

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИНТОВЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Описаны конструкции теплообменных элементов с винтовой поверхностью для трубных пучков повышенной теплогидродинамической эффективности.

На базе фундаментальных положений аналитической и дифференциальной геометрии записаны векторно-параметрические уравнения таких поверхностей.

Проведен анализ степени развития поверхностей теплообменных элементов в зависимости от геометрических параметров исходного профиля, формирующего винтовую поверхность.

Ключевые слова: теплообменный элемент, поверхность, математическая модель.

Проблема повышения теплогидродинамической эффективности теплообменных аппаратов является весьма актуальной для систем отопления, вентиляции и горячего водоснабжения, а также в химической, нефтеперерабатывающей и пищевой технологиях.

В этой связи, необходимо совершенствование современных подходов к конструированию и расчету теплообменных аппаратов и создание на этой основе инновационных технологий их производства.

Ранее авторами [1-4] предложена серия теплообменных элементов с винтовой поверхностью теплообмена.

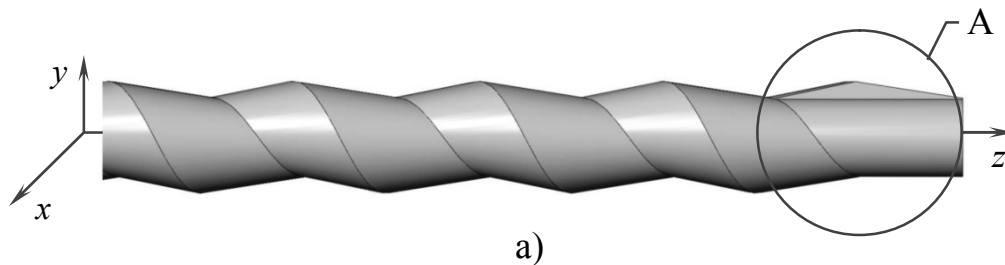
На рис. 1а представлен теплообменный элемент, образованной вращением уголкового профиля (рис. 1б) по винтовой линии.

Оценим степень развития поверхности винтового теплообменного элемента по сравнению с поверхностью гладкотрубного элемента $F_{гр}$ диаметром $d_{гр}$.

Ясно, что степень развития поверхности теплообмена $\psi = F/F_{гр}$ зависит от угла β при вершине уголкового профиля и его высоты h :

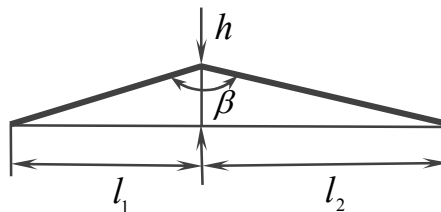
$$\psi = F/F_{гр} = \frac{1}{\sin \beta / 2} (1 - h/d_{гр}). \quad (1)$$

Здесь F - площадь внешней поверхности теплообменного элемента.



а)

A (увеличено)



б)

Рис. 1. Винтовой теплообменный элемент

а) поверхность винтового теплообменного элемента; б) уголкового профиля

Функция $y = \frac{1}{\sin \beta/2}$ принимает минимальное значение, равное 1, при $\beta = \pi$

и стремится к бесконечности при $\beta \rightarrow 0$.

За счет уменьшения угла β можно получить существенное увеличение теплообменной поверхности. Так, например, если взять за основу равнобедренный уголкового профиля с прямым углом при вершине ($\beta = \pi/2$), то степень развития поверхности $\psi = \sqrt{2}(1 - h/d_{\text{гр}})$. Отсюда следует, что максимальная (предельная) степень развития поверхности, равная $\psi_{\text{пред}} = \sqrt{2}$, достигается при $h \rightarrow 0$, когда число уголковых выступов на единице длины трубы стремится к бесконечности.

Если взять за основу равносторонний уголкового профиля ($\beta = \pi/3$), то формула (1) приобретает вид $\psi = 2(1 - h/d_{\text{гр}})$ и $\psi_{\text{пред}} = 2$.

