

УДК 536.24

ДАВЫДЕНКО А.Б.

Ин-т технической теплофизики НАН Украины

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ЧЕРЕЗ ПОПЕРЕЧНО ОБТЕКАЕМУЮ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ ОРЕБРЕННУЮ СТЕНКУ

За допомогою методу чисельного моделювання досліджується теплопереніс через оребрену стінку до потоку теплоносія, що направлений перпендикулярно до бокової поверхні ребер. В результаті чисельного рішення задачі про течію теплоносія та теплопереніс через оребрену стінку і теплоносій з умовами четвертого роду на поверхні розподілення середовищ знайдено поля швидкостей теплоносія та поля температур в системі "оребрена стінка-теплоносій". В результаті аналізу отриманих результатів встановлено закономірності теплопереносу, що характерні для оребреної поверхні, яка обтікається поперечно.

Методом численного моделирования исследуется теплоперенос через оребренную стенку к потоку теплоносителя, направленному перпендикулярно к боковой поверхности ребер. В результате численного решения задачи о течении теплоносителя и теплопереносе через оребренную стенку и теплоноситель с условиями четвертого рода на поверхности распределения сред найдены поля скоростей теплоносителя и поля температур в системе "оребренная стенка - теплоноситель". В результате анализа полученных результатов установлены закономерности теплопереноса, характерные для поперечно обтекаемой оребренной поверхности.

By the numerical method a heat transfer process through the fined wall to liquid flow with the direction perpendicular to fins side surfaces is investigated. From the numerical solution results of the problem of fluid flow with heat transfer through fined wall and liquid with boundary conditions of the fourth kind on the surface dividing mediums the velocity fields in liquid and thermal fields in system "fined wall - fluid" are defined. Obtained features of heat transfer processes which are typical for transverse flows on fined wall are defined from analysis of results.

a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;

b – высота расчетной области, м ;

g – ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{с}^2$;

h – высота ребер, м ;

l – шаг оребрения, м ;

n – нормаль к поверхности, м ;

p – давление, Па ;

Q – тепловой поток, Вт ;

q – плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

s – длина пути вдоль поверхности, м ;

T – температура, К ;

u ; v – горизонтальная и вертикальная проекции скорости, $\text{м}/\text{с}$;

x ; y – горизонтальная и вертикальная координаты, м ;

α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$;

β – температурный коэффициент объемного расширения, $1/\text{К}$;

δ – толщина, м ;

ν – кинематический коэффициент вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$;

ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$;

τ – время, с .

Нижние индексы:

r – ребро;

s – стенка;

t – твердое тело;

$ж$ – теплоноситель;

∞ – невозмущенный поток;

Π – поверхность;

0 – величины, относящиеся к гладкой стороне стенки.

Введение

Использование развитых, в том числе оребренных поверхностей является одним из наиболее распространенных способов интенсификации теплообмена. Решения о геометрии оребренной поверхности и о конструкционных материалах для нее должны приниматься на основе предварительного расчетного анализа температурного со-

стояния соответствующей системы "ребро-стенка" в потоке теплоносителя. Физически наиболее обоснованной является сопряженная постановка задачи конвективного теплообмена, которая предполагает выполнение граничных условий четвертого рода на теплоотдающей поверхности. Решения сопряженных задач теплообмена для оребренных поверхностей встречаются в литера-

туре довольно часто, однако они в основном относятся к случаям либо свободной конвекции на развитой поверхности либо вынужденного течения теплоносителя вдоль ребер. На практике такие схемы организации теплопередачи встречаются чаще всего, поэтому закономерности процессов теплопереноса для этих схем изучены достаточно полно. Работы, в которых рассмотрено перпендикулярное к боковым поверхностям ребер течение теплоносителя, представлены в литературе в существенно меньшем количестве, хотя такая схема организации течения встречается в устройствах для отвода теплоты от радиоэлектронных устройств, в термоэлектрических кондиционерах и пр. Именно этот случай теплопередачи через оребренную поверхность будет рассмотрен в данной работе.

Постановка задачи

Рассматривается оребренная стенка в потоке теплоносителя, направление которого параллельно гладкой поверхности стенки и перпендикулярно боковым поверхностям ребер. Если пренебречь теплопереносом вдоль межреберных каналов (в направлении оси OZ), то систему дифференциальных уравнений движения и энергии для теплоносителя в плоскости, перпендикулярной к поверхности ребер, можно представить в двухмерном виде:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{\text{ж}}} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2\nu_{\text{ж}} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_{\text{ж}} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right]; \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + \frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{\text{ж}}} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_{\text{ж}} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(2\nu_{\text{ж}} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + g\beta_{\text{ж}}(T - T_0); \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + \frac{\partial(Tu)}{\partial x} + \frac{\partial(Tv)}{\partial y} = \quad (4)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(a_{\text{ж}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_{\text{ж}} \frac{\partial T}{\partial y} \right)$$

Теплоперенос через оребренную стенку описывается уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_{\text{т}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_{\text{т}} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (5)$$

Со стороны гладкой поверхности стенки задаются граничные условия первого или второго рода. Скорость и температура невозмущенного потока теплоносителя считаются известными. Для численного решения системы уравнений (1) – (5) принимается ряд допущений. Считается, что:

- физические свойства теплоносителя и материала оребренной стенки – постоянны;

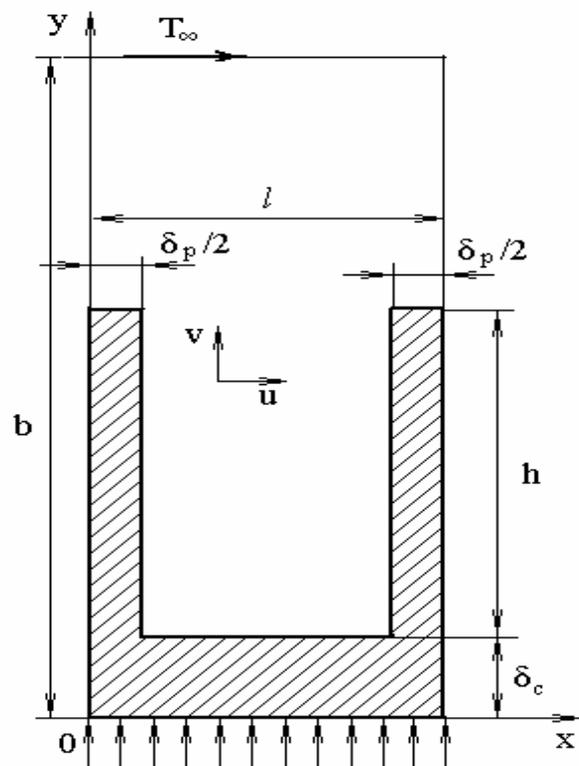


Рис. 1. Расчетная область.

- поток теплоносителя – неограниченный, течение – ламинарное;
- поля скоростей и температур периодически повторяются от ребра к ребру;
- плоскости симметрии, проходящие через середины ребер - адиабатные.

Последние два допущения позволяют для решения задачи рассматривать лишь участок оребренной стенки, изображенный на рис. 1, считая при этом, что профили скорости при $x=0$ и $x=l$ - одинаковы. С учетом вышесказанного, граничные условия для системы уравнений (1) – (5) можно сформулировать в виде:

а) $y = 0; 0 < x < l$: а) $T = T_0$ або б) $\frac{\partial T}{\partial y} = -\frac{q_0}{\lambda_m}$;

б) $y = b; 0 < x < l$: $\frac{\partial u}{\partial y} = 0; \frac{\partial v}{\partial y} = 0; T = T_\infty$.

в) $x = 0; 0 < y < h + \delta_c$: $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$;

$h + \delta_c < y < b$: $v = 0; u = u_\infty(y); T = T_\infty$;

г) $x = l; 0 < y < h + \delta_c$: $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$;

$h + \delta_c < y < b$: $v = 0; u = u_\infty(y); \frac{\partial T}{\partial x} = 0$;

д) На поверхностях контакта теплоносителя с твердой поверхностью:

$u = v = 0$;

$q_{п} - \lambda_{т} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=0} = -\lambda_{ж} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{n=0}; T|_{n=0} = T|_{n=0}$.

Высота расчетной области b является величиной условной, которая в случае неограниченного потока теплоносителя определяется в процессе решения методом последовательных приближений. На границах раздела сред задаются условия четвертого рода (условия сопряжения). Профиль скорости $u_\infty(y)$, задаваемый при $x = 0$ и $x = l$, строго говоря, неизвестен. В первом приближении он считается равномерным ($u_\infty(y) = U_\infty = \text{const}$). Система дифференциальных уравнений (1)-(5) с граничными условиями а) – д) решается численно. При составлении разностных уравнений используется метод контрольного объема [1]. Система разностных уравнений решается методом итераций, подобным рассмотренному в [1].

Анализ полученных результатов

В результате решения задачи найдены поля скорости и температуры в потоке теплоносителя и в оребренной стенке. Сравнительный анализ расчетных данных, полученных при различных соотношениях геометрических параметров оребрения, для различных конструкционных материалов и различных теплоносителей, позволил судить о степени интенсификации теплопереноса вследствие оребрения плоской стенки.

На рис.2 представлены характерные для данного случая картины течения теплоносителя и поля безразмерной температуры $\theta = (T - T_\infty) / (T_0 - T_\infty)$. Результаты относятся к случаю $h = 0,016$ м, $\delta_p/2 = 0,002$ м; $\delta_c = 0,004$ м; $l = 0,015$ м; $U_\infty = 2$ м/с. Теплоноситель – воздух; материал оребренной стенки - Сталь 10. На гладкой поверхности стенки ($y = 0$) задана постоянная температура $T_0 = 309$ К., температура невозмущенного потока теплоно-

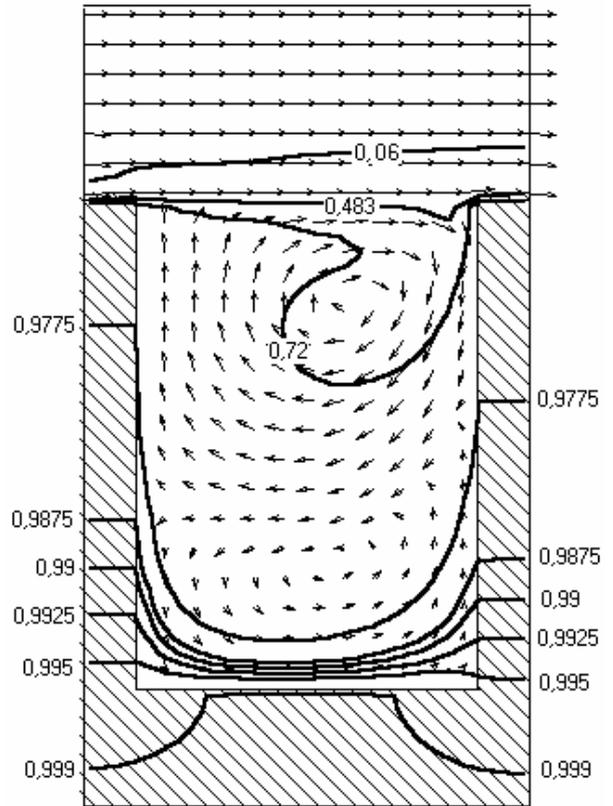


Рис. 2. Картина течения и поле безразмерной температуры в системе “ребреннная стенка – теплоноситель”.

