

УДК 532.5:621.694:519.6

Мартынов Петр Олегович

аспирант

Горская Татьяна Юрьевна

кандидат технических наук, доцент

E-mail: gorskaya0304@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

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

Золотонос Яков Давидович

доктор технических наук, профессор, директор

E-mail: zolotonosov@mail.ru

ООО «Прогресс»

Адрес организации: 420137, Россия, г. Казань, ул. Чуйкова, д. 71

Определение эквивалентного диаметра трубного и межтрубного пространства в аппарате с винтовым теплообменным элементом, выполненного из проволоки в виде овоида

Аннотация

Постановка задачи. Целью настоящей работы является вычисление эквивалентного диаметра трубного и межтрубного пространства в теплообменном аппарате, теплообменный элемент которого выполнен путём намотки с последующей лазерной сваркой проволоки, поперечное сечение которой имеет вид овоида.

Авторами ранее, на базе рассматриваемых теплообменных элементов, предложены три варианта эффективных аппаратов. Теплообменники с рабочими каналами цилиндрической, конической и сферической форм.

Данная работа является продолжением научных исследований авторов по созданию компактных теплообменных аппаратов большой единичной мощности.

Результаты. Основные результаты исследования состоят в том, что авторам удалось вычислить эквивалентный диаметр трубы, выполненной в виде витого пружинного канала, осевое сечение которого сложной геометрической формы. Используя элементы дифференциальной геометрии, авторам удалось аналитически представить выражение, необходимое для определения эквивалентного диаметра. Для этого в явном виде получены уравнения для определения площади поверхности теплообмена и объема трубного пространства.

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: эквивалентный диаметр, гидромеханика, теплообмен, пружинно-витой канал, овоид.

Введение

Известно, что одним из основных показателей, используемых в расчетах теплообменного оборудования, является эквивалентный диаметр [1]. Вычисление его особенно актуально, когда канал теплообмена имеет сложную форму и величина диаметра неочевидна из-за сложной конструкции проточной части аппарата [2]. Как правило, используют понятия гидравлический диаметр, получаемый как частное от деления площади проточной части канала на смоченный периметр. Так, для круглого канала это половина диаметра трубы, т.е. радиус трубы, а эквивалентный диаметр равен четырем радиусам. Поэтому для вычисления его используют формулу $d_{eqv} = 4S/p$, либо эквивалентную ей $d_{eqv} = 4V/F$, где V – объем трубного пространства, а F – площадь смоченной поверхности.

Однако, в настоящее время конфигурации проточных частей теплообменных элементов настолько сложны, что вычисление эквивалентного диаметра затруднительно, ввиду сложности вычисления объема и площади внутренней поверхности трубы. Так как для интенсификации теплообмена к проточной части канала теплообменника используют различные интенсификаторы, например, винтовые каналы, что делает процесс их математического описания сложным [3-8].

Так, авторами было предложено использовать в теплообменном оборудовании пружинно-витые, витые трубы [3] (рис. 1). Оценка эффективности использования витых каналов, круглого сечения показано в работе [7, 8], затем, в работе Золотоносова Я.Д., Антонова С.Ю., Антоновой А.В., эллиптического сечения. Далее, развивая исследования в этом направлении, было предложено использовать витые каналы, выполненные из проволоки сечения вида овоид [9-12], математическое описание которых предложено в работе [11].



Рис. 1. Элемент пружинно-витого канала (иллюстрация авторов)

В целях оценки эффективности теплообменника типа «трубу в трубе» с теплообменным элементом, выполненным из проволоки сечением в виде овоида, была разработана установка и методика его экспериментальных исследований (рис. 2). Результаты эксперимента, как известно, обобщаются критериальными уравнениями, в которых в качестве определяющего параметра служит эквивалентный диаметр. В связи с этим возникла необходимость его вычисления. Авторами предложен алгоритм определения эквивалентного диаметра витого канала из проволоки сечением в виде овоид.

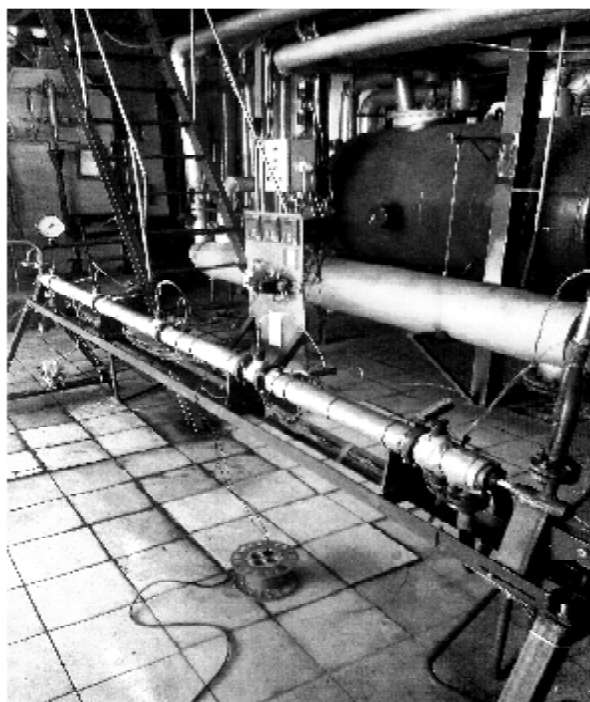


Рис. 2. Экспериментальная установка (общий вид) (иллюстрация авторов)

Теплообменник типа «труба в трубе» состоит из внешней трубы, выполненной из нержавеющей стали диаметром 64 мм. Длина трубы равна 3000 мм с толщиной стали 4 мм.

Поверхность внешней трубы двухслойно изолировалась асбестовым шнуром и дополнительно покрывалась термостойкой полимерной пленкой. Внутренний теплообменный элемент аппарата выполнен из нержавеющей стали в виде витой трубы, выполненной из проволоки в виде овоида, длиной 2920 мм и толщиной стенки 2,0 мм.

Холодная вода из уравнительной емкости, снабженной переливом и перемешивающим устройством, обеспечивающим равномерное распределение температуры жидкости в емкости, пройдя входной патрубком и успокоительную решетку, поступала в трубу с витой поверхностью теплообмена.

Выход горячей воды из витой трубы осуществлялся через выходной патрубок. В противоток холодной воде, через входной патрубок из паропровода заводской котельной с давлением 3,2 ат и температурой 133,8° С подавался насыщенный водяной пар, который пройдя межтрубное пространство через выходной патрубок, отводился из аппарата.

Для поддержания постоянства температуры воды в уравнительной емкости, установлены ТЭНы и терморегуляторы. Расход воды и пара замерялся с помощью диафрагм ДКС 06-20, укомплектованных измерительными приборами САПФИР 22Д модели 2430 погрешностью $\pm 0,25\%$, блоками питания, преобразования и корнеизвлечения БПК-40М. Показания расхода подавались на 8 канальное устройство контроля сигнала с преобразователя САПФИР 22Д с унифицированным выходным сигналом тока 4...20 мА – погрешностью $\pm 0,5\%$.

Для замера давления воды на входе в витую трубу использовался преобразователь МИДА-ДИ-13П с пределом измерения 0...0,6 МПа и погрешностью $\pm 0,5\%$ с выходом на многоканальное устройство контроля УКТ38-Щ4-АН. На выходе давление воды и пара контролировалось образцовым манометром модель 1227 класс точности 0,25.

Для измерения температур воды использовались девять железноконстантановых термоэлектрических преобразователей КТЖК-0299-03 классом допуска 1. Термоэлектрические преобразователи устанавливались в просверленных отверстиях витой трубы, затем пропаивались, а свободный конец жестко фиксировался в штуцерах, приваренных к стенкам внешней трубы. Замер температуры пара осуществлялся в центре межтрубного пространства четырьмя термоэлектрическими преобразователями КТЖК-0299-03 классом допуска 1.

Температура воды и пара из теплообменника измерялась поверхностными термопарами КТЖК модификации 02.18 классом допуска 1.