Получить степень развития поверхности $\psi > 2$ возможно за счет дальнейшего уменьшения угла β . Однако, это вызовет существенный рост гидравлического сопротивления винтовой трубы, будет способствовать быстрому

загрязнению теплообменной поверхности и, соответственно, снижению эффективности теплообмена.

Применение теплообменных поверхностей при $\psi > 1,15$ считается целесообразным, поскольку положительно влияет на увеличение теплового потока, передаваемого через стенку и обеспечивает снижение металлоемкости теплообменного аппарата.

Для организации крупнотоннажного производства предлагаемых теплообменных элементов, реализуемого с использованием современных компьютерных технологий, необходимо строгое математическое описание конфигурации их поверхностей.

В работе [5] рассмотрен общий метод построения поверхности, образованной движением непрерывной кривой $\rho = \rho(s)$ вдоль криволинейной направляющей $\gamma: \vec{r} = \vec{r}(t)$, где s и t - некоторые параметры кривых.

Согласно этому методу радиус-вектор точки поверхности представляется в виде

$$\vec{r}(t,s) = \vec{r}(t) + \rho(s) \cdot \vec{v}(t) + \rho(s) \cdot \vec{\beta}(t), \quad (2)$$

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 γ , и вычисляются по формулам:

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

Для описания поверхности предлагаемого теплообменного элемента (рис.1а) в качестве направляющей кривой γ выберем винтовую линию, расположенную на круговом цилиндре радиуса $r_{\text{ци}}$: $x = r_{\text{ци}} \cos t$, $y = r_{\text{ци}} \sin t$, $z = bt$.

Здесь t – параметр, характеризующий положение точки на винтовой линии ($0 \leq t \leq 2\pi n$), n – число витков, $b = \frac{l}{2\pi}$, l – шаг винтовой линии.

В качестве образующей выберем ломаную, состоящую из двух звеньев (рис.1б).

Тогда

$$\vec{r}(t) = \begin{pmatrix} r_{\text{гн}} \cos t \\ r_{\text{гн}} \sin t \\ bt \end{pmatrix}, 0 \leq t \leq 2\pi n, \vec{\rho}(s) = \begin{pmatrix} hs \\ (1-s)l \\ 0 \end{pmatrix}, 0 \leq s \leq 1. \quad (3)$$

Здесь $l = l_1$ для первого звена, $l = -l_2$ для второго звена, $b = \frac{l_1 + l_2}{2\pi}$.

Вычислим единичные векторы касательной, нормали и бинормали:

$$\vec{\tau} = \frac{1}{\sqrt{r_{\text{гн}}^2 + b^2}} \begin{pmatrix} -r_{\text{гн}} \sin t \\ r_{\text{гн}} \cos t \\ b \end{pmatrix}, \vec{\nu} = \begin{pmatrix} -\cos t \\ -\sin t \\ 0 \end{pmatrix}, \vec{\beta} = -\frac{1}{\sqrt{r_{\text{гн}}^2 + b^2}} \begin{pmatrix} b \sin t \\ -b \cos t \\ r_{\text{гн}} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

Подставляя выражения (3), (4) в (2), получим векторно-параметрические уравнения поверхности предлагаемого теплообменного элемента:

$$\vec{r}(t, s) = \begin{pmatrix} r_{\text{гн}} \cos t \\ r_{\text{гн}} \sin t \\ bt \end{pmatrix} - hs \begin{pmatrix} \cos t \\ \sin t \\ 0 \end{pmatrix} - \frac{l(1-s)}{\sqrt{r_{\text{гн}}^2 + b^2}} \begin{pmatrix} b \sin t \\ -b \cos t \\ r_{\text{гн}} \end{pmatrix}, 0 \leq t \leq 2\pi n, 0 \leq s \leq 1. \quad (5)$$

Запишем уравнение (5) в безразмерном виде. В качестве характерного размера выберем радиус гладкой трубы $r_{\text{гн}}$. Обозначим безразмерный радиус-вектор точки поверхности как $\vec{r}_0(t, s)$. Тогда $\vec{r}(t, s) = r_{\text{гн}} \vec{r}_0(t, s)$. Уравнение (5) в безразмерном виде запишется следующим образом:

$$\vec{r}_0(t, s) = \begin{pmatrix} \cos t \\ \sin t \\ b_0 t \end{pmatrix} - h_0 s \begin{pmatrix} \cos t \\ \sin t \\ 0 \end{pmatrix} - \frac{l_0(1-s)}{\sqrt{1^2 + b_0^2}} \begin{pmatrix} b_0 \sin t \\ -b_0 \cos t \\ 1 \end{pmatrix}, 0 \leq t \leq 2\pi n, 0 \leq s \leq 1, \quad (6)$$

где $b_0 = b/r_{\text{гн}}$, $h_0 = h/r_{\text{гн}}$, $l_0 = l/r_{\text{гн}}$ - безразмерные величины.

По уравнению (6) в системе Matlab построена винтовая поверхность (рис. 2) при $b_0 = 1,2$; $h_0 = 0,2$; $l_0 = 1,2$; $n = 10$, что соответствует геометрическим размерам винтового теплообменного элемента: $r_{\text{гн}} = 10$ мм; $l = 12$ мм ($l_1 = 8$ мм, $l_2 = 4$ мм); $h = 2$ мм; $n = 10$.

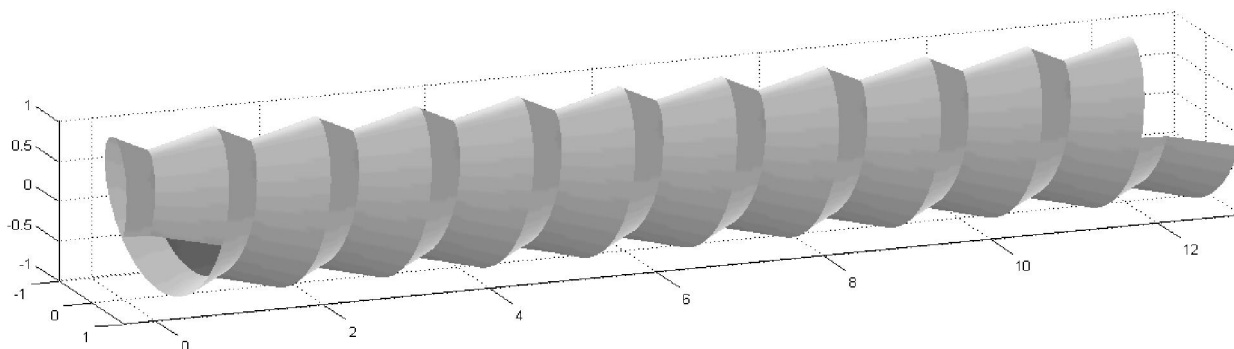


Рис. 2. Поверхность винтового теплообменного элемента

Одной из наиболее перспективных технологий получения винтовых теплообменных элементов является способ ротационной ковки (или ротационного обжатия), осуществляемый на специальных ротационно-ковочных устройствах, где уравнения (6) используются при работе аппаратно-программного комплекса, обеспечивающего непрерывное производство труб [6].

На рис. 3 представлен фрагмент теплообменного элемента, полученного методом ротационного обжатия.



Рис. 3. Фрагмент теплообменного элемента, полученного методом ротационного обжатия

Такая технология позволяет изготавливать широкую номенклатуру витых теплообменных элементов.

На рис. 4, например, изображен фрагмент теплообменного элемента с винтовой канавкой. Такая конструкция обеспечивает опережающее увеличение интенсивности теплообмена по сравнению с увеличением гидросопротивления.

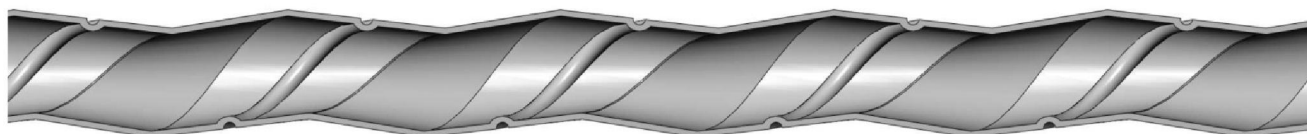


Рис. 4. Винтовая труба с канавками

На рис. 5а представлен теплообменный элемент с чередующимися секциями правого и левого вращения с участками стабилизации в виде прямолинейных вставок [2].

В этих каналах при движении жидкости в секциях правого и левого вращения, в комбинации с участками стабилизации, обеспечивается перемешивание среды при опережающем росте интенсивности теплоотдачи и сопоставимых значениях гидравлических сопротивлений с каналами, выполненными из секций с однонаправленным спиральным оребрением.

На рис. 5б представлен фрагмент участка стабилизации, снабженный ребрами плавникового типа которые также способствуют интенсификации теплоотдачи и снижению гидравлического сопротивления, вызванным эффектом торможения вращающегося потока на входной кромке последующей секции. Ребра позволяют сократить длину проточной части участка стабилизации, погасить эффект вращения перед входной кромкой, следующей по потоку винтовой секции и увеличить теплообменную поверхность.

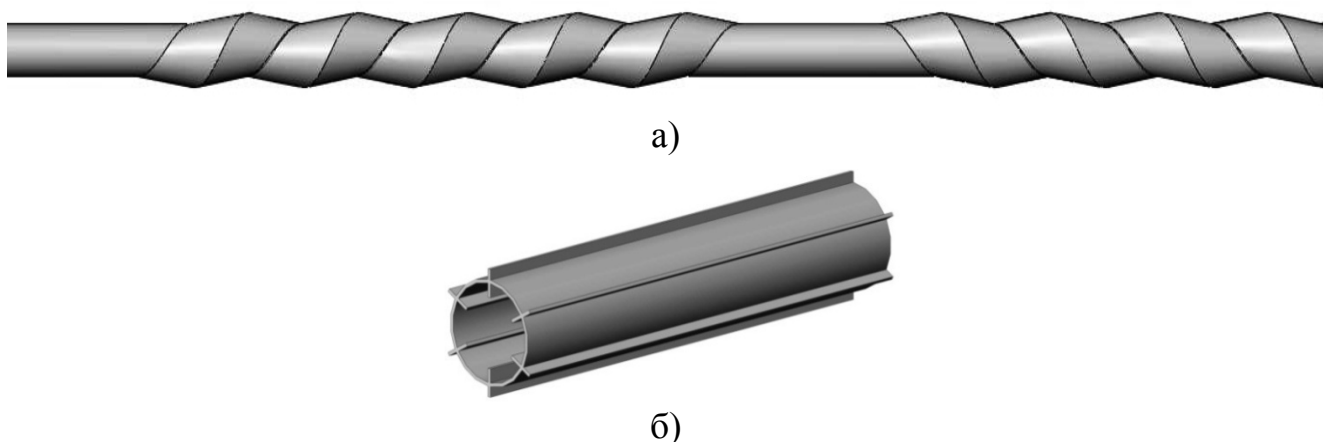


Рис. 5. Теплообменный элемент с чередующимися секциями правого и левого вращения
а) - с участком стабилизации в виде прямолинейных вставок;
б) - фрагмент участка стабилизации, снабженный ребрами плавникового типа

Настоящая статья является попыткой представить современные тенденции в разработке инновационных теплообменных элементов для крупнотоннажного производства энерго- и ресурсосберегающего теплообменного оборудования и в частности с использованием технологии ротационнойковки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. № 119452 на пол. мод. РФ. Теплообменный элемент / Золотоносов А.Я., Золотоносов Я.Д., Багоутдинова А.Г., Осыка И.И. № 2012109355/06; заявл. 12.03.12.; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23.
2. Патент № 139566 на пол. мод. РФ. Теплообменный элемент / Золотоносов А.Я., Золотоносов Я.Д., Мустакимова С.А., Багоутдинова А.Г., Яхнев М.Н. № 2013125072/06; заявл. 25.07.13.; опубл.20.04.2014, Бюл. № 11.
3. Патент № 146241 на пол. мод. РФ. Теплообменный элемент / Золотоносов Я.Д., Галимов К.С. № 201446289; заявл. 20.04.14.; опубл.10.10.2014, Бюл. № 28.
4. Патент № 140683 на пол. мод. РФ. Теплообменный элемент / Золотоносов Я.Д., Тартыгашева А.М. № 2013154131; заявл. 05.12.13.; опубл.20.05.2014, Бюл. № 14.
5. Багоутдинова, А.Г. Математическое описание и визуализация теплообменных поверхностей в форме пружинно-витых каналов и труб типа «конфузор-диффузор» / А. Г. Багоутдинова, Я. Д. Золотоносов // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2012. – № 7-8. – С. 80-86.
6. Багоутдинова, А.Г. Технология изготовления труб типа «конфузор-диффузор» с винтовой поверхностью теплообмена. /А. Г. Багоутдинова, Я. Д. Золотоносов, М. Н. Яхнев // Актуальные инженерные проблемы химических и нефтехимических производств: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – 2013. – С.151-154.

БАГОУТДИНОВА Альфия Гиззетдиновна, канд. техн. наук

Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Россия

ЗОЛОТОНОСОВ Яков Давидович, д-р техн. наук, проф.

Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Россия

ПОСОХИН Владимир Николаевич, д-р техн. наук, проф.

Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Россия

Bagoutdinova Alfija Gizzetdinovna, candidate of technical sciences, Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE), Kazan, Russia

Zolotonosov Yakov Davidovich, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE), Kazan, Russia

Posohin Vladimir Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE), Kazan, Russia

MATHEMATICAL MODELLING OF SCREW HEATEXCHANGE ELEMENTS

Designs of heat exchange elements with a screw surface for pipe bunches of the raised warmly and hydrodynamic efficiency are described.

On the basis of fundamental provisions of analytical and differential geometry the vector and parametrical equations of such surfaces are written down.

The analysis of extent of development of surfaces of heat exchange elements depending on geometrical parameters of the initial profile forming a screw surface is carried out.

REFERENCES

1. Zolotonosov A. Ya., Zolotonosov Ya. D., Bagoutdinova A. G., Osika I. I. Heat exchanging element: Patent № 119452 on the floor. fashion. Growing up. The Federation. № 2012109355/06; Appl. 12.03.12; publ. 20.08.2012, Byull. № 23.
2. Zolotonosov A. Ya., Zolotonosov Ya. D., Mustakimova S. A., Bagoutdinova A. G., Yachnev M. N. Heat exchanging element: Patent № 139566 on the floor. fashion. Growing up. The Federation. № 2013125072/06; Appl. 25.07.13; publ 20.04.2014, Byull. № 11.
3. Zolotonosov Ya. D., Galimov K. S. Heat exchanging element: Patent № 146241 on the floor. fashion. Growing up. The Federation. № 201446289; Appl. 20.04.14; publ. 10.10.2014, Byull. № 28.
4. Zolotonosov Ya. D., Tartigascheva A. M. Heat exchanging element: Patent № 146241 on the floor. fashion. Growing up. The Federation. № 2013154131; Appl. 05.12.13; publ. 20.05.2014, Byull. № 14.
5. Bagoutdinova, A. G. Mathematical description and visualization of heat-exchange surfaces in form the spring-curlly channels and pipes of type «confusor-diffusor» / A. G. Bagoutdinova, Ja. D. Zolotonosov // Proceedings of the universities. Energy problems. –2012. – № 7-8. – P. 80-86.
6. Bagoutdinova, A. G. Pipe technology such as "konfuzor-diffuser" with helical surface heat transfer. / A. G. Bagoutdinova, Ya. D. Zolotonosov, M. N. Yakhnev // Actual engineering problems of chemical and petrochemical industries: Proceedings of All-Russian scientific and practical conference. – 2013. – P. 151-154.