

УДК 532.5:621.694:519.6

Золотонос Яков Давидович

доктор технических наук, профессор

E-mail: zolotonosov@mail.ru

Горская Татьяна Юрьевна

кандидат технических наук, доцент

E-mail: tatyana_gorskaya@mail.ru

Мартынов Петр Олегович

аспирант

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Математическая модель теплообменника с пружинно-винтовым каналом, выполненным из элементов вида овоид

Аннотация

Постановка задачи. Целью настоящего исследования является построение математической модели теплообменного аппарата, теплообменный элемент которого выполнен из проволоки с поперечным сечением в виде овоида.

Авторами также, на базе рассматриваемых теплообменных элементов, предложены три варианта эффективных аппаратов теплообменника – цилиндрической, конической и сферической форм.

Данная работа является продолжением наметившихся научных исследований, касающихся создания инновационных теплообменных аппаратов, отличающихся высокими теплодинамическими показателями.

Результаты. Основные результаты исследования состоят в том, что авторам удалось с использованием аналитической и дифференциальной геометрии математически описать сложную поверхность теплообменного элемента и предложить уравнение для определения площади поверхности теплообмена, что позволит в дальнейшем проводить теоретическое обоснование применения предложенных поверхностей.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что теплообменные аппараты, разработанные авторами, позволяют, в значительной степени интенсифицировать процесс теплообмена по сравнению с существующими аналогами, что является актуальным для систем отопления, горячего водоснабжения при создании жилищных комплексов, отвечающих современным требованиям экономии энергетических и тепловых ресурсов.

Ключевые слова: математическое моделирование, гидромеханика, теплообмен, пружинно-витой канал, овоид, интенсификация теплообмена.

Введение

В настоящее время в России на долю промышленного теплопотребления приходится более 50 % от всего количества произведённых топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). К числу более крупных потребителей ТЭР относятся предприятия и производственные комплексы энергетики, металлургической, нефтяной, пищевой промышленности, а также ЖКХ (в системах отопления, горячего водоснабжения и кондиционирования воздуха), где основную массу теплообменного оборудования составляют водо-водяные змеевиковые ёмкостные и кожухотрубные паровые теплообменники, проработавшие в системе ЖКХ более 20 лет.

Доля же теплообменного оборудования в структуре ведущих отраслей промышленности составляет порядка 70 %, где в большинстве случаев используются теплообменные аппараты с гладкотрубными теплообменными элементами, имеющими высокий уровень физического износа (до 60-70 %), вследствие длительного срока их эксплуатации (50-60 лет).

Эта проблема наблюдается в целом ряде важных секторов промышленности, а также в тепловых сетях и источниках энергоснабжения, среди которых ТЭЦ, ТЭС, ГРЭС

и крупные районные котельные, обслуживающие как жилые, так и производственные здания и сооружения.

В связи с этим остро встают вопросы, связанные с совершенствованием теплообменного оборудования, его реконструкцией и модернизацией, что порой является практически единственным способом повышения экономичности современных энергоустановок [1, 2].

Существенной экономии материальных и энергетических ресурсов на промышленных предприятиях можно добиться путем разработки и применения энергосберегающих теплотехнических систем, интенсификации технологических процессов и повышения эффективности и единичной мощности теплообменного оборудования [1, 3-5].

Однако, прежде, чем предложить такого рода оборудование, необходимо провести обоснование его использования, оценить эффективность его работы по сравнению с уже имеющимися аналогами. С этой целью нами проведено теоретическое исследование, в основу которого легли методы математического моделирования, что является одним из важных направлений решения физических задач. Это, в большей степени, обусловлено тем, что для использования того или иного физического объекта на практике, необходимо провести ряд стендовых экспериментов, на физической модели, воспроизводящей основные геометрические, физические, динамические и функциональные характеристики оригинала. Однако, в ряде случаев, эти эксперименты влекут за собой большие финансовые и временные затраты. Поэтому, в настоящее время в научных исследованиях специалистами отдается предпочтение математическому моделированию.

В связи с этим нами проводится теоретическое исследование целесообразности применения предложенных теплообменных аппаратов, проточная часть которых выполнена в виде цилиндрических, конических и сферических пружинно-витых каналов [1, 6].

