



УДК 532.5:621.694

Багоутдинова А.Г. – кандидат технических наук

E-mail: bagoutdinova@rambler.ru

Золотонос Я.Д. – доктор технических наук, профессор

E-mail: zolotonosov@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

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

Князева И.А. – аспирант

E-mail: iraida_knyazeva@mail.ru

Вятский государственный университет

Адрес организации: 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36

Теплообменные аппараты типа «труба в трубе» с внутренним змеевиковым пружинно-витым каналом

Аннотация

В работе для решения задач энергосбережения и повышения эффективности змеевиковых теплообменных аппаратов предложен малогабаритный теплообменный аппарат типа «труба в трубе» с внутренним змеевиковым пружинно-витым каналом, а также уравнения, описывающие его теплообменную поверхность, записанные в векторно-параметрической форме с использованием фундаментальных положений аналитической и дифференциальной геометрии.

С целью проверки адекватности и визуализации записанных уравнений построены кривые и поверхности с использованием пакета прикладных программ Matlab.

Ключевые слова: теплообменные элементы, теплообменная поверхность, математическая модель, винтовая линия.

Змеевиковые теплообменники представляют собой корпус, в котором размещен змеевик или система змеевиков. Витки змеевика ориентированы по винтовой линии. Обычно такие теплообменники выполняются из труб 15...75 мм и имеют поверхность нагрева до 10...15 м². Диаметр таких змеевиков обычно составляет 200...2000 мм [1].

Вследствие большого объема корпуса, в котором находится змеевик, скорость жидкости незначительна, что обуславливает низкие значения коэффициента теплоотдачи снаружи змеевика.

Для интенсификации процессов теплообмена применяют мешалки или змеевик помещают в кольцевое пространство между двумя сосудами, в котором жидкость обтекает трубки с большой скоростью, но при этом значительно уменьшается полезно используемый объем корпуса аппарата [2].

В связи с этим нами предложена конструкция змеевикового теплообменника типа «труба в трубе» с внутренним змеевиковым пружинно-витым каналом [3, 4].

Теплообменник представляет собой аппарат с коаксиально установленными трубами, свальцованными в змеевик. Причем внутренняя труба выполнена в виде пружинно-витого канала круглого или эллиптического сечения, а внешняя – из гладкой цилиндрической трубы (рис. 1).

Во внутреннюю трубу змеевикового теплообменника подается вода, а в межтрубное пространство в противоток – насыщенный пар. При такой схеме движения жидкость движется по сложной траектории. Во-первых, по виткам проточной части внутреннего змеевика, где реализуется закрученное течение жидкости по внутренним впадинам пружинно-витого канала, и, во-вторых, по винтовой линии, определяемой витками самого змеевикового теплообменного элемента.

Пар, подаваемый в межтрубное пространство, из-за внешнего винтового оребрения внутреннего змеевика также совершает закрученное течение, характеризующееся сложной трехмерной вихревой структурой потока, благоприятно влияющее на теплообменные процессы, протекающие в межтрубном пространстве.



Рис. 1. Змеевиковый теплообменник

Однако широкое внедрение подобных аппаратов в производство сдерживается отсутствием фундаментальных исследований гидродинамики и теплообмена в проточной части змеевиковых пружинно-витых каналов, а также надежных методов их инженерного расчета.

Моделирование процессов гидродинамики и теплообмена предполагает описание поверхностей теплообмена. В работе [5] рассмотрен метод построения поверхности, образованной движением непрерывной замкнутой кривой $\rho = \rho(\varphi)$, вдоль некоторой криволинейной направляющей $\gamma: \vec{r} = \vec{r}(t)$. Согласно этому методу радиус-вектор точки поверхности представляется в виде суммы:

$$\vec{r}(t, \varphi) = \vec{r}(t) + \vec{\rho}(t, \varphi), \quad (1)$$

где φ – полярный угол в нормальной плоскости кривой γ , отсчитываемый от главной нормали по направлению к бинормали, $\vec{\rho}(t, \varphi)$ – соответствующий «полярный радиус».

