

УДК 536.24

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН ВНЕШНИХ И ВНУТРЕННИХ СВОБОДНОКОНВЕКТИВНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТЕЧЕНИЙ С ИНТЕНСИФИКАЦИЕЙ

И.А. Попов

*Казанский государственный технический университет им.А.Н.Туполева,
420111, Россия, Казань, ул.К.Маркса, 10.
E-mail: popov_igor_alex@mail.ru*

Рассматриваются результаты по исследованию интенсификации теплоотдачи при свободной конвекции. Показаны технические приложения процессов свободной конвекции в современном машиностроении, энергетике, быту. Изложены методы экспериментального исследования процессов переноса при свободной конвекции. Представлены результаты исследований внутренних и внешних течений и теплоотдачи при свободной конвекции. Даны рекомендации по использованию различных типов интенсификаторов теплоотдачи при свободноконвективных течениях в энергетическом оборудовании.

Введение

Процессы переноса тепла и массы играют исключительно важную роль в природе и современной технике. Среди них заметное место занимает свободноконвективный теплообмен на ограничивающих нагреваемых или охлаждаемых поверхностях, который возникает в неоднородном поле массовых сил. Особенно большое значение проблема свободной конвекции приобретает для новой техники, в частности для атомной энергетики, космической техники, электроники. Появились многочисленные приложения в энергетике, строительстве, сельском хозяйстве и других отраслях.

Отличительной особенностью свободноконвективного теплообмена являются невысокие коэффициенты теплоотдачи. Это приводит к тому, что устройства, в которых реализуется свободноконвективный теплообмен, имеют значительные габаритные характеристики.

Уменьшить габаритные, а вместе с тем и весовые характеристики устройств со свободноконвективными системами охлаждения или нагрева, возможно с помощью интенсификации теплоотдачи. В настоящее время наиболее часто повышение эффективности свободноконвективных систем охлаждения или нагрева производится за счет развития поверхности нагрева (оребрения), увеличения скорости свободноконвективного потока (использования самотяги в каналах) и разрушения пограничного слоя за счет прерывистости теплообменных поверхностей.

В устройствах с вынужденной конвекцией теплоносителей широкое применение нашли поверхностные интенсификаторы теплоотдачи, которые воздействуют на поток только в пристенной области (не более толщины динамического пограничного слоя или его вязкого подслоя). Для свободноконвективных течений этот способ интенсификации исследовался в ограниченном количестве работ и в узком диапазоне определяющих режимных и конструктивных параметров.

Настоящий доклад посвящен исследованию интенсификации теплоотдачи при свободной конвекции. В работе представлены результаты исследований внутренних и внешних течений и теплоотдачи при свободной конвекции, даны рекомендации по исполь-

зованию различных типов интенсификаторов теплоотдачи при свободноконвективных течениях.

Гидродинамика и теплообмен на вертикальных поверхностях с элементами микро- и макрошероховатости

Первые экспериментальные исследования влияния шероховатости поверхности на естественную конвекцию воздуха были выполнены Р.С.Прасоловым. В работе [1] он представил данные экспериментального исследования влияния шероховатости на горизонтальных стальных трубах с внешними диаметрами $D=10, 21, 35, 45, 57$ и 76 мм на теплоотдачу к воздуху. Использовались пирамидальные элементы шероховатости с ромбическим основанием $0,18$ и $0,36$ мм и высотой h равной 1 и 2 мм, расположенные на расстоянии s от 1 до 2 мм друг от друга. Увеличение площади теплообмена для всех случаев шероховатости составляло 10% . Изучены переходные режимы от ламинарного до турбулентного течения при изменении числа Рэлея Ra_{mD} от $3 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^6$.

Сопоставление коэффициентов теплообмена для шероховатых и гладких труб показывает, что шероховатость не влияет на конвективный теплообмен при значениях критерия Ra_{mD} до 10^5 . В интервале $Re_{mD}=10^5-3 \cdot 10^6$, соответствующем верхней границе переходной области движения $Re_{mD}=3 \cdot 10^2-2 \cdot 10^7$, конвективный теплообмен растет по сравнению с теплообменом для гладких труб, а затем падает до значений, характерных для гладких поверхностей. Наличие максимума для зависимости $Nu_{mD}=f(h, s, Ra_{mD})$ находится в области переходных режимов течения. Смещение максимума теплообмена в работе Р.С.Прасолова в сторону увеличения критерия Ra_{mD} при переходе от грубой шероховатости к мелкой, сопровождающееся также увеличением максимума отношения α/α_0 от $1,5$ для $h=0,36$ мм до $1,9$ для $h=0,18$ мм в диапазоне числе $Ra_{mD} = 10^5 \dots 3 \cdot 10^6$ (при увеличении и уменьшении чисел Рэлея от указанного диапазона уровень интенсификации теплоотдачи уменьшался). Этот результат Р.С.Прасолов объясняет уменьшением толщины ламинарного подслоя при увеличении Ra_{mD} , вследствие чего меньшая шероховатость оказывает большее возмущающее воздействие при большем значении Ra_{mD} .

Н. Хейя, М.Такоучи и Т.Фудзии [2] провели интерферометрические эксперименты для горизонтальных цилиндров диаметрами 35 и 63 мм с плотно сформированными пирамидальными, продольными и поперечными прямолинейными элементами шероховатости с высотами от $0,15$ до $0,72$ мм и расстоянием между ними от $0,76$ до $2,0$ мм, полученными путем продольного и/или поперечного плотного фрезерования канавок треугольного сечения на поверхности цилиндра. Опыты проводились на воде и на воздухе. Увеличения среднего коэффициента теплоотдачи в диапазоне $Ra_D = 4 \cdot 10^4 \dots 10^7$ для воздуха и $Ra_D = 3 \cdot 10^6 \dots 2 \cdot 10^8$ для воды обнаружено не было. Здесь можно утверждать, что высота и шаг интенсификаторов были выбрано неверно. При ламинарном течении данные элементы шероховатости не воздействовали на пограничный слой.

Р.Дж.Джофре и Р.Ф.Баррон [3] получили данные по теплопередаче от изотермической вертикальной шероховатой поверхности с треугольными горизонтальными ребрами высотой $0,76$ мм и шагом $0,89$ мм при $Ra=(1 \dots 2) \cdot 10^9$. Наличие поверхностных интенсификаторов привело к более раннему ламинарно-турбулентному переходу. При числе $Ra \approx 10^9$ они обнаружили увеличение среднего числа Нуссельта около 200% по сравнению с данными Э.Р.Дж.Эккерта и Т.В.Джексона [4] для турбулентного режима на гладкой вертикальной поверхности. Однако сравнение было сделано не корректно. При данных числах Рэлея поток был турбулентным не по всей поверхности пластины. Сравнение с соотношениями для восходящих свободноконвективных ламинарных те-

чений вдоль пластины дали скорректированные значения интенсификации теплоотдачи – до 100%. Но и эти значения интенсификации А.Е.Берглас [5] подверг сомнению из-за не учета радиационной составляющей.

В работе С.В.С.Н.Састри, В.М.Мёрти и П.К.Сарма [6] исследовали цилиндр с шероховатостью, полученной путем обмотки цилиндра медной проволокой диаметром 0,45...1,45 мм. Опыты проводились с воздухом при изменении числа Рэлея в диапазоне от $7 \cdot 10^8$ до $3,5 \cdot 10^9$. При этом проволока наматывалась с шагом, равным диаметру проволоки, т.е. без промежутка между витками. Интенсификация теплоотдачи составила около 50%. Аналогичные данные получили К.Рамакришна, К.Н.Сифараму и П.К.Сарма [7] в диапазоне чисел $Ra = (1...5) \cdot 10^9$.

Все вышеприведенные данные относятся к микрошероховатости, полученной в ходе механической обработки поверхности. Сравнительный анализ опубликованных данных по влиянию микрошероховатости на средний коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции представлен на рис. 1.

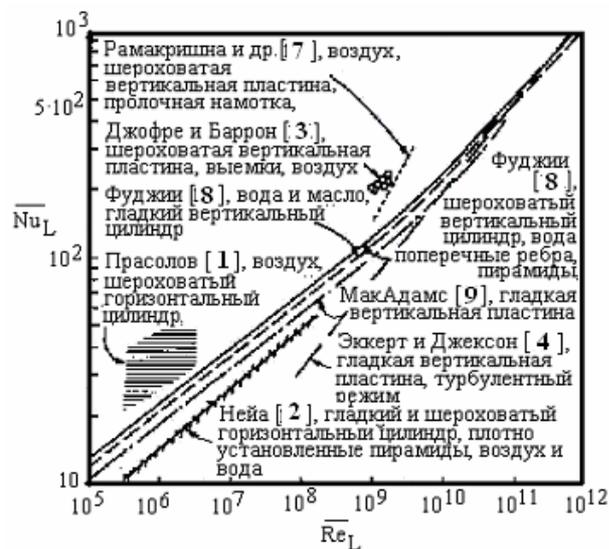


Рис. 1. Сравнение литературных данных по теплоотдаче на шероховатых поверхностях при свободной конвекции

ребра, вмонтированные с натягом в вертикальную пластину для уменьшения контактного сопротивления и образующие выступы высотой 6,35 мм и 3,18 мм. Фиксированный шаг расположения выступов, равный 25,4 мм обеспечивал соответственно относительный шаг выступов $t/h = 4$ и 8. Кроме того, исследовалась ступенчатая поверхность с прямыми и наклонными уступами. Уступы были расположены навстречу свободноконвективному потоку на нагреваемой вертикальной поверхности и имели фиксированную высоту 1,59 мм. При шаге уступов 12,7 мм, 25,4 мм и 50,8 мм относительный шаг уступов составлял соответственно $t/h = 8, 16$ и 32.

В экспериментах использовался метод интерферограмм, позволяющий получить распределение температур в пограничном слое и определить местные коэффициенты теплоотдачи. Сведения о всех проведенных экспериментах сведены в табл.1. Видно, что интенсификация на превышала 23,2%.

В работе С.К.Се и Р.В.Колдви [13] экспериментально исследовано свободноконвективное течение воздуха у нагретой при постоянной температуре вертикальной пластины с направленным навстречу потоку уступом с целью показать поля скорости и температу-

Влияние параметров турбулизаторов, таких как отношение высоты к расстоянию между ребрами, теплопроводность ребер, угол наклона ребер к потоку, на среднюю теплоотдачу при естественной конвекции вдоль вертикальных поверхностей исследованы в работах С.Х.Бьявнани и А.Бергласа [10–12]. С.Х.Бьявнани и А.Берглас [10] провели ряд опытов на вертикальной алюминиевой пластине высотой 178 мм и шириной 127 мм с различными интенсификаторами теплоотдачи на поверхности. Температура стенки варьировалась в пределах $48-75^\circ\text{C}$ для обеспечения числа $Gr=8 \cdot 10^7$. В качестве интенсификаторов использовались высокотеплопроводные (алюминиевые) и низкотеплопроводные (плексиглаз) периодические

ры и в конечном счете коэффициент теплоотдачи. Полученные в работе градиенты температур позволили получить зависимости для расчета локального коэффициента теплоотдачи на вертикальных пластинах с уступом при различных значениях Gr_x , x/L и относительной высоты уступа h/δ .

Таблица 1

| Характеристика геометрии поверхности теплообмена | Изменение теплосъема по отношению к поверхности равной по площади, % | Изменение теплосъема по отношению к поверхности равной по длине, % |
|--|--|--|
| Высокотеплопроводные выступы, $t/h = 8$, $t/s = 8$ | -23,06 | -10,15 |
| Высокотеплопроводные выступы, $t/h = 8$, $t/s = 16:5$ | -44,30 | -26,31 |
| Низкотеплопроводные выступы, $t/h = 8$, $t/s = 8$ | -19,31 | -4,54 |
| Низкотеплопроводные выступы, $t/h = 16$, $t/s = 16$ | -7,02 | 2,75 |
| Прямые уступы, $t/h = 8$ | -4,03 | 6,14 |
| Прямые уступы, $t/h = 16$ | 18,50 | 23,21 |
| Прямые уступы, $t/h = 32$ | 7,94 | 10,30 |
| Наклонные уступы, $t/h = 8$ | -5,78 | 2,31 |
| Наклонные уступы, $t/h = 16$ | -2,64 | 1,24 |
| Наклонные уступы, $t/h = 32$ | 8,30 | 10,03 |

Численное исследование течения и теплоотдачи на еще одном виде вертикальной профилированной пластины выполнено в работе Л.С.Яо [14]. Рассматриваемой в работе моделью является вертикальная волнообразная пластина. Поверхность пластины описывается уравнением $y = h \cdot \sin(k)x$, где h – амплитуда волны. Среднее число Нуссельта для синусоидальной волнистой поверхности всегда меньше, чем для плоской пластины. Однако полный тепловой поток от волнообразной пластины, имеющей большую теплообменную поверхность, примерно такой же, как от плоской пластины. Работа Л.С.Яо [14] является численным исследованием и требует экспериментального подтверждения. Однако ее следовало привести вследствие малочисленности работ по теплоотдаче при свободной конвекции на профилированных вертикальных поверхностях.

В работе Бурака В.С., Волкова С.В., Мартыненко О.Г. и др. [15,16] исследовалось течение и теплообмен на вертикальной стальной пластине размером $0,2 \times 0,3$ м с постоянным тепловым потоком при наличии одного, двух и трех низкотеплопроводных (фторопластовых) выступов длиной 0,2 м и сечением 10×10 мм, расположенных на различных расстояниях друг от друга. В процессе экспериментов число Рэлея изменялось от 0 до $Ra_L^* = 2,8 \cdot 10^3$. Исследование температурного поля проводилось с использованием интерферометра Маха–Цандера. Визуализация свободноконвективного течения около вертикальной пластины осуществлялась при помощи лазерного ножа с мелкой пудрой в качестве визуализирующей частиц.

В случае, когда расстояние между выступами составляет 10 мм ($s/h=1$), возникающее отрывное течение представляет собой два противоположно вращающихся круговых вихря. Наличие выступов на пластине с расстоянием между ними 20 мм ($s/h=2$) вызывает отрыв динамического пограничного слоя, плавно огибающего область препятствий. В отрывной области сразу за выступом наблюдаются пристенные циркуляционные течения, состоящие из двух противоположно вращающихся вихрей. Очевидно, что наличие относительно низкого поперечного градиента температуры в области между выступами, зарегистрированное при интерферометрических измерениях, обусловлено

существованием этих вихревых потоков, обеспечивающих интенсивный конвективный теплообмен. Вихревое движение газа занимает всю область между выступами, хотя перед вторым и третьим выступами следовало ожидать возникновения застойной зоны. При увеличении расстояния между выступами до 30 мм ($s/h=3$) форма вихрей становится более вытянутой и в области, непосредственно примыкающей ко второму выступу, образуется небольшая застойная зона. Дальнейшее увеличение расстояния между выступами приводит к возрастанию размеров застойной зоны и завершается присоединением динамического пограничного слоя к пластине в области между выступами.

На основе выполненных исследований В.С.Бурак, С.В.Волков, О.Г.Мартыненко и др. [15,16] сделали вывод, что возникающее вихревое течение в области между выступами интенсифицирует процесс теплообмена между пластиной и окружающей средой при соотношении зазора к высоте выступа s/h от 1 до 3. При больших значениях s/h , по мнению авторов, около верхнего по направлению течения газа выступа возникает застойная зона, в которой конвективный перенос тепла практически отсутствует, и теплообмен между пластиной и окружающей средой осуществляется преимущественно за счет теплопроводности.

В работе А.Бар-Коэна и В.М.Розенау [17] имеются ссылки на работы, посвященные исследованию теплоотдачи на пластинах в канале с горизонтальными и вертикальными канавками, имитирующими условия теплообмена на печатных электронных платах. Показано, что коэффициенты теплоотдачи от двумерных параллельных пластин с канавками больше, чем для гладких пластин при малых промежутках между пластинами, и равны таковым при промежутках между пластинами, соответствующих предельному случаю изолированной пластины. Интенсификация теплоотдачи при малых промежутках между пластинами зависит от геометрической формы канавок. Из анализа приведенного в работе [17] видно, что интенсификация для горизонтальных канавок достигает значений 1,5, а для двумерных крупных канавок 1,7–2,5. К сожалению, в работе не приводится более подробная информация о геометрии и размерах элементов шероховатости.

В работе С.Е.Квака и Т.Х.Сонга [18] проведено численное и экспериментальное исследование течения и теплообмена на вертикальных изотермических алюминиевых цилиндрах с периодическими горизонтальными прямоугольными выступами. Нагрев осуществлялся с одной стороны, но из-за высокой теплопроводности цилиндров реализовалось условие изотермического нагрева поверхности. На каждый цилиндр наносились по 5 выступов. Цилиндры располагались на расстоянии, чтобы выполнялось условие теплообмена от свободной поверхности. Параметры исследованных геометрий выступов приведены в табл.2 (где s – расстояние между выступами, t – шаг выступов, h – высота выступов, l – длина выступа по направлению движения потока). В экспериментах варьировался нагрев поверхностей, соотношения h/t и l/t .

Таблица 2

| Модель поверхности | $t=l+s$, мм | h/t | l/t |
|-----------------------|--------------|-------|-------|
| 1 – Квадратный выступ | 14 | 0,5 | 0,5 |
| 2 – Короткий выступ | 14 | 0,25 | 0,5 |
| 3 – Длинный выступ | 14 | 1,0 | 0,5 |
| 4 – Тонкий выступ | 15 | 7,15 | 0,2 |

Для $Ra_w=1,14 \cdot 10^4$ средняя теплоотдача на ребренной поверхности максимальна для модели 3 и она приблизительно на 25% больше, чем на вертикальной плоской пластине. Причем интенсификация теплоотдачи для модели поверхности 1 составляет 4,6%, для модели 2 – 2,8%, а для модели поверхности 4 наблюдается снижение сред-

ней теплоотдачи на 0,2%, несмотря на увеличение поверхности. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами С. Шакерина, М. Бона и Р.И. Лоэрке [19], А.Бергlsa и С.Х. Бравнани [10].

В работе М.А. Топоркова, В.Б.Кунтыша и А.Э.Пиира [20] представлены результаты по исследованию теплоотдачи на вертикальной трубе со спиральным оребрением из алюминиевой проволоки. Для ламинарного режима течения в воздухе увеличение коэффициента теплоотдачи составляет 1–7%.

Т.Фуджии, М.Фуджии и М.Такоучи [8] исследовали теплоотдачу в воду и веретенное масло от вертикального цилиндра большого диаметра с шероховатостью в виде дискретно расположенных ребер, периодических выступов и близко расположенных пирамидальных элементов при постоянной плотности теплового потока и числах $10^{10} < Ra^* < 10^{15}$. Увеличение поверхности за счет наличия элементов шероховатости составляло для поверхности с плотными пирамидами в 1,72 раза, для поверхности с одиночными трехмерными выступами в 1,01 раза, для дискретно-шероховатых поверхностей с периодическими поперечными кольцевыми выступами в 1,32 раза для $s/h=6,4$ мм; в 1,16 раза для $s/h=12,8$ мм; в 1,08 раза для $s/h=25,6$ мм. Т.Фуджии, М.Фуджии и М.Такоучи [8] по результатам своих заключений сделали следующие выводы. Интенсификация теплообмена в ламинарной области течения за счет поверхностных интенсификаторов теплообмена не наблюдалась (присутствовало даже 5% уменьшение интенсивности теплообмена), а для турбулентного течения интенсификация теплоотдачи не превысила 5% (в основном за счет развития поверхности) по сравнению с их ранее полученными данными для гладкого цилиндра, которые несколько выше аналогичных данных, полученных В.Х.МакАдамсом [9]. Незначительное увеличение теплоотдачи вызвано тем, что, например, высота элементов шероховатости в опытах была 0,5 мм, что явно недостаточно для воздействия на пограничный слой. Для воды критическое число Рэлея, соответствующее началу ламинарно-турбулентного перехода, увеличивается в 3–5 раз по сравнению с гладкой поверхностью.

В работе О.Г.Мартыненко и Ю.А.Соковишина [21] проведена систематизация некоторых работ по интенсификации теплоотдачи при свободной конвекции. Подобная попытка сделана и в работе Г.А.Дрейцера [22] для поверхностей с выступами и выемками.

В работе И.А.Попова и Р.А.Усенкова [23] исследовалась теплоотдача на вертикальной дискретно-шероховатой пластине шириной $b = 360$ мм, длиной $L = 1000$ мм и толщиной $\delta = 0,3$ мм. Реализовались граничные условия $q_w = \text{const}$ (постоянство плотности теплового потока). В качестве выступов использовались дюралюминиевые и текстолитовые стержни прямоугольного сечения шириной $a = 5,1$ мм и высотой $h = 4,1$ мм. Выступы устанавливались со следующими шагами $t = 8; 12; 20; 41; 83; 166; 333$ мм.

Полученные данные по визуализации потока и области t/h совпадают с данными [15,16], согласно которым в процессе естественной конвекции на вертикальной нагреваемой пластине при наличии одного или нескольких прямоугольных выступов при $t/h > 3$ возникает отрыв динамического пограничного слоя, сопровождающийся возникновением в отрывной области циркуляционного течения, состоящего из двух противоположно вращающихся вихрей. При $t/h < 3$ возникает вихревое течение в области между выступами. Ламинарный режим течения прослеживается во всем исследованном диапазоне основных определяющих параметров на вертикальной поверхности снабженной интенсификаторами теплообмена высотой $h = 4,1$ мм.

Наличие на вертикальной пластине дискретно установленных выступов приводит к увеличению теплоотдачи при ламинарном режиме до 2,79 раза по сравнению с гладкой вертикальной пластиной. Уровень теплоотдачи зависит от относительного шага выступов. Максимальные значения интенсифицированной теплоотдачи на дискретно-шероховатых поверхностях во всем диапазоне чисел Ra приходятся на $t/h = 2...3$. Уровень средних коэффициентов теплоотдачи составляет $\bar{\alpha} = 5,052...10,187$ Вт/м²К при оптимальных значениях $t/h = 2...3$. Анализ результатов визуализации показывает, что при таких относительных шагах между выступами возникает отрывное течение, представляющее собой один или несколько вращающихся вихрей (в зависимости от скорости потока). Наличие вихря (вихрей) вызывает интенсивное конвективное перемешивание слоев газа с различной температурой. Полученные данные по оптимальному шагу, равному $t/h = 2...3$, соответствуют выводам работ Квака [18] и Мартыненко [15,16].

Обобщение экспериментальных данных по местной теплоотдаче на дискретно-шероховатой поверхности производилось по уравнению подобия $Nu_x = f(Ra_x^\#, t/h)$, где в качестве определяющей температуры использовалась температура окружающего воздуха t_0 , а в качестве определяющего линейного размера – координата по длине пластины x . Так как интенсификаторы были изготовлены из хорошо теплопроводящего материала, то при расчетах местных коэффициентов теплоотдачи учитывалось увеличение площади теплообмена за счет наличия интенсификаторов, причем $F_{\text{инт}}/F_{\text{глад}} = 1,016...1,925$.

Результаты экспериментальных исследований местной теплоотдачи во всем диапазоне изменяемых параметров для вертикальной пластины при наличии теплопроводных интенсификаторов были обобщены зависимостями:

$$Nu_x = 0,824(Ra_x^\#)^{0,22} \text{ для } t/h = 2...10, \quad (1)$$

$$Nu_x = 0,996(Ra_x^\#)^{0,22} (t/h)^{-0,069} \text{ для } t/h = 10...80. \quad (2)$$

Для средней теплоотдачи получены следующие зависимости:

$$\overline{Nu_L} = 0,936(Ra_L^\#)^{0,22} \text{ для } t/h = 2...10, \quad (3)$$

$$\overline{Nu_L} = 1,132(Ra_L^\#)^{0,22} (t/h)^{-0,069} \text{ для } t/h = 10...80. \quad (4)$$

Представленные формулы справедливы в диапазоне $Ra_x^\# = 5,76 \cdot 10^5 ... 1,53 \cdot 10^{12}$; $Ra_L^\# = 1,33 \cdot 10^8 ... 5,84 \cdot 10^{11}$; $t/h = 2...80$ с погрешностью $\pm 20\%$ при доверительной вероятности 0,95. За определяющую температуру принята температура окружающего воздуха t_0 .

В работе Попова И.А. [24] представлены результаты исследования режимов обтекания вертикальных поверхностей со сферическими выемками и выступами свободноконвективными течениями. Для оценки целесообразности интенсификации теплоотдачи с помощью систем сферических выемок и выступов произведена серия экспериментов по определению тепловой мощности радиатора «Расстал-7», поверхности которого имели 3 различных конфигурации: 1) без интенсификаторов; 2) с интенсификаторами в виде систем выемок и выступов; 3) с интенсификаторами в виде системы сферических отверстий. Последний вид интенсификаторов предназначен для периодического разрушения пограничного слоя.

Анализ проведенных тепловизионных исследований интенсифицированных радиаторов показал, что в сферических выемках температура поверхности выше, т.е. коэффициент теплоотдачи в них меньше, чем на гладкой поверхности. За выемками видно незначительное повышение теплоотдачи. В среднем теплосъем оказывается на 5–10% ниже, чем без интенсификации, несмотря на увеличение поверхности за счет наличия выемок и выступов на 14%. Радиатор с периодическими отверстиями имеет мощность такую же, что и гладкостенный радиатор. Это связано с тем, что отверстия позволяют разрушать внутренний пограничный слой в свободноконвективном течении, но уменьшают поверхность теплообмена. В данной конструкции площадь отверстий составляла <2% от площади радиатора.

Гидродинамика и теплообмен в вертикальных открытых каналах при наличии элементов шероховатости

Дж.Танда [25] исследовал возможность использования в качестве интенсификаторов теплообмена в вертикальных плоских каналах при свободной конвекции поперечных, дискретно установленных выступов квадратного сечения. Вертикальный канал был организован с помощью вертикальных алюминиевых пластин высотой $L=175$ мм и шириной 300 мм, установленных на расстоянии $b=8,75-70$ мм. На нагреваемой пластине располагались поперечные алюминиевые выступы квадратного сечения с размером стороны $h=4,85$ мм на расстоянии $s=35$ мм.

Из результатов работы видно, что существует оптимальное значение $b/L=0,1$ ($h/b=0,28$), при котором коэффициенты теплоотдачи максимальны. При увеличении отношения b/L до 0,4 средний коэффициент теплоотдачи незначительно уменьшается (до 5%), в то время как при уменьшении b/L с 0,1 до 0,05 наблюдается резкое уменьшение среднего коэффициента теплоотдачи (на 25%).

Сравнение результатов исследования средней теплоотдачи в дискретно-шероховатом канале с данными для гладкого канала показало, что результаты для дискретно-шероховатого канала при $b/L=0,05-0,4$ и для различных температурных напоров от 10 до 45К (ламинарное течение) все данные оказались ниже данных для гладкого канала. Снижение уровня интенсивности теплообмена составляет 28–44% на дискретно-шероховатой поверхности за счет наличия выступов. Сравнение по общим тепловым потокам (с учетом развития поверхности) показало не столь существенное уменьшение – 8-28%. Результаты Дж.Танды хорошо согласуются с результатами С.Х.Бьявнани и А.Бергlsa [10] для дискретно-шероховатых поверхностей в неограниченном объеме, у которых снижение интенсивности теплообмена составило 23% без учета развития поверхности и 10% с учетом развития поверхности за счет наличия на вертикальной изотермической поверхности выступов квадратного сечения при $s/h=8$. Дж.Танда сделал вывод, что использование поперечных выступов на пластине для интенсификации теплообмена, несмотря на успешное применение в условиях вынужденной конвекции, в диапазонах изученных параметров при свободной конвекции не приносит результата – интенсификации теплообмена не наблюдается.

И.Х.Ханг и В.М.Шиау [26] исследовали теплоотдачу около одиночного поперечного выступа на пластине в плоском открытом канале при свободной конвекции воздуха в условиях равномерного асимметричного нагрева. Стальные пластины высотой $L=22,5$ см и шириной 38 см располагались на расстоянии $b=4-16$ см друг напротив друга и организовывали вертикальный плоский канал. Одна из пластин в ходе эксперимента нагревалась при условии $q=\text{const}$, другая пластина была теплоизолирована. На нагреваемой пластине посередине высоты устанавливался низкотеплопроводный брус из бальзы

высотой $h=20$ мм и шириной $l=40$ мм (длина бруса равна ширине пластине – 38 см). Выбранные параметры позволяли получить параметр канала $b/h=2-8$. Все эксперименты проводились при стационарном режиме и плотности тепловых потоков от стенки в воздух $q=41,32-269,35$ Вт/м².

В работе показано, что параметр b/h не влияет на теплоотдачу при его изменении в диапазоне $b/h=2-8$ и что до выступа течение носит ламинарный характер, а после – турбулентный. К сожалению, И.Х.Ханг и В.М.Шиану в работе [26] не оценивали возможность интенсификации теплоотдачи посