

Н.В.БАБКОВА, аспирант, НТУ «ХПИ»;
И.В.ГАЛУЩАК, ст. преп., НТУ «ХПИ»;
В.Я.ГОРБАТЕНКО, канд. техн. наук, профессор, НТУ «ХПИ»;
А.М.НИКИТИН, ст. преп., НТУ «ХПИ»

ДИСКРЕТНАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕДАЧИ ТЕПЛА В ОРЕБРЕННЫХ ТРУБАХ

Надано результати розробки та тестової перевірки дискретної моделі процесу передачі тепла в елементах трубної поверхні теплообміну з зовнішнім розрізним спіраліно-стрічковим оребренням. Встановлена можливість моделювання, його інформативність та доступність за витратами матеріалів та часу.

Outcomes of development and test check of discrete model of the heat-transmission process in units with a tubular surface of heat exchange and with an external cutting spiral - tape ribbing represented. Possibility of simulation, his self descriptiveness and availability on the material and temporary expenditures is placed.

Представлены результаты разработки и тестовой проверки дискретной модели процесса передачи тепла в элементах трубной поверхности теплообмена с внешним разрезным спирально-ленточным оребрением. Установлена возможность моделирования, его информативность и доступность по расходам материалов и времени.

Настоящая публикация представляет собой описание построения и применения дискретной модели процесса передачи тепла от греющих газов к рабочей среде в элементах теплоэнергетических установок, использующих поверхности нагрева с разрезанным спирально-ленточным оребрением, и является продолжением статьи [1]. Перенос тепловой энергии производится через оребренную трубку. Следующим шагом в решении проблемы является построение модели транспорта тепла в материале стенки со сложной геометрией границ. Разработка возможности выбора конструктивных параметров подобного оребрения эффективных в процессе теплопередачи стала одной из причин появления данной публикации.

1. Постановка задачи и исходные данные. Основной задачей выполненной работы являлось получение распределений температур внутри материала участка оребренной трубы, рис. 1, с элементами спирально-оребранных поверхностей нагрева с разрезанными ребрами при различных размерах оребрения, рис. 2.

Согласно формулировке и рис. 1, задача кондуктивного теплообмена трехмерна и распределение температур для трубы и оребрения, выполненных из одного и того же материала, описывается уравнением в частных производных [2]

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{C_p \rho}. \quad (1)$$

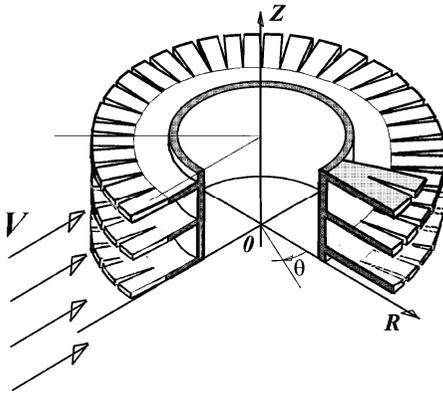


Рисунок 1 – Трехмерный элемент оребренной трубы в цилиндрической системе координат

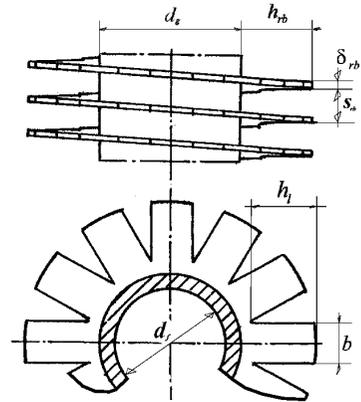


Рисунок 2 – Эскиз элемента трубы

В (1) $t(r, \theta, z)$ – поле температур в системе координат (r, θ, z) ; $a = \lambda / C_p \rho$ – коэффициент температуропроводности; ρ , C_p , λ – плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала трубы и оребрения; q_v – интенсивность внутренних источников в материале трубы.

Предполагая стационарность процесса теплопередачи $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$ и отсутствие внутренних источников тепла, $q_v = 0$, получим

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0 \quad \text{или} \quad \Delta t = 0. \quad (2)$$

Предположение малости теплового потока в окружном направлении характерно в постановках, пренебрегающих неравномерностью потока в зависимости от координаты θ , а выбранное осевое сечение позволяет ввести двумерную декартову систему координат $(x, 0, y)$ и рассматривать в качестве модельного тонкий, но конечный по толщине, радиальный срез материала трубы с элементами оребрения (рис. 3, а).

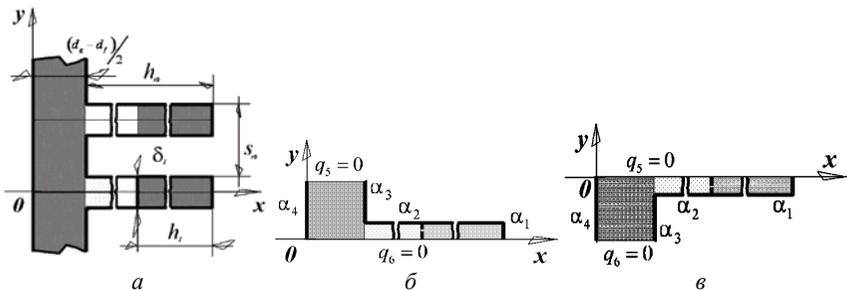


Рисунок 3 – Область с выделенными элементами: а – сечение по оси трубы; б – нижний угол; в – верхний угол

Упомянутые до сих пор допущения, кроме приведенных в [3] обоснований, становятся более жесткими, если принять во внимание факт, что в модели газового потока [1] использованы средние по элементам коэффициенты теплоотдачи от греющих газов к поверхности.

1.1. Выбор области дискретизации. Эскиз трубы со спирально-орребренной поверхностью нагрева с разрезанными ребрами приведен на рис. 1 и 2. Указанные размеры элементов и их обозначения соответствуют исходным данным, приведенным в табл. 1.

Таблица 1 – Исходные данные дискретной модели спирально-орребренных поверхностей нагрева с разрезанными ребрами.

Наружный диаметр трубы	мм	d_g	Внутренний диаметр трубы	мм	d_f
Греющая среда – дымовые газы при $p = 1,0$ Мра					
Температура газа	$^{\circ}\text{C}$	t_g	Вязкость газов при t_g	$\text{м}^2/\text{с}$	ν_g
Теплопроводность газов	$\text{Вт}/\text{мК}$	λ_g	Число Прандтля		Pr
Нагреваемая среда – вода при $p = 4,0$ Мра					
Температура воды	$^{\circ}\text{C}$	t_f	Вязкость воды при t_f	$\text{м}^2/\text{с}$	ν_f
Теплопроводность воды	$\text{Вт}/\text{мК}$	λ_f	Число Прандтля		Pr
Скорость воды	$\text{м}/\text{с}$	w_f	Температура кипения	$^{\circ}\text{C}$	t_{fk}
Теплота парообразования	$\text{кДж}/\text{кг}$	r_f	Энтальпия воды	$\text{кДж}/\text{кг}$	i_f
Теплопроводность металла трубы и оребрения				$\text{Вт}/\text{мК}$	λ
Переменные параметры модели					
Шаг ребер	мм	s_{rb}	Зазор между ребрами	мм	a
Высота ребер	мм	h_{rb}	Скорость газов	$\text{м}/\text{с}$	w_g
Высота лепестка	мм	h_i	Размер по лепестку	мм	L_1
Толщина ребра	мм	δ_{rb}	Размер по неразрезанной части	мм	L_2
Ширина лепестка	мм	b	Размер по внешней поверхности трубы	мм	L_3

Осевое сечение участка трубы, показанное на рис. 3, *a*, позволяет выбрать характерные поперечные сечения оребренного участка: по срединной плоскости лепестка и по плоскости, проходящей через середину трубного элемента между оребрением. Обе выбранные плоскости обладают следующими особенностями:

- в пределах одного или двух шагов оребрения они являются плоскостями симметрии для изображения на рис. 3, *a*,

- можно ожидать, что при симметричном тепловом нагружении производная $\frac{\partial q}{\partial y} \Big|_{y=0}^{y=0.5 \cdot s_{rb}} \approx 0$, что соответствует малым тепловым потокам

вдоль оси ординат на границах выделения области.

Относительно характера теплового процесса в рамках модели принимаются ограничения, которые в процессе идеализации остаются неизменными:

- материал оребрения и материал трубы имеют совпадающие теплопроводящие свойства;
- условия теплоотдачи в пределах трех близлежащих витков со стороны газового потока на поверхности ребер и внешнюю поверхность трубы идентичны;
- условия теплоотдачи в пределах трех близлежащих витков со стороны потока жидкости вследствие малости шага оребрения можно считать постоянными.

Эти три соглашения позволяют выделить несколько вариантов геометрии модельного элемента.

Приведенные на рис. 3, б и 3, в модельные области идентичны с точки зрения приведения к системе конечных элементов и позволяют показать участки с постоянными граничными условиями. Для дальнейшего построения рабочей модели в результате предварительного тестирования была выбрана область, изображенная на рис. 3, в. При этом в процессе вычислительного эксперимента опробованы также модели с условно тонкими, в тепловом смысле, представлениями элементов области дискретизации. Однако наиболее информативной и точной оказалась область типа «верхний угол», рис. 3, в.

1.2. Математическое описание процесса теплообмена. Для внутренней области модельного элемента в рамках двумерной стационарной задачи кондуктивного теплообмена без внутренних источников тепла [4] дифференциальное уравнение, описывающее температурное поле в материале объекта:

$$\Delta t = 0 \quad \text{или} \quad \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0. \quad (3)$$

В табл. 2 приведен вид граничных условий модельной области в общем случае для теплового потока, направленного против оси абсцисс.

Выражения (табл. 2.1-4) являются граничными условиями третьего рода, а выражения (табл. 2.5-6) с учетом конечности значения коэффициента теплопроводности относятся к граничным условиям второго рода.

Моделирование сложных течений [5] приведем к условному плоскому каналу с модельным геометрическим параметром представляет ряд преимуществ. Для значений коэффициентов теплоотдачи от греющего газа к различным участкам тепловоспринимающей поверхности в [1] получены значе-

ния модельных параметров L_i , $i = 1, 2, 3$. Значения чисел Рейнольдса [6] получаются различными на разных участках границ $Re_{gi} = \frac{w_g L_i}{\nu_g}$, $i = 1, 2, 3$.

Таблица 2 – Общий вид граничных условий модельной области

№ границы	Граничное условие	Примечание
1	$q_1 = \alpha_1 (t_g - t_1)$	α_1 – коэффициент теплоотдачи от топочного газа к поверхности лепестка, t_g и t_1 температуры газа и поверхности ребра,
2	$q_2 = \alpha_2 (t_g - t_2)$	α_2 – коэффициент теплоотдачи от топочного газа к сплошной части оребрения, t_2 температура неразрезанной части,
3	$q_3 = \alpha_3 (t_g - t_3)$	α_3 – коэффициент теплоотдачи от топочного газа к внешней стенке трубы, t_3 температура поверхности и трубы,
4	$q_4 = \alpha_4 (t_4 - t_{f1})$	α_4 – коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки трубы к потоку воды, t_{f1} и t_4 температуры воды и стенки,
5, 6	$\frac{\partial q}{\partial y} = 0$; $\lambda \neq 0$; $\frac{\partial t}{\partial y} = 0$	по способу выделения модельной области

Следуя порядку в табл. 2, выпишем выражения для коэффициентов теплоотдачи всех границ модельной области. Так, коэффициент теплоотдачи от газов ко всем тепловоспринимающим поверхностям определен в [1] с помощью модельного значения числа Re_{gi} в канале. Тогда для лепестка оребрения он принимается равным α_1 , к поверхности кольца оребрения – α_2 , к неоребренной поверхности трубы – α_3 , при этом:

$$\alpha_i = 0,66 \frac{\lambda_g}{L_i} Re_g^{0,5} Pr_g^{0,33}; \quad Re < 40000, \quad (4)$$

$$\alpha_i = 0,037 \frac{\lambda_g}{L_i} Re_g^{0,8} Pr_g^{0,43}; \quad Re \geq 40000. \quad (5)$$

Коэффициент теплоотдачи α_4 от внутренней стенки [2] трубы единичной длины к потоку воды,

$$\alpha_4 = 0,023 \frac{\lambda_f}{d_i} Re_f^{0,8} Pr_f^{0,43}; \quad Re < 10000, \quad (6)$$

$$\alpha_4 = 0,021 \frac{\lambda_f}{d_i} Re_f^{0,8} Pr_f^{0,43}; \quad Re \geq 10000, \quad (7)$$

Таким образом, по формулам (4-7) граничные условия из табл. 2 определены «до числа». Данный вариант использован авторами в качестве базовой расчетной модели для проведения вычислительного эксперимента в предлагаемой работе.

1.3. Исходные данные дискретной модели. Набор данных, необходимых для реализации вычислительного процесса определен выбором модельной области, рис. 3, в, математической моделью (3, 4-7) и размерами теплопередающих элементов. Исходные данные можно представить в виде двух групп:

- характеристики процесса, принятые в традиционном представлении и конструктивные,
- модельные параметры, для которых справедливы модельные допущения.

Наименования и обозначения исходных данных, приведенные в таблице 1, использованы при моделировании на всех этапах.

2. Метод конечных разностей, стержневая модель. При использовании метода конечных разностей [7] твердое тело представляют в виде совокупности узлов. Далее, уравнение (3) преобразуется к разностному виду таким образом, что все свойства расчетной области приводятся к системе узлов сетки. При этом искомые параметры выступают в качестве неизвестных, а коэффициенты линеаризации образуют матрицу связей. Дифференциальное уравнение (3) и его конечно-разностный аналог выполняются для каждого узла сетки, в результате, задача заключается в решении системы линейных уравнений с размерностью, равной числу узлов дискретного аналога.

2.1. Метод конечных разностей для уравнения Лапласа. Для линеаризации уравнения Лапласа (3) введем разностный эквивалент второй производной вдоль координаты при малых $\Delta x = \Delta y = d$, см. рис. 3, а. Учитывая

приближенность преобразования получим:
$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right) = \frac{\Delta \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right)}{\Delta x} = \frac{\Delta(\Delta t)}{(\Delta x)^2}.$$

Преобразуем уравнение (3) согласно рис. 4, а:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = \frac{t_1 + t_3 + t_2 + t_4 - 4 \cdot t_0}{d^2} = 0. \text{ Учитывая не равенство 0 дискрета } d$$

$$d = \text{const} \neq 0; \quad t_1 + t_3 + t_2 + t_4 - 4 \cdot t_0 = 0. \quad (8)$$

Операндом метода конечных разностей является точка, совпадающая с центром тяжести малой области, выделяемой в модели координатными линиями или плоскостями.

2.2. Стержневая модель теплопередачи. Стержневая модель использует стержень, заданной длины, как элемент конечных размеров, реализующий все теплопроводящие свойства материала между двумя соседними узлами. В

результате применения стержневого метода получают n алгебраических уравнений для n узлов в твердом теле. Эти n алгебраических уравнений заменяют одно уравнение в частных производных с соответствующими граничными условиями.