Кроме того, температуры воды и пара на выходе дополнительно замерялись термометром расширения ртутного типа со шкалой до 120°С и ценой деления 0,1°С для воды и шкалой до 200°С ценой деления 0,1°С для пара.

Измерение температуры воды в центральной части витой трубы проводилось скользящим спаем, изготовленным из термоэлектрического провода градуировки КТЖК диаметром 1,5 мм, введенного через отверстие торцевого сальникового уплотнения в центральной части витой трубы. Перемещение скользящего спая позволяет сканировать параметры температуры вдоль оси проточной части витой трубы.

При достижении стационарного режима работы установки, который в эксперименте считался достигнутым после 3-4 кратной смены объемов воды и пара проточной части каналов, проводились экспериментальные исследования с замерами температуры воды и пара

Следует отметить, что начало последующего эксперимента осуществлялось после полного охлаждения проточной части каналов предыдущего эксперимента, который устанавливался по значению температуры воды в емкости, определяемой по показанию ртутного термометра.

При заданных расходах воды и пара замерялись значения давления воды на входе и выходе витой трубы, а также температуры внешней и внутренней стенок теплообменного элемента. Температура на входе была постоянной, равная 16°С.

Вычисление эквивалентного диаметра

Поверхность винтовой трубы образована движением овоида, острая часть которого направлена внутрь трубы, а центр скользит по винтовой линии. Функция, задающая

овоид, в нормальных плоскостях к винтовой линии имеет выражение, представленное в работе [8]:

$$v = F(u) = \begin{cases} \pm \sqrt{R^2 - (u - a)^2}, u \in [a, a + R] \\ \pm (R - \sqrt{4R^2 - (u - a)^2}), u \in (a - \sqrt{2}R; a) \\ \pm \sqrt{(2 - \sqrt{2})^2 R^2 - (u - a - R)^2}, u \in [a - (3 - \sqrt{2})R; a - \sqrt{2}R] \end{cases}, \quad (1)$$

где переменные u, v изменяются в нормальных плоскостях, a – радиус цилиндра, по которому скользит винтовая линия, R – радиус овоида.

Если рассмотреть осевое сечения вдоль оси OZ винтового канала, понятно, что овоиды располагаются под углом α к горизонтальной оси OX . Очевидно, что справедливо представление $tg\alpha = R/a$. Кроме того, система координат UOV образована поворотом системы координат XOZ на угол α и определяется системой:

$$\begin{cases} u = xc\cos\alpha - zs\sin\alpha \\ v = xs\sin\alpha + zc\cos\alpha \end{cases}$$

Для нахождения объема трубного пространства и внутренней поверхности, омываемой жидкостью, рассмотрим «тор», наклоненный под углом α , состоящий из одного полного витка пружины сечения овоид. Для этого в системе координат XOZ опишем функции, задающие верхнюю дугу овоида. После последовательного преобразования функции из уравнения (1) получим представление для верхних дуг овоида:

$$z = \begin{cases} -as\sin\alpha + \sqrt{R^2 - (x - ac\cos\alpha)^2}, x \in [a_1; a_2] \\ -Rc\cos\alpha - as\sin\alpha + \sqrt{4R^2 - (x + Rs\sin\alpha - ac\cos\alpha)^2}, x \in (a_3; a_4) \\ -(a + R)s\sin\alpha + \sqrt{(2 - \sqrt{2})^2 R^2 - (x - (a + R)c\cos\alpha)^2}, x \in [a_5; a_3] \end{cases},$$

Здесь для удобства описания обозначили через:

$$\begin{aligned} a_1 &= ac\cos\alpha, a_2 = (a + R)c\cos\alpha + Rs\sin\alpha, a_3 = (a - \sqrt{2}R)c\cos\alpha + (\sqrt{2} - 1)Rs\sin\alpha, \\ a_4 &= Rs\sin\alpha + ac\cos\alpha, a_5 = (a - (3 - \sqrt{2})R)c\cos\alpha. \end{aligned}$$

Для вычисления эквивалентного диаметра используем формулу:

$$d_3 = \frac{4V_{\text{вн}}}{S_{\text{нов}}}, \quad (2)$$

где $V_{\text{вн}}$ – внутренний объем одного витка «тора», образованного вращением замкнутой кривой $z(x)$ вдоль оси OZ . $S_{\text{нов}}$ – площадь внутренней поверхности одного витка «тора», образованного вращением на 360° кривой $z(x)$ около OZ .

Известно, что:

$$V = 2p \int_{z_i}^{z_{i+1}} f^2(z) dz; S_{\text{нов}} = 4p \int_{z_i}^{z_{i+1}} f(z) \sqrt{1 + f'^2(z)} dz. \quad (3)$$

Однако, ввиду малости угла α , $\cos\alpha$ близок к единице, $\sin\alpha$ близок нулю, можно пренебречь наклоном, и считать объем и площадь внутренней поверхности с помощью описания:

$$z = f(x) = \begin{cases} -R + \sqrt{4R^2 - (x - a)^2}; x \in (a - \sqrt{2}R; a) \\ \sqrt{(2 - \sqrt{2})^2 R^2 - (x - (a + R))^2}; x \in [a - (3 - \sqrt{2})R; a - \sqrt{2}R] \end{cases}$$

Для нахождения объема и внутренней поверхности одного витка тора по формуле (3) необходимо определить функцию $x=f(z)$, обратную $z=g(x)$ верхней дуги овоида, очевидно, что:

$$\begin{aligned} x &= g_1(z) = (a + R) + \sqrt{(2 - \sqrt{2})^2 R^2 - z^2}, 0 \leq z \leq (\sqrt{2} - 1)R, \\ x &= g_2(z) = a + \sqrt{4R^2 - (z + R)^2}, (\sqrt{2} - 1)R \leq z \leq R. \end{aligned}$$

Найдем также производные этих функций:

$$g'_1(z) = \frac{-z}{\sqrt{(2 - \sqrt{2})^2 R^2 - z^2}}, g'_2(z) = \frac{-(z + R)}{\sqrt{4R^2 - (z + R)^2}}$$

Далее, после подстановки функций и их производных в интегралы (3), с учетом свойств интегралов, получаем искомую величину объема в виде:

$$V = 2\pi \left((a+R)^2 + (2-\sqrt{2})^2 R^2 \right) \cdot (\sqrt{2}-1)R + 2\pi(a+R) \cdot (2-\sqrt{2})^2 R^2 \times \\ \times \left\{ \arcsin \frac{(\sqrt{2}-1)}{(2-\sqrt{2})} + \frac{(\sqrt{2}-1)}{(2-\sqrt{2})} \sqrt{1 - \left(\frac{(\sqrt{2}-1)}{(2-\sqrt{2})} \right)^2} \right\} - \\ - \frac{2\pi}{3} R^3 + 2\pi(a^2 + 4R^2)(2-\sqrt{2})R + \\ + 2\pi a \cdot 4R^2 \left\{ \frac{\pi}{6} - \arcsin \frac{(\sqrt{2}-1)}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 - \left(\frac{1}{2} \right)^2} - \frac{\sqrt{2}-1}{2} \sqrt{1 - \left(\frac{\sqrt{2}-1}{2} \right)^2} \right\}. \quad (4)$$

Искомую величину площади, омываемой поверхности одного витка «тора», получили в виде:

$$S_{нов} = 8\pi R \left(a \frac{\pi}{4} + (2-\sqrt{2})R \right) + 4\pi R(2-\sqrt{2}) \times \\ \times \left\{ (a+R) \arcsin \frac{(\sqrt{2}-1)}{(2-\sqrt{2})} + (\sqrt{2}-1)R \right\}. \quad (5)$$

Подставляя выражения (4)-(5) в формулу (2), получаем искомый диаметр.

Эквивалентный диаметр межтрубного пространства

Для нахождения эквивалентного диаметра межтрубного пространства воспользуемся известной формулой: $d_{eqv} = 4V_0/S_0$, где V_0 – объем межтрубного пространства, S_0 – площадь смоченной поверхности. Для этого зададим функцию, определяющую внешнюю границу тора:

$$x = g_3(z) = a + \sqrt{R^2 - z^2}, 0 \leq z \leq R, \\ g'_3(z) = \frac{-z}{\sqrt{R^2 - z^2}}, \\ V_1 = 2\pi a^2 R + \frac{4\pi}{3} R^3 + \frac{(\pi R)^2}{2}. \quad (6)$$

$$S_1 = 4\pi R \left(a \frac{\pi}{2} + R \right). \quad (7)$$

Для вычисления площади воспользуемся формулой: $S_0 = 2\pi R_1 l$, R_1 – внешний радиус тора, $l = 2R$, S_0 – площадь поверхности внешней части «тора», вычисляемой по формуле (7). V_0 вычисляется по формуле: $V_0 = \pi R_1^2 l - V_1$, где V_1 – объем внешней части тора, вычисляемый по формуле (6).

Расчет эквивалентных диаметров в аппарате с витым каналом сечения в виде овоида

Зададим геометрические размеры установки (мм). Полагая $R=0,77$, $a=11,73$, $R_1=17,5$, и подставляя их в уравнения (4)-(7), вычисляем эквивалентный диаметр, равный $d_s=15,8$ мм, эквивалентный диаметр межтрубного пространства, равный $d_{eqv}=9,77$ мм.

Заключение

Рассчитанные в работе эквивалентные диаметры трубного и межтрубного пространств теплообменника типа «труба в трубе» могут быть использованы при проектировании и расчетах нового теплообменного оборудования.

Список библиографических ссылок

1. Pramod S., Mandar M., Raj K. Experimental investigation on heat transfer and pressure drop of conical coil heat exchanger with parameters tube diameter, fluid flow rates and cone angle // Thermal Science. 2016. V. 6. P. 2087– 2099.
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) / ВГУ. Киров, 2016. С. 3258–3263.
3. Gavade Pravin P., Prof. Kulkarni P. R. Experimental evolution of helical coil tube in tube heat exchanger // International Journal of Emerging Engineering Research and technology. 2015. V. 3. № 2. P. 12– 17.
 4. Mr. Vijay P. Desai, Dr. Sachin L. Bors. Experimental study on enhancement of thermal performance of wire wound tube in tube helical coil heat exchanger // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). 2013. V. 3. № 4. P. 340–346.
 5. Vinodkumar K. V., Tharakeshwar T. K. Improvement of heat transfer coefficients in a shell and helical tube heat exchanger using water Al_2O_3 // Nanofluid. International Research Journal of Engineering and technology (IRJET). 2015. V. 2. № 2. P. 213.
 6. Ma Y., Zhou Z., Wang J., Liu Y., Liang J. Design Optimization of tube-in-tube helical heat exchanger in JT refrigerator // International Cryocooler Conference, In. Boulder, CO. 2014. P. 415–423.
 7. 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.
 8. Золотонос Я. Д., Багоутдинова П. Г., Золотонос А. Я. Трубчатые теплообменники. Моделирование. Расчет. СПб. : Лань, 2018. 272 с.
 9. Модульный змеевиковый теплообменник : пат. 187878 Рос. Федерация. № 2018187892 ; заявл. 26.10.18 ; опуб. 21.08.19. Бюл. № 9.
 10. Теплообменный элемент : пат. 183882 Рос. Федерация. № 2018107037 ; заявл. 26.02.18 ; опуб. 8.10.18. Бюл. № 28.
 11. Мартынов П. О., Горская Т. Ю., Золотонос Я. Д. Математическая модель определения коэффициентов теплопередачи через стенку, составленную из элементов вида овоид // Вестник технологического университета. 2018. Том 21. № 5. С. 147–150.
 12. Варсегова Е. В., Посохин В. Н., Зиганшин А. М. К расчету потерь давления в местных сопротивлениях // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2016. № 5 (689). С. 63–70.

Martynov Petr Olegovich

post-graduate student

Gorskaya Tatyana Yurievna

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: gorskaya0304@mail.ru**Kazan State University of Architecture and Engineering**

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

Zolotonosov Yacov Davidovich

doctor of technical sciences, professor, director

E-mail: zolotonosov@mail.ru**LLC «Progress»**

The organization address: 420137, Russia, Kazan, Chuikova st., 71

Determination of the equivalent diameter of the pipe and intertubular space in the apparatus with a screw heat exchanger made of wire in the form of an ovoid**Abstract**

Problem statement. The aim of this work is to calculate the equivalent diameter of the tube and tube space in the heat exchanger, the heat exchange element of which is made by winding followed by laser welding of the wire, the cross section of which has the form of an ovoid.

Authors earlier offered three variants of effective devices on the basis of the considered heat exchange elements. Heat exchangers with working channels of cylindrical, conical and spherical shapes.

This work is a continuation of the authors' research on the creation of compact heat exchangers, large unit capacity.

Results. The main result of the study is that the authors were able to calculate the equivalent diameter of the pipe made in the form of a twisted spring channel, the axial section of which is of complex geometric shape. Using elements of differential geometry, the authors were able to analytically present the expression needed to determine the diameter. For this purpose, the equations for determining the surface area of heat exchange and the volume of the pipe space are obtained explicitly.

Conclusions. The significance of the results for the construction industry is that heat exchangers, developed by the authors, allow to significantly intensify the process of heat exchange in comparison with existing analogues, which is relevant for heating systems, hot water supply in the creation of housing complexes that meet modern requirements for saving energy and thermal resources.

Keywords: equivalent diameter, hydromechanics, heat exchange, spring-twisted channel, ovoid.

References

1. Pramod S., Mandar M., Raj K. Experimental investigation on heat transfer and pressure drop of conical coil heat exchanger with parameters tube diameter, fluid flow rates and cone angle // *Thermal Science*. 2016. V. 6. P. 2087–2099.
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), VSU. Kirov. 2016. P. 3258–3263.
3. Gavade Pravin P., Prof. Kulkarni P. R. Experimental evolution of helical coil tube in tube heat exchanger // *International Journal of Emerging Engineering Research and technology*. 2015. V. 3. № 2. P. 12–17.
4. Mr. Vijay P. Desai, Dr. Sachin L. Bors. Experimental study on enhancement of thermal performance of wire wound tube in tube helical coil heat exchanger // *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*. 2013. V. 3. № 4. P. 340–346.
5. Vinodkumar K. V., Tharakeshwar T. K. Improvement of heat transfer coefficients in a shell and helical tube heat exchanger using water Al_2O_3 // *Nanofluid. International Research Journal of Engineering and technology (IRJET)*. 2015. V. 2. № 2. P. 2087–2099.
6. Ma Y., Zhou Z., Wang J., Liu Y., Liang J. Design Optimization of tube-in-tube helical heat exchanger in JT refrigerator // *International Cryocooler Conference*, In. Boulder, CO. 2014. P. 415–423.
7. 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 Akademenergo*. 2008. № 4. P. 18–33.
8. Zolotonosov Ya. D., Bagoutdinova P. G., Zolotonosov A. Ya. Tubular heat exchangers. Modeling. Calculation. SPb. : Lan', 2018. 272 p.
9. Modular serpentine heat exchanger : patent 187878 of the Rus. Federation. № 2018187892 ; decl. 26.10.18 ; publ. 21.08.19. Bull. № 9.
10. Heat exchange element : patent 183882 of the Rus. Federation. № 2018107037 ; decl. 02.26.18 ; publ. 8.10.18. Bull. № 28.
11. Martynov P. O., Gorskaya T. Yu., Zolotonosov Ya. D. A mathematical model for determining heat transfer coefficients through a wall composed of elements of the ovoid type // *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2018. V. 21. № 5. P. 147–150.
12. Varsegova E. V., Posokhin V. N., Ziganshin A. M. To the calculation of pressure losses in local resistances // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Stroitel'stvo*. 2016. № 5 (689). P. 63–70.