Тогда:

$$\vec{\rho}(t, \varphi) = \rho(t, \varphi) \cos \varphi \cdot \vec{v}(t) + \rho(t, \varphi) \sin \varphi \cdot \vec{\beta}(t), \quad (2)$$

а

$$\vec{r}(t, \varphi) = \vec{r}(t) + \rho(t, \varphi) \cos \varphi \cdot \vec{v}(t) + \rho(t, \varphi) \sin \varphi \cdot \vec{\beta}(t), \quad (3)$$

где $\vec{v}(t)$ и $\vec{\beta}(t)$ – единичные векторы главной нормали и бинормали в точке, соответствующей значению параметра t .

Единичные векторы касательной $\vec{\tau}$, нормали \vec{v} и бинормали $\vec{\beta}$ образуют подвижный ортогональный базис, перемещающийся вдоль кривой, и вычисляются по формулам:

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{r}/dt}{|d\vec{r}/dt|}, \quad \vec{v} = \frac{d\vec{\tau}/dt}{|d\vec{\tau}/dt|}, \quad \vec{\beta} = \vec{\tau} \times \vec{v}. \quad (4)$$

Для описания поверхности теплообмена змеевического пружинно-витого канала в качестве направляющей кривой выберем двойную винтовую линию (биспираль, рис. 2), заданную уравнением:

$$\gamma: x = (R + r \cos \omega t) \cos t, \quad y = (R + r \cos \omega t) \sin t, \quad z = bt + r \sin \omega t,$$

а в качестве образующей – эллипс, с полуосями, равными c и d .

Тогда:

$$\vec{r}(t) = \begin{pmatrix} (R + r \cos \omega t) \cos t \\ (R + r \cos \omega t) \sin t \\ bt + r \sin \omega t \end{pmatrix}, \quad \rho(t, \varphi) = \begin{pmatrix} c \\ d \\ 0 \end{pmatrix}, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi, \quad 0 \leq t \leq 2\pi n, \quad (5)$$

где n – число витков двойной винтовой линии, R – радиус змеевика, r – радиус пружинно-витого канала.

Вычисляя единичные векторы касательной, нормали и бинормали по формулам (4) и подставляя полученные выражения в формулу (3), получим параметрические уравнения поверхности змеевикового пружинно-витого канала:

$$\vec{r}(t, \varphi) = \begin{pmatrix} (R + r \cos \omega t) \cos t \\ (R + r \cos \omega t) \sin t \\ bt + r \sin \omega t \end{pmatrix} + c \cos \varphi \cdot \vec{v}(t) + d \sin \varphi \cdot \vec{\beta}(t). \quad (6)$$

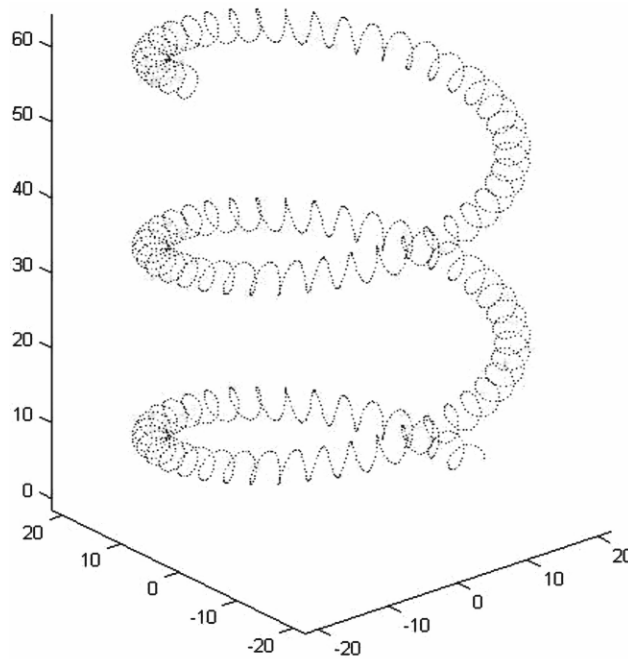


Рис. 2. Двойная винтовая линия

С целью проверки соответствия уравнения (6) геометрии рассматриваемого змеевикового пружинно-витого канала построена поверхность (рис. 3) в системе Matlab.

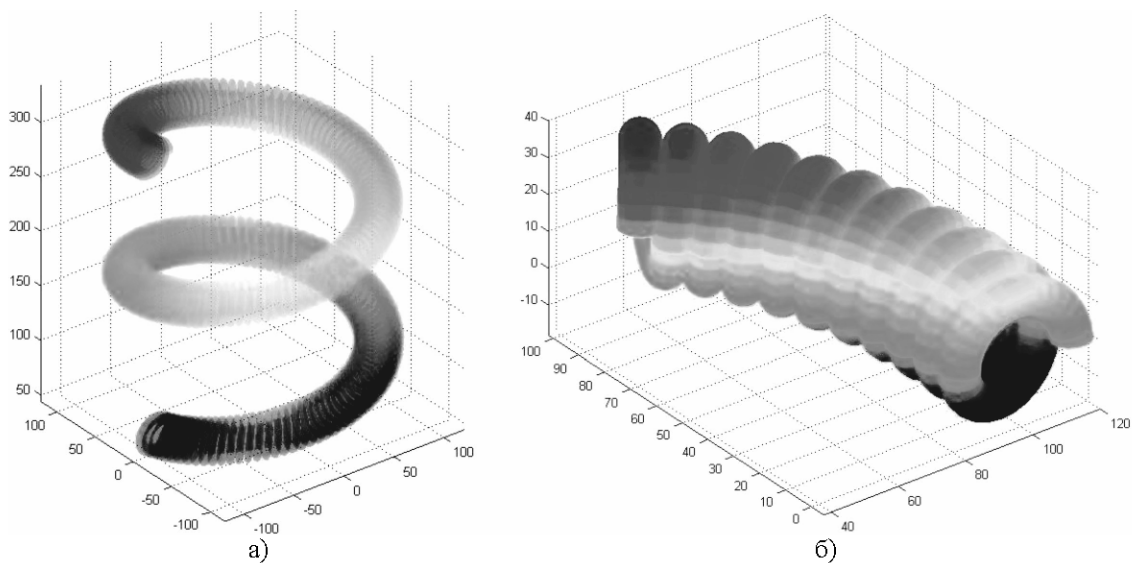


Рис. 3. а) Змеевиковый пружинно-витой канал; б) Фрагмент змеевикового пружинно-витого канала

Для реализации инженерных расчетов змеевикового теплообменника составлена программа в Matlab.

```
% Построение поверхности змеевикового пружинно-витого канала
r=15; % Радиус пружинно-витого канала
R=100; % Радиус змеевика
b=20; % Параметр винтовой линии змеевика
c=3; d=3; % Полуоси эллипса (сечение проволоки)
omega=ceil(pi*R/d) % Число витков проволоки
syms t fi % Символьные переменные
% Образующая
ro=[c*cos(fi); d*sin(fi); 0];
% Направляющая
r_t=[(R+r*cos(t*omega)).*cos(t);(R+r*cos(t*omega)).*sin(t);b*t+r*sin(t*omega)];
% Вычисление единичных векторов
dr=diff(r_t,t);
dlna_dr=sqrt(dr(1)^2+dr(2)^2+dr(3)^2);
tau=dr/dlna_dr;
dnu=diff(tau,t);
dlna_dnu=sqrt(dnu(1)^2+dnu(2)^2+dnu(3)^2);
nu=dnu/dlna_dnu;
beta=cross(nu,tau); % Векторное произведение
r_tfi=r_t+ro(1).*nu+ro(2).*beta; % Радиус-вектор поверхности
% Строим поверхность:
t=[0:pi/1000:3*pi];
fi=[0:pi/300:2*pi];
[t,fi]=meshgrid(t,fi);
x=eval(r_tfi(1));
y=eval(r_tfi(2));
z=eval(r_tfi(3));
mesh(x,y,z);
hold on;
axis equal;
```

Заключение

Предложена математическая модель теплообменной поверхности змеевикового пружинно-витого канала. Математическая модель и созданная компьютерная программа, описанные в статье, могут быть использованы при разработке программного обеспечения для процесса компьютерного управления технологией изготовления подобных каналов.

Список литературы

1. Бажан П.И., Каневец Г.Е., Селиверстов В.М. Справочник по теплообменным аппаратам. – М.: Машиностроение, 1989. – 368 с.
2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Изд-во химической литературы, 1961. – 832 с.
3. Басова О.А., Золотонос Я.Д. Змеевиковый теплообменник на базе пружинно-витых каналов. / Сборник научных трудов КазГАСУ. – Казань, 2009. – С. 33-35.
4. Багоутдинова А.Г., Золотонос Я.Д., Мустакимова С.А. Энергоэффективные теплообменные аппараты на базе теплообменных элементов в виде пружинно-витых каналов // Известия КГАСУ, 2012, № 3 (21). – С. 86-95.
5. Багоутдинова А.Г., Золотонос Я.Д. Математическое описание и визуализация теплообменных поверхностей в форме пружинно-витых каналов и труб типа «конфузор-диффузор» // Известия вузов. Проблемы энергетики. – Казань: Изд-во КГЭУ, 2012, № 7-8. – С. 80-86.

Bagoutdinova A.G. – candidate of technical sciences

E-mail: bagoutdinova@rambler.ru

Zolotonosov Ya.D. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: zolotonosov@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

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

Knyazeva I.A. – post-graduate student

E-mail: iraida_knyazeva@mail.ru

Vyatka State University

The organization address: 610000, Russia, Kirov, Moscovskaya st., 36

Heat exchangers of the «pipe in pipe» type with the internal coil spring-twisted channel

Resume

Heat exchangers with coil tubes for constructive technology and performance exceed straight tube heat exchangers, used in various industries. The advantages of coil heat exchangers are its compact size, relatively simple compensation temperature deformation and a higher rate of heat transfer compared to the straight tube heat exchangers.

This paper presents a compact heat exchanger of type «pipe in pipe» with an internal coil spring-twisted channel, and the equations describing the heat exchange surface of the coil, written in vector-parametric form using fundamental aspects of analytical and differential geometry.

By varying the parameters in the equation of heat transfer surface coil, it is possible to investigate and to optimize the internal geometry of the channel.

In order to test the adequacy and visualize the equation a program was written, the curves and surfaces using a software package Matlab were constructed.

A mathematical model and a computer program described in the article can be used in the development of software for computer control technology, process manufacturing coiled spring-twisted channels.

Keywords: heat transfer elements, the heat exchange surface, the mathematical model, helix.

References

1. Bajan P.I., Kanevets G.E., Seliverstov V.M. Handbook of heat exchangers. Mashinostroenie, 1989. – 368 p.
2. Kasatkin A.G. Basic processes and devices of chemical technology. – M.: Publishing House of the chemical literature, 1961. – 832 p.
3. Basova O.A., Zolotonosov Ja.D. Coil heat exchanger based on a spring-curly channels. Collection of scientific works KGASU. – Kazan, 2009. – P. 33-35.
4. Bagoutdinova A.G., Zolotonosov Ya.D., Mustakimova S.A. Energy-efficient heat-exchange devices based on heat-exchange elements in the form of a spring-twisted channels// Izv. KGASU, 2012, № 3 (21). – P. 86-95.
5. Bagoutdinova A.G., Zolotonosov Ja.D. Mathematical description and visualization of heat-exchange surfaces in form the spring-curly channels and pipes of type «confusor-diffusor» // Proceedings of the universities. Energy problems. – Kazan: IzdKGEU, 2012, № 7-8. – P. 80-86.