V., Makarov V.N., Lifanov A.V., Ugol'nikov A.V., Tauger V.M., 2019. Modifikatsiya vikhrevoi teorii krugovykh reshetok turbomashin [Modification of the vortex theory of circular gratings of turbomachines]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 10, P. 206 – 214. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-184-194.