Иллюстрация стержневой модели [4] на двумерной задаче теплопроводности приведена на рис. 4, а.

В установившихся состояниях баланс энергии для узла 0 при отсутствии внутреннего тепловыделения записывается в виде $\sum_{i=1}^4 q_{i \rightarrow 0} = 0$. Применяя законы Фурье и Ньютона для каждого элемента типа стержень, в [4] получены алгебраические уравнения, совпадающие с (8). Приводим эти уравнения применительно к областям на рис. 4, а, б.

$$4 \cdot T_0 - (T_1 + T_2 + T_3 + T_4) = 0; \quad (9)$$

$$\left(2 + \frac{\alpha \Delta x}{\lambda}\right) T_0 - \left(\frac{1}{2}(T_2 + T_3) + T_1\right) = \frac{\alpha \Delta x}{\lambda} T_\infty; \quad (10)$$

$$2T_0 - \left(\frac{1}{2}(T_2 + T_3) + T_1\right) = 0. \quad (11)$$

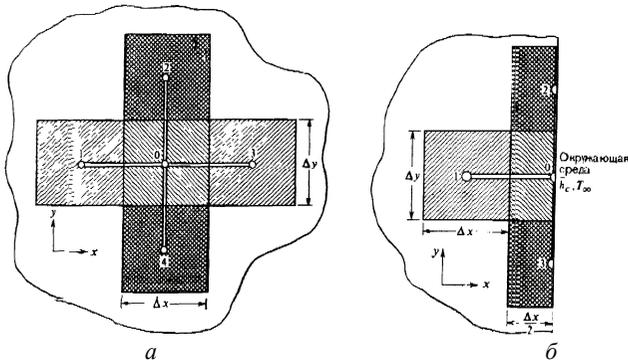


Рисунок 4 – Расположение узлов для двумерного твердого тела; толщиной d с коэффициентом теплопроводности λ : а – внутренняя, б – граничная области.

Уравнение (9) совпадает с (8) и применимо ко всем внутренним узлам, то есть ко всем узлам, не лежащим на границе твердого тела и окруженным со всех сторон равноотстоящими квадратными ячейками сетки. Температуры в граничных узлах зависят от температур в соседних узлах и от параметра $\alpha \Delta x / \lambda$. Этот безразмерный комплекс имеет форму числа Био [4] для характерного размера Δx . Уравнения (10) соответствуют граничным условиям третьего рода. Для граничных условий второго рода действительно уравнение (11).

Таким образом, вместо дифференциального уравнения Лапласа (3) с граничными условиями (табл. 2) располагаем линейными (для $d = \text{const}$) алгебраическими аналогами (9-11). Отметим особую роль размера Δx в предлагаемых

рассуждениях и его влияние на вид получаемых выражений. Этот характерный размер часто называют «дискретом» задачи. Величина Δx выбирается таким образом, что все особенности геометрии расчетной области моделируются целым числом элементарных стержней. От ее величины зависит размерность системы линейных уравнений и точность получаемых решений для температур в узлах.

Если узлов в твердом теле сравнительно мало [8], можно решить полученную систему алгебраических уравнений стандартными математическими методами. При возрастании числа узлов для получения уточненного решения требуется больше времени.

3. Модель процесса теплопередачи. Для построения модели процесса теплопередачи необходимо принять схему нумерации узлов согласно рис. 5 и соответствующий алгоритм автоматической компоновки коэффициентов матрицы связей для модельной области с использованием уравнений из таблицы 3. В таблице приведены наиболее часто встречающиеся случаи и соответствующие им уравнения для температур.

Таблица 3 – Характерные узлы модельной области

	<p>Верхний правый угол $-(1 + 0.5Bi_4)t_0 + 0,5t_1 +$ $+0,5t_q = -0.5Bi_4t_f$</p>	<p>(12)</p>
	<p>«Теплоизолированный» граничный узел $-2t_i + 0,5t_{i-1} +$ $+0,5t_{i+1} + t_{i+q} = 0$</p>	<p>(13)</p>
	<p>Узел торца плоского лепестка $-(2 + Bi_\gamma)t_i + t_{i-1} + 0,5t_{i-q} +$ $+0,5t_{i+q} = -Bi_\gamma t_g$</p>	<p>(14)</p>
	<p>Нижний «консольный» узел $-(1 + Bi_\gamma)t_i + 0,5t_{i-1} +$ $+0,5t_{i-q} = -Bi_\gamma t_g$</p>	<p>(15)</p>
	<p>Внутренний узел $-(3 + Bi_\gamma)t_i + t_{i-1} + 0,5t_{i+1} +$ $+t_{i-q} + 0,5t_{i+q} = -Bi_\gamma t_g$</p>	<p>(16)</p>

Матрица связей состоит из коэффициентов при неизвестных узловых температурах в линейной системе уравнений, получаемых по аналогии с примерами (8, 11, 12). Выделим на рис. 5 характерные узлы и сопоставим им линейные уравнения связей, приведенные в табл. 3. Линейные уравнения (9-16)

являются аналитическим эквивалентом подпрограмм блока формирования матрицы «связей».

3.1. Расчетная схема модели. Основной программный блок построения матрицы связей реализован согласно рис. 5. Нумерация точек и выбор величины дискрета отражают значения исходных данных из табл. 1.

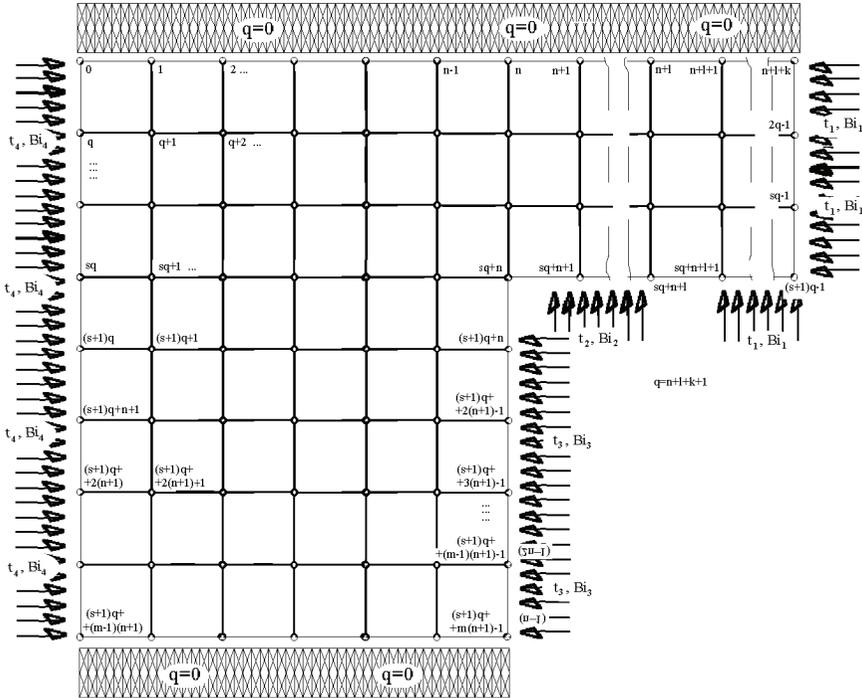


Рисунок 5 – Расчетная схема для оребрения произвольной толщины

Например, число точек по толщине материала трубы связано с величиной дискрета модели, внешним и внутренним диаметрами $n = \frac{d_g - d_f}{2 \cdot d}$ и т.п.

Размерность задачи, соответствующая рангу матрицы связей, рассчитывается по числу точек на рис. 5,

$$N = (s + 1)q + m(n + 1) - 1, \quad (17)$$

где s – число дискретных элементов по половине толщины ребра, q – по длине оребрения от точки внутренней поверхности трубы до вершины ребра, m – соответствует длине неоребренной части трубы, n – ее толщина. Разделение материала оребрения в основании лепестка происходит в точках сварки и на-

чала разреза, что соответствует $q = m + l + k + 1$, где l соответствует неразрезанной части, а k – длине плоского участка ребра.

В работе опробованы несколько вариантов расчетных схем модельных областей. В качестве базовой расчетной модели выбрана схема, приведенная на рис. 5, как более информативная.

3.2. Описание работы основного модуля. Описанные в предыдущих разделах алгоритмы и представления моделей реализованы в среде Visual Basic for Excel 97 [8] на платформе системы Windows 98, которая в настоящее время не поддерживается фирмой Microsoft и не входит в список обязательно лицензируемых программных продуктов в Украине.

Организация работы [9] Basic-модуля полностью соответствует изложенным ранее алгоритмам и процедурам моделирования. Дискретное моделирование производится в ExcelBook Microsoft Office 97, что позволяет в полной мере использовать известный дружественный интерфейс от фирмы Microsoft. Основными оперативными листами являются:

ID09 содержит значения всех исходных данных согласно табл. 2 и оценочные величины, такие как относительная ошибка модели по тепловому потоку и т.п.;

Paint – лист вывода результатов моделирования

Изменяемые параметры подписаны и выделены, ввод новых значений производится в соответствующие ячейки листа до начала вычислительного эксперимента.

4. Результаты вычислительного эксперимента. В результате вычислительного эксперимента получены серии распределений избыточных температур в модельной области, рис. 6. В качестве опорной температуры была произвольно выбрана температура границы по внутренней поверхности трубы.

Для построения программной оценки точности моделирования использовано предположение стационарности исследуемого процесса. В этом случае суммарный тепловой поток, проходящий через модельную область должен быть нулевым. В тестовом примере процесса с температурой газовой среды, равной 700 °С и температурой теплоносителя в трубе – 100 °С, погрешность модели составила $\varepsilon_q = 3,4$ %. Величина дискрета, при этом, составляла $d = 0,25$ мм.

Приведенные на рис. 6 распределения охватывают реальную область с размерами 16 × 18 мм. Шаг изотерм на диаграммах соответствует изменению избыточной температуры на 1 °С. Моделирование проводилось с пространственным разрешением $d = 0,125$ мм.

Тоновое выделение обращает внимание на зоны повышенных температурных градиентов на рисунке 6, которые требуют специального тщательного анализа.

Наложение температурных полей на рис. 6 позволяет сделать вывод об эффективности обрешения в пользу меньшего значения шага s_{rb} . Как видно по

числу изотерм на рис. 6, перепад избыточных температур в материале трубы увеличен на $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ для серии 111 по сравнению со 141 при совпадающих всех остальных параметрах.