Отметим, что в ранних работах [3, 7-9] рассматривались математические модели пружинно-витых каналов, выполненных из проволоки круглого сечения, спиральные выступы которой на наружной и внутренней поверхностях пружинно-витого канала выполняют роль внутреннего и внешнего оребрения, увеличивая, тем самым, площадь теплообменной поверхности в 1,5-1,7 раза. Такая поверхность способствует интенсификации теплообмена при умеренном росте потерь энергии на прокачивание теплоносителя. Однако, в процессе исследований [3], был отмечен процесс затухания циркуляционных токов вдоль проточной части каналов. Для исключения такого явления в проточной части теплообменного элемента, как правило, устанавливают интенсификаторы, выполненные в виде выступов и впадин различной конфигурации.

Нами в качестве теплообменных элементов предложено использовать пружинно-витой канал, выполненный из элементов, сечение которых является овоид жестко скрепленных лазерной сваркой (рис. 1). Острые концы элементов направлены внутрь канала, при этом выступы выполняют роль оребрения. Интерес авторов к пружинно-витым каналам обусловлен также и тем, что интенсификация теплообмена в каналах с турбулизаторами потока позволяет уменьшить минеральные отложения на внутренней поверхности примерно в пять раз по сравнению с гладкими трубами [3], которые приводят к существенному снижению теплоотдачи через стенки проточной части теплообменного аппарата.

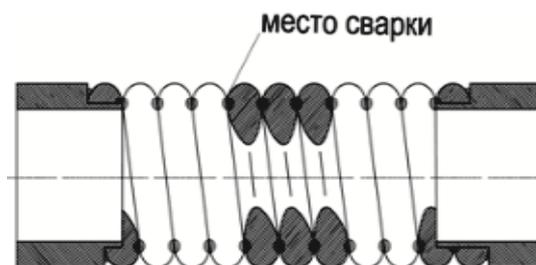


Рис. 1. Элемент пружинно-витого канала

В связи с этим представляет практический интерес развитие научных исследований в области создания инновационных пружинно-витых каналов [3].

Нами предлагается пружинно-витой канал, в сечении элементов которого овоид, расположить вокруг цилиндрического, конического и сферического областей, так, например, как на рис. 2.



Рис. 2. Пружинно-витой канал, выполненный на конус

Отметим, что змеевиковые теплообменники в форме шара ранее рассматривались авторами, где пружинно-витые каналы выполнены из проволоки круглого сечения [6].

Нами предложена конструкция таких теплообменников, пружинно-витой канал, которого выполнен в виде овоида, имеющего большую площадь теплообмена. На рис. 3 представлены конструкции компактных теплообменных аппаратов сферической формы для установки их в помещения малых объемов. Интерес к теплообменным приборам, обладающим высокой эффективностью и компактностью, описан и в работах [11-15].

Таким образом, создание инновационных теплообменных аппаратов, предлагаемого класса, является актуальным и перспективным направлением для практической реализации.

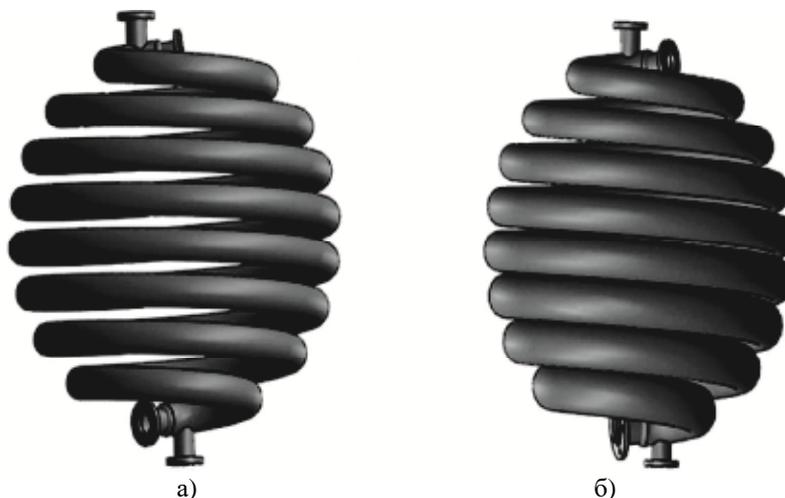


Рис. 3. Змеевиковый теплообменник в форме шара с теплообменными элементами в виде пружинно-витых каналов: а) из цилиндрических труб; б) из труб на конус

Теоретическая часть

Рассмотрим пружинно-витой канал, витки которого выполнены из проволоки сечения вида овоида (рис. 4). Технология изготовления аналогичных труб изложена в работе [10]. Такая технология исключает явление наклепа при получении дискретно-шероховатых труб методом накатки.

Вначале определим вид уравнения овоида. Для этого рассмотрим способ его построения, представленный на рис. 4. Опуская вспомогательные преобразования, запишем неявные уравнения замкнутой дуги его.

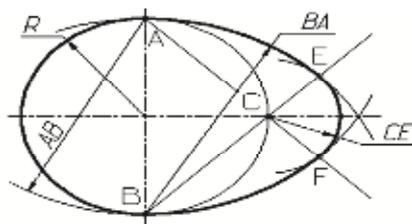


Рис. 4. Овоид

Уравнения замкнутой дуги овоида имеют вид:

$$\begin{aligned} x^2 + y^2 &= R^2, \text{ при } (x, y) \in \overline{AB}; \\ x^2 + (y + R)^2 &= 4R^2, \text{ при } (x, y) \in \overline{AE}; \\ (x - R)^2 + y^2 &= (2 - \sqrt{2})^2 R^2, \text{ при } (x, y) \in \overline{EF}; \\ x^2 + (y - R)^2 &= 4R^2, \text{ при } (x, y) \in \overline{BF}. \end{aligned}$$

Координаты точек сопряжения овоида A, B, E, F на плоскости следующие:

$$A(0; R), B(0; -R); E(\sqrt{2}R; R\sqrt{3 - 2\sqrt{2}}); F(\sqrt{2}R; -R\sqrt{3 - 2\sqrt{2}}).$$

В явном виде уравнение овоида задается:

$$y = F(x) = \begin{cases} \pm\sqrt{R^2 - x^2}, x \in [-R; 0], \\ \mp(R - \sqrt{4R^2 - x^2}), x \in (0; \sqrt{2}R), \\ \pm\sqrt{(2 - \sqrt{2})^2 R^2 - (x - R)^2}, x \in [\sqrt{2}R; (3 - \sqrt{2})R]. \end{cases} \quad (1)$$

Если предположить, что центр овоида находится в пространственной точке с координатами $O'(x_0; y_0; z_0)$, тогда любая точка на овоиде будет иметь координаты $M(x-x_0; F(x-x_0); z-z_0)$, где $F(x)$ определяем из формулы (1).

Исследуемый нами канал представляет собой винтовую линию, как ось центров овоида, в нормальных поверхностях которой задаются овоиды (рис. 4), острые концы которых направлены внутрь винтовой линии.

Уравнение винтовой линии определяется по известным формулам:

$$l: \begin{cases} x = acost \\ y = asint. \\ z = 2Rt \end{cases} \quad (2)$$

Касательный вектор к линии (2), есть вектор, являющийся первой производной вектора винтовой линии $\vec{r}(t)$. Имеем:

$$\begin{aligned} \vec{r}(t) &= acost\vec{i} + asint\vec{j} + 2Rt\vec{k}, \\ \vec{r}'(t) &= -asint\vec{i} + acost\vec{j} + 2R\vec{k}. \end{aligned}$$

При каждом значении параметра винтовой линии (2) t зададим нормальную плоскость, в которой построим овоид. Уравнение нормальной плоскости запишем в виде:

$$P_i: -asintX + acostY + 2RZ - 4R^2t = 0. \quad (3)$$

В плоскости (3) зададим координатные оси вдоль векторов $\vec{u}(t)$ и $\vec{v}(t)$, координаты последнего определим из условия ортогональности векторов $\vec{r}'(t), \vec{u}(t)$ и $\vec{v}(t)$. Начало координат совпадает с точками $O_i'(acost; asint; 2Rt)$. Покажем, что векторы $\vec{r}'(t), \vec{u}(t)$ перпендикулярны. Имеем $\vec{u}(t) = acost\vec{i} + asint\vec{j}$, тогда скалярное произведение векторов:

$$\vec{r}'(t) \cdot \vec{u}(t) = -a^2 costsint + a^2 costsint \equiv 0.$$

$$\vec{v}_i = \vec{u}_i \times \vec{r}'(t) = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ acost & asint & 0 \\ -asint & acost & 2R \end{vmatrix} = 2Rasint\vec{i} - 2Racost\vec{j} + a^2\vec{k}.$$

Таким образом, в системе координат UO_iV овоид описывается в явном виде через функцию:

$$v(t) = F(u(t)) = \begin{cases} \pm\sqrt{R^2 - u(t)^2}, u(t) \in [0; R], \\ \mp(R - \sqrt{4R^2 - u(t)^2}), u(t) \in (-\sqrt{2}R; 0), \\ \pm\sqrt{(2 - \sqrt{2})^2 R^2 - (u(t) - R)^2}, u(t) \in [-(3 - \sqrt{2})R; -\sqrt{2}R], \end{cases} \quad (4)$$

где система координат UO_1V имеет взаимно однозначное соответствие с декартовой системой координат XOY , которое определяется следующим образом:

$$\begin{cases} u(t) = acost \cdot x + asint \cdot y \\ v(t) = 2aRsint \cdot x - 2aRcost \cdot y \\ \begin{cases} x = a^{-1}cost \cdot u(t) - (2aR)^{-1}sint \cdot v(t) \\ y = -a^{-1}sint \cdot u(t) - (2aR)^{-1}cost \cdot v(t) \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

Тогда точка на поверхности пружинно-витого канала, имеет координаты $M(u(t);v(t);4R^2t+a/(2R)(xsint-ycost))$, где $v(t)$ из формулы (4), а x , из формулы (5).

Следующая поверхность представляет собой поверхность, образованную движением вдоль винтовой конической линии, подобной той, которая представлена на рис. 5, как оси центров овоидов, острые концы которых направлены внутрь винтовой конической линии.

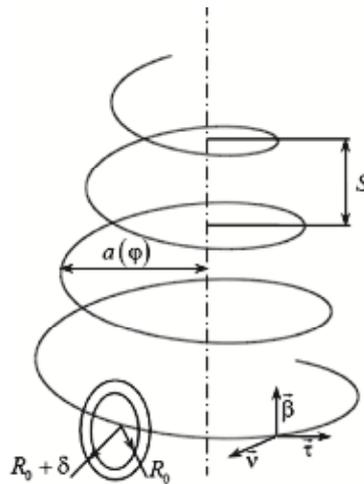


Рис. 5. Винтовая коническая линия

При этом уравнение такой винтовой линии задается:

$$l: \begin{cases} x = (a - kt)cost \\ y = (a - kt)sint, \\ z = 2Rt \end{cases} \quad (6)$$

где k – угловой коэффициент направляющей конической поверхности, вдоль которой идет винтовая линия. Тогда, принимая во внимание, что радиус $a=a(t)=a-kt$ описание конического пружинно-витого канала будет полностью соответствовать формулам (4)-(5).

Третий вариант поверхности – это пружинно-витой канал, направленный около сферической поверхности. В этом случае винтовая линия, скользящая по сфере опишется следующим уравнением:

$$l: \begin{cases} x = \sqrt{A^2 - 4R^2t^2}cost \\ y = \sqrt{A^2 - 4R^2t^2}sint, \\ z = 2Rt \end{cases} \quad (7)$$

где A – заданный радиус сферы.

Тогда, полагая в этом случае, что $a = a(t) = \sqrt{A^2 - 4R^2t^2}$, описание сферического пружинно-витого канала будет также полностью соответствовать формулам (4)-(5).

Обобщая все вышеизложенные математические выкладки, можем утверждать, что формулы (4)-(5) являются общими для описания класса пружинно-витых каналов, расположенных вдоль поверхностей, произвольной осесимметричной формы.

Следовательно, для вычисления поверхности пружинно-витого канала, а также цилиндрического, конического и сферического каналов, будет соответствовать формула:

$$S_{нов} = 2 \int_{t_1}^{t_2} dt \int_{-(3-\sqrt{2})R}^R \sqrt{1 + (F'(u(t)))^2} du(t). \quad (8)$$

Таким образом, вычисляя по формуле (8) поверхность теплообмена и, сравнивая ее с цилиндрическими или с пружинно-витыми с круглыми сечениями, получаем очевидное

преимущество, предложенных нами, поверхностей. Так, например, длина замкнутой дуги овоида на 43,5 % больше длины дуги окружности того же радиуса. Следовательно, поверхность теплообмена при одинаковой длине канала будет увеличена, это приведет к увеличению коэффициента теплопередачи, что, в свою очередь, повлечет снижение металлоемкости теплообменного аппарата.

Заключение

Авторами предложено математическое описание трех поверхностей, в виде пружинно-витых каналов, направленных вдоль цилиндрического, конического и сферического объемных тел вращения. Сечение элементов пружинно-витого канала выполнено в виде овоида, центр которого движется по винтовой линии. Приведенная математическая модель является общей для пружинно-витых каналов с сечением в виде овоид, направленных вдоль любых осесимметричных объемных тел вращения. Показано, что данная конфигурация сечения обладает большей поверхностью теплообмена по сравнению с круглыми каналами такого же радиуса.

Следовательно, значимость полученных авторами результатов очевидна для разработки и создания эффективного теплообменного оборудования в строительной сфере, в ЖКХ, в системах отопления, горячего водоснабжения, что отвечает задачам экономии энергетических и других ресурсов. Поэтому, использование предложенных авторами каналов, позволят значительно повысить эффективность теплообменного оборудования, а также увеличат области для их применения. Вместе с тем, за счет увеличения поверхности теплообмена можно примерно в 1,5 раза уменьшить длину проточной части теплообменника, сделав его компактным.

Список библиографических ссылок

1. Багоутдинова А. Г., Вачагина Е. К., Золотонос Я. Д. Змеевиковые теплообменники. Моделирование, расчет. Казань : КГАСУ, 2016. 245 с.
2. Крутова И. А. Экономическая эффективность модернизации теплообменного оборудования за счет замены гладкостенных теплообменных элементов на пружинно-витые каналы : сб. ст. Общество, наука, инновации (НПК-2016) / Киров, 2016. С. 3258–3263.
3. Евсеев Е. С., Золотонос А. Я., Золотонос Я. Д. Высокоэффективные теплообменные аппараты на базе теплообменных элементов в виде пружинно-витых труб // Труды Академэнерго. 2008. № 4. С. 18–33.
4. Heat pipe : пат. 7115227 США. 2006.
5. Method of heat extraction using a heat pipe : заяв. пат. 11530658 США. 2007.
6. Золотонос Я. Д., Вачагина Е. К., Крутова И. А., Багоутдинова А. Г. КГАСУ. Казань, 2017. 181 ил. Библ. 131 назв. Деп. ВИНТИ № 91 В2017 от 25.08.2017.
7. Долгов А. Н., Золотонос А. Я., Золотонос Я. Д. Определение коэффициентов теплопередачи через стенку пружинно-витых каналов теплообменных аппаратов // Труды Академэнерго. 2008. № 3. С. 13–25.
8. Антонов С. Ю., Антонова А. В., Золотонос Я. Д. Определение коэффициентов теплопередачи через стенку эллиптически гладких и пружинно-витых каналов теплообменных аппаратов // Известия КГАСУ. 2009. № 1 (11). С. 158–164.
9. Багоутдинова А. Г., Вачагина Е. К., Золотонос Я. Д. Математическое моделирование поверхностей теплообмена пружинно-витых каналов // Известия КГАСУ. 2017. № 3 (41). С. 146–157.
10. Полезная модель, секционный змеевиковый теплообменник : пат. 173387 Рос. Федерация № 2016144790, заявл. 15.11.2016 ; опубл. 24.08.17 ; бюл. № 24.
11. Kakac S., Liu H., Pramuanjaroenkij A. Heat exchangers: selection, rating, and thermal design : CRC press, 2012.
12. Попов И. А., Махьянов Х. М., Гуреев В. М. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена. Казань : Центр инновационных технологий, 2009. 560 с.

13. Астановский Д. Л., Астановский Л. З. Новая конструкция теплообменного аппарата // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2003. № 4. С. 13–15.
14. Костюков А. В., Алексеев Р. А. Повышение эффективности роторного теплообменника малоразмерного газотурбинного двигателя // Известия МГТУ МАМИ. 2012. № 1 (13). С. 52–58.
15. Хабибуллин Ю. Х., Барышева О. Б. Энергосберегающий регулятор расхода воздуха // Известия КГАСУ. 2013. № 1 (23). С. 150–153.

Zolotonosov Yakov Davidovich

doctor of technical sciences, professor

E-mail: zolotonosov@mail.ru

Gorskaya Tatyana Yurievna

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: tatyana_gorskaya@mail.ru

Martynov Petr Olegovich

post-graduate student

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

A mathematical model of the heat exchanger with a spring-twisted channel made of elements of ovoid**Abstract**

Problem statement. The aim of this study is to build mathematical models of heat exchanger, the heat exchange element which is made of wire with cross section in the form of ovoid.

The authors also offered two options efficient devices heat exchanger – cylindrical and conical shapes, considered on the basis of heat-exchange elements/

This work is a continuation of the emerging scientific research regarding the creation of innovative heat exchangers, characterized by high thermal dynamic properties.

Results. The main results of the study are that the authors were able, using analytical and differential geometry mathematically describe the complex surface of the heat exchange element, which will continue to carry out theoretical substantiation of application of the proposed surfaces.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry is that heat exchangers developed by the authors, including in this article, allow, to a large extent, to intensify the heat exchange process in comparison with existing analogues, which is relevant for heating systems, hot water supply for consumers in the housing and communal services system, in urban development, in the creation of housing complexes that meet the challenges of saving energy and other resources.

Keywords: mathematical modeling, hydromechanics, heat exchange, spring-twisted channel, ovoid, intensification of heat transfer.

References

1. Bagoutdinova A. G., Vachagina E. K., Zolotonosov Ya. D. Coil heat exchangers. Modeling, calculation. Kazan : KGASU. 2016. 245 p.
2. Krutova I. A. Economic efficiency of modernization of heat-exchange equipment by replacing the smooth-walled heat transfer elements on the spring-twisted channels : dig. of art. Society, science and innovation (TS-2016), Kirov, 2016. P. 3258–3263.
3. Evseev E. S., Zolotonosov A. J., Zolotonosov Ya. D. Highly efficient heat transfer devices based on heat-exchange elements in the form of spring-twisted pipe // Trudy academenergo. Kazan. 2008. № 4. P. 18–33.
4. Heat pipe : pat. 7115227 USA. 2006.

5. Method of heat extraction using a heat pipe : stated. pat. 11530658 USA. 2007.
6. Zolotonosov Ya. D., Vachagina E. K., Krutova I. A., Bagoutdinova A. G. KGASU. Kazan, 2017. 181 ll. Bibl. 131 the name. DEP. VINITI № 91 B2017 from 25.08.2017.
7. Dolgov A. N., Zolotonosov A. I., Zolotonosov Ya. D. Determination of coefficient of heat transfer through the wall of spring-twisted channels of heat exchangers // Trudy academenergo. 2008. № 3. P. 13–25.
8. Antonov S. Yu., Antonov A. V., Zolotonosov Ya. D. Determination of the coefficients of heat transfer through the wall is elliptically smooth and spring-twisted channels of heat exchangers // Izvestiya KGASU. 2009. № 1 (11). P. 158–164.
9. Bagoutdinova A. G., Vachagina E. K., Zolotonosov Ya. D. Mathematical modeling of the heat transfer surfaces of spring-twisted channels // Izvestiya KGASU. 2017. № 3 (41). P. 146–157.
10. Utility model sectional coil heat exchanger: patent 173387 of the Rus. Federation 2016144790, Appl. 15.11.2016 ; publ. 24.08.17 ; bull. № 24.
11. Kakac S., Liu H., Pramuanjaroenkij A. Heat exchangers: selection, rating, and thermal design : CRC press, 2012.
12. Popov I. A., Makhyanov Kh. M., Gureev V. M. Physical basis and industrial application of heat exchange intensification. Kazan : Center for Innovative Technologies, 2009. 560 p.
13. Astanovsky D. L., Astanovsky L. Z. A new design of a heat exchange apparatus // Chemical and oil and gas engineering. 2003. № 4. P. 13–15.
14. Kostyukov A. V., Alekseev R. A. Improving the efficiency of rotary heat exchanger of small gas turbine engine // Proceedings of the MSTU MAMI. 2012. № 1 (13). P. 52–58.
15. Khabibullin Y. C., Barysheva O. B. Energy-Saving control of air flow // Izvestiya KGASU. 2013. № 1 (23). P. 150–153.