сителя $T_{\infty} = 289$ К. Как видно из рисунка, картина течения теплоносителя вне ребер не существенно отличается от течения невозмущенного потока. Вблизи же ребер характер течения становится достаточно сложным. Поток, набегаящий на левое ребро, отрывается от правой верхней кромки его торцевой поверхности. Вследствие сравнительной малости толщины ребра, пограничный слой, формирующийся на его торцевой поверхности, весьма тонкий.

Оторвавшийся от правой кромки левого ребра поток образует в межреберном пространстве одну или две вихревые зоны, размеры которых и конфигурации зависят от шага оребрения l , высоты ребер h и, в некоторой степени от толщины ребра δ_r . Поток теплоносителя, набегаящий на левую кромку правого ребра, разделяется на две части. Одна часть движется над торцевой поверхностью правого ребра, а другая - опускается вниз вдоль левой боковой поверхности. На противоположной боковой поверхности левого ребра течение - подъемное. У поверхности левого ребра направление течения совпадает с направлением, вызванным естественной конвекцией. У поверхности же правого ребра эти направления - противоположны.

На рис. 2 кроме картины течения отображено также температурное поле системы "оребренная стенка - теплоноситель" в виде изолиний безразмерной температуры θ . Из анализа температурного поля можно определить направления тепловых потоков в стенке, ребрах и теплоносителе и оценить их величины.

Изотермы в ребрах - почти параллельны поверхностям торцов и практически горизонтальны. Из этого явствует, что температура по толщине ребра изменяется очень слабо.

Вследствие того, что теплопроводность материала ребер на три порядка выше теплопроводности теплоносителя (воздух), градиенты температур в пограничном слое теплоносителя возле поверхности ребер во столько же раз выше градиентов температуры в ребре. Вследствие этого изотермы, которые в ребрах подходят к боковым поверхностям почти под прямым углом, имеют в пограничном слое очень малый угол наклона к боковой поверхности ребер. Как видно из рис. 2, в верхней части межреберной области, где распола-

гается циркуляционная зона, изотермы по форме практически повторяют форму линий тока в вихре.

Особенности процесса конвективной теплоотдачи с оребренной поверхности к поперечному потоку определяются характером течения теплоносителя. От торцов ребер теплоотдача протекает в условиях отрыва пограничного слоя от торцевых кромок. Вследствие малой толщины пограничных слоев, образующихся на поверхностях торцов, теплоотдача с этих поверхностей - наиболее интенсивная. В межреберном канале в условиях вихревого течения, поток нагревается вначале от левой поверхности правого ребра (опускное течение), затем от межреберной поверхности стенки, и лишь потом от правой боковой поверхности левого ребра (подъемное течение). Вследствие этого, температура потока около правого ребра будет ниже, а интенсивность теплоотдачи с его поверхности - несколько выше, чем с поверхности левого ребра. В целом же интенсивность теплоотдачи с боковых поверхностей ребер и с межреберной поверхности стенки - значительно ниже, чем с торцов ребер. Типичное распределение плотности теплового потока вдоль поверхности теплоотдачи изображено на рис. 3. Эти результаты получены для оребренной стенки с теми же параметрами, что и в случае, отраженном на рис. 2, за исключением высоты ребер, которая в данном случае составляет $h = 0,006$ м. По оси ординат отложено отношение длины пути s вдоль теплоотдающей поверхности к ее полному периметру.

Интенсивность теплопереноса через оребренную поверхность в случае задания граничных условий первого рода на гладкой стороне стенки удобно оценивать по величине суммарного теплового потока $Q_n = \int_s q_n(s) ds$, отводимого с элементарной поверхности теплоотдачи, изображенной на рис. 1, при условии, что длина ребер L равна единице, а также по величине среднего коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{Q_n}{\int_s [T_n(s) - T_{\infty}] ds}$$

Зависимости этих величин от геометрических параметров оребрения представлены на рис. 4. Результаты соответствуют тем же значениям U_{∞} ; T_{∞} ;

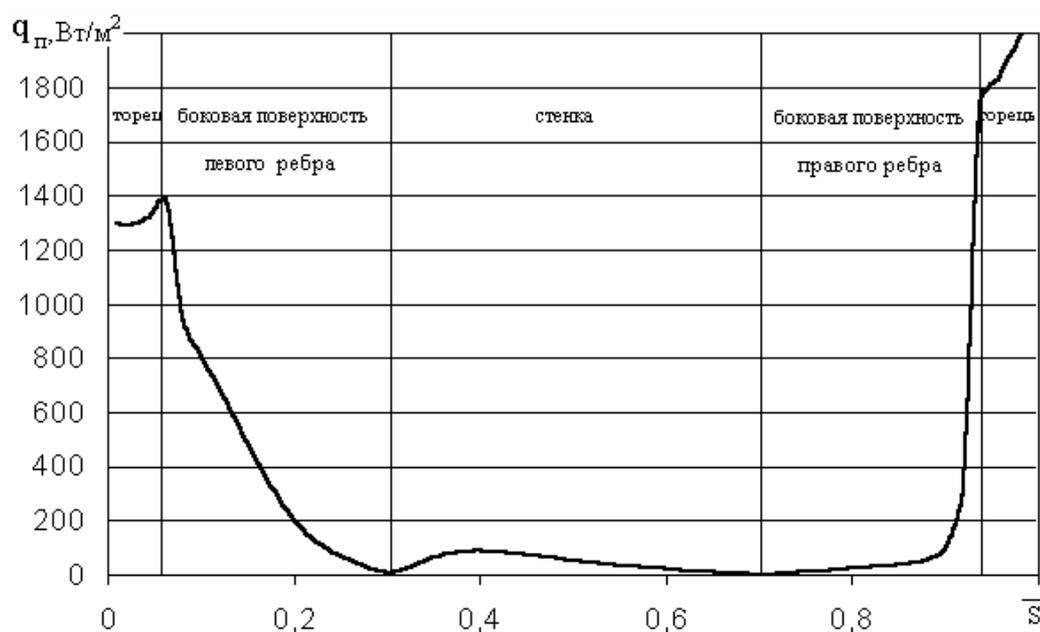


Рис. 3. Распределение плотности теплового потока вдоль поверхности теплообмена.

T_0 , а также тем же физическим свойствам теплоносителя и материала стенки, что были рассмотрены ранее.

Как видно из рис. 4б, величины средних коэффициентов теплоотдачи уменьшаются с увеличением высоты ребер. Это объясняется тем, что теплоотдача происходит в основном с поверхностей торцов. При условиях, что толщина ребра не изменяется, средний коэффициент теплоотдачи уменьшается при увеличении суммарной поверхности теплоотдачи, на значительной части которой (и на боковых поверхностях ребер и на межреберной поверхности стенки) локальные коэффициенты теплоотдачи сравнительно невелики. Уменьшение средних коэффициентов теплоотдачи происходит при увеличении высоты ребра или увеличении шага оребрения. Расчеты также показали, что для всех значений высоты ребра h и при всех значениях шагов оребрения, средний коэффициент теплоотдачи возрастает при увеличении толщины ребра.

Зависимость количества отведенной теплоты с элементарного участка оребренной стенки от геометрических параметров оребрения оказывается более сложной, чем для средних коэффициентов

теплоотдачи. Анализ расчетов показал, что количество отводимой теплоты Q_n возрастает с увеличением толщины ребра. Это объясняется тем, что, с одной стороны, увеличивается торцовая поверхность, теплоотдача от которой наиболее интенсивная, а с другой стороны, увеличение толщины ребер ведет к уменьшению их термического сопротивления в продольном направлении.

Увеличение шага оребрения также приводит к возрастанию суммарного количества отведенной с элементарного участка ребристой поверхности теплоты за счет увеличения длины участка гладкой стенки. Однако, осредненные показатели теплоотдачи с элементарного участка (например, средняя плотность теплового потока) при увеличении шага оребрения — падает.

Увеличение высоты ребер приводит, с одной стороны, к общему увеличению теплоотдающей поверхности, а с другой стороны — к росту термического сопротивления вдоль ребра, и, следовательно, к уменьшению теплоотвода с торцов ребер. Поэтому, как это видно из рис. 4а, увеличение высоты ребра может приводить как к увеличению, так и к уменьшению суммарного теплового потока Q_n . В целом же влияние высоты h на ко-

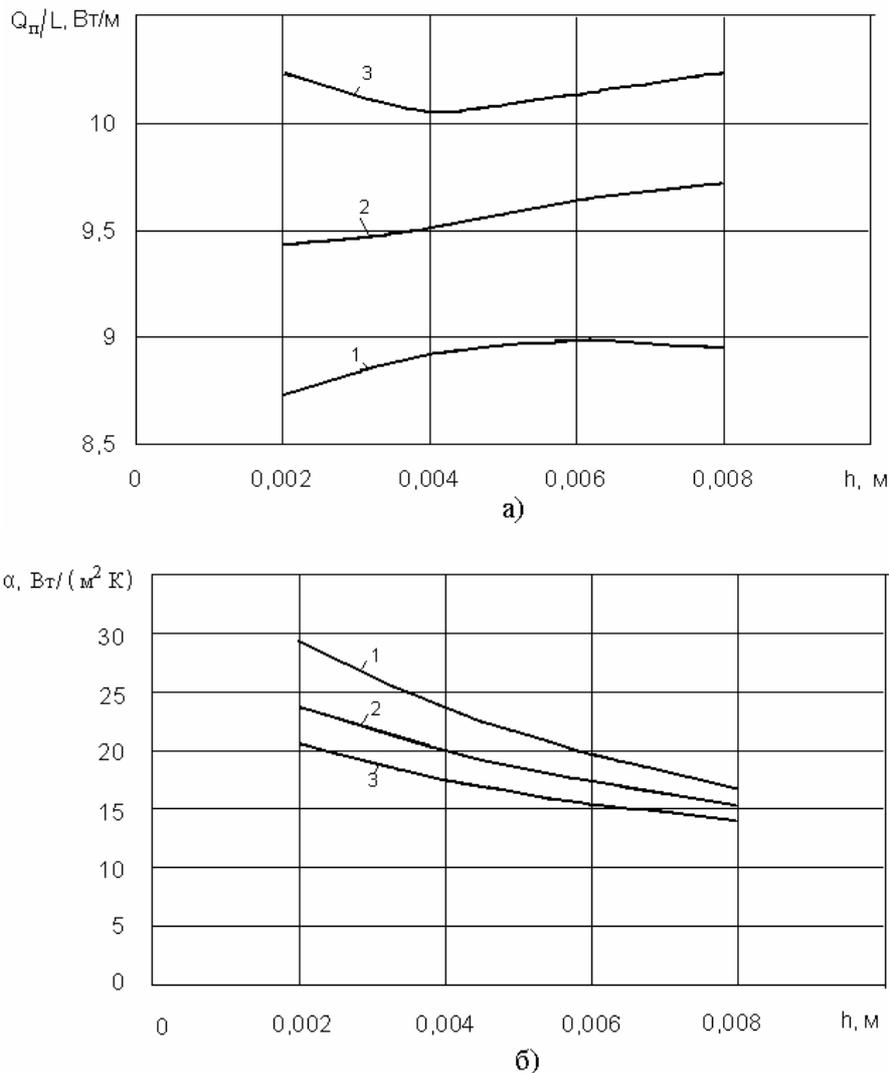


Рис. 4. Зависимости от высоты ребра h суммарного теплового потока Q и средних коэффициентов теплоотдачи α для $\delta_p/2 = 0,002$ м и $\delta_c = 0,002$ м при различных шагах оребрения: 1 – $l = 0,01$ м; 2 – $0,015$ м; 3 – $0,02$ м

личество отводимого теплоты - не значительно.

Рассмотренные результаты относятся к случаю задания граничных условий первого рода на гладкой стороне оребренной стенки. В случае задания на этой поверхности постоянной плотности теплового потока q_0 , общее количество теплоты, которое передается конвекцией теплоносителю, уже не зависит от геометрических и теплофизических параметров оребренной стенки, а определяется лишь плотностью теплового потока. Поэтому, влияние оребрения на процесс теплопереноса через стенку оценивается по величине средней температуры гладкой поверхности стенки. Чем эф-

фективнее работает система оребрения, тем ниже должна быть эта температура. Как показывают расчеты, высота ребра h при условии постоянства значений толщины ребра и шага оребрения мало влияет на величину средней температуры поверхности теплоотдачи. Однако ее значение возрастает при увеличении шага оребрения и уменьшается при увеличении толщины ребра. Объясняется это аналогично случаю граничных условий первого рода.

Выводы

При поперечном потоке теплоносителя теплоотдача будет максимальной с торцевых поверхно-

стей ребер. С боковых же поверхностей ребер и с межреберной поверхности стенки, которые находятся в зоне циркуляционного движения теплоносителя, уровень теплоотдачи - значительно ниже. Таким образом, интенсивность теплоотдачи уменьшается в направлении от торцовых поверхностей к основаниям ребер. Уровень теплоотдачи возрастает при увеличении толщины ребра и уменьшении шага оребрения, но слабо зависит от

высоты ребра. Поэтому, для интенсификации теплообмена за счет оребрения не обязательно использовать высокие ребра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости.- М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

Получено 18.10.2004 г.

УДК 532.695

ДАВЫДЕНКО Д.Б.

Ин-т технической теплофизики НАН Украины

ТРАЕКТОРИИ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ДВУХФАЗНОМ ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ, ОБРАБАТЫВАЕМОЙ В РПА

З використанням результатів чисельного моделювання течії однофазного середовища у робочих елементах циліндричного роторно-пульсаційного апарату (РПА) отримано наближене чисельне рішення задачі Лагранжа про рух одиничних часток дисперсної складової двофазного потоку. Розраховані швидкості та траєкторії часток в залежності від їх початкового положення в вхідному перерізі каналу внутрішнього статора РПА. Аналіз отриманих результатів дозволив оцінити можливість подрібнення дисперсних часток в потоці.

С использованием результатов численного моделирования течения однофазной среды в рабочих элементах цилиндрического роторно-пульсационного аппарата (РПА) получено приближенное численное решение задачи Лагранжа о движении одиночных частиц дисперсной составляющей двухфазного потока. Рассчитаны скорости и траектории частиц в зависимости от их исходного расположения во входном сечении канала внутреннего статора РПА. Анализ полученных результатов позволил судить о возможности дробления дисперсных частиц в потоке.

The approximate solution of Lagrangian problem of single particles motion of disperse component of two phase flow in the executive elements of cylindrical rotor-pulsating device (RPD) using results of modeling of single-phase agent fluent is received. The particles velocities and the trajectories are calculated depending on their initial positions in the entrance section of RPD inner stator channel. Received results analysis allows to predetermine the possibility of disperse particles splitting in the flow.

A - площадь лобового сечения частицы, m^2 ;

B - объем частицы, m^3 ;

c - коэффициент гидродинамического сопротивления;

d - диаметр сферической частицы, m ;

p - давление, Pa ;

r - радиальная координата, m ;

u - радиальная составляющая скорости, m/s ;

w - скорость в неподвижной системе отсчета, m/s ;

θ - угловая координата;

μ - динамический коэффициент вязкости, $Pa \cdot s$;

ρ - плотность, kg/m^3 ;

τ - время, s ;

ω - угловая скорость, $1/s$;

РПА - роторно-пульсационный аппарат;

Верхний индекс :

k - номер шага по времени.

Нижние индексы:

d - дисперсная среда;

c - непрерывная (несущая) среда;

0 - параметры во входном сечении канала внутреннего статора,

r - ротор;

r, R - направление вдоль радиуса.