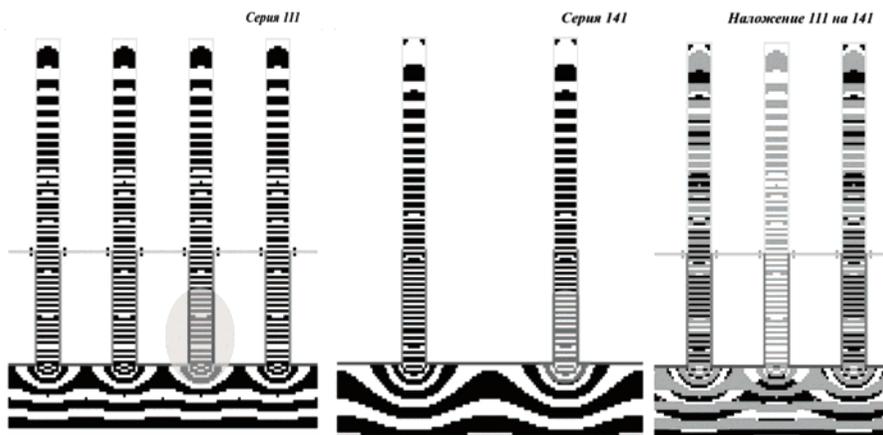


Рисунок 6 – Диаграммы избыточных температур при разной частоте следования оребрения: 111 – $s_{rb} = 4\text{ мм}$, $\varepsilon_q = 2,6\text{ \%}$; 141 – $s_{rb} = 8\text{ мм}$, $\varepsilon_q = 2,4\text{ \%}$, и их наложение

Выводы. Применение описанного моделирования показало его приемлемость и информативность при изучении процесса передачи тепла от греющих газов к рабочей среде в элементах теплоэнергетических установок, использующих поверхности нагрева с разрезанным спирально-ленточным оребрением. Получена гибкая возможность изменения значений параметров проведения эксперимента, что в рамках физических стендовых моделей затруднительно. При этом, применение программного обеспечения, которое в настоящее время не поддерживается фирмой-производителем, показало возможность загрузки и использования несколько устаревшего вычислительного парка.

Использование методики экспресс-оценок ошибок позволило получить точность, удовлетворительную с точки зрения современных требований как вычислительных, так и экспериментальных. Этот факт оказывает существенное влияние на качество и пространственное разрешение полученных результатов. Графическое наложение двух изображений температурных полей на рисунке 6 позволяет сделать обоснованный вывод в пользу увеличения частоты оребрения в рамках реализованной модели.

Учитывая высокую стоимость современных специализированных программных продуктов и системного математического обеспечения, а также затраты на их освоение, хотя бы на уровне пользователя, приведенная модель может оказаться достаточно эффективной. Предложенные способы моделирования доступны для реализации в других подобных задачах.

Список литературы. 1. *Галуцак И.В.* Моделирование газового потока в области оребрения трубы / *Н.В.Бабкова, И.В.Галуцак, В.Я.Горбатенко, А.М.Никитин* // Вестник НТУ «ХПИ» «Динамика и прочность машин». – 2010. – № 69. – С. 12-18. **2.** Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник. – Т. 2 / Под общ. ред. чл.-корр. АН СССР *В.А. Григорьева, В.М.Зорина*. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560 с. **3.** *Филитов Э.Б.* Метод численного исследования тепловой эффективности трубчатой поверхности нагрева с поперечно-лепестковым оребрением / *Э.Б.Филитов, Г.Б.Черепенников, Т.Г.Леценко* // Теплоэнергетика. – 2006. – № 6. – С. 36-40. **4.** *Крейт Ф., Блэк У.* Основы теплопередачи / *Крейт Ф., Блэк У.* – Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 512 с. **5.** Товажнянский Л.Л. Исследование гидродинамики турбулентных потоков в моделях: каналов пластинчатых теплообменников / *Л.Л.Товажнянский, А.Ю.Перевертайленко, В.П.Задорожный, А.М.Никитин* // Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов хим. производства: Всес. научн. конф., ХПИ, 11-13 июня 1985 г. – Харьков: Тез. докл. – Т. 3. – С. 46-47. **6.** *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа / *Л.Г.Лойцянский*. – М.: Наука, 1978. – 736 с. **7.** *Ши Д.* Численные методы в задачах теплообмена / *Д.Ши*. – Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 544 с. **8.** *Кокс Джойс Microsoft 97: Краткий курс / Кокс Джойс, Дадлей Кристина, Урбан Полли*. – Пер. с англ. – Спб.: Питер., 2001. – 256 с. **9.** *Мудров А.Е.* Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль / *А.Е. Мудров*. – Томск: МП «РАСКО», 1991. – 272 с.

Поступила в редколлегию 03.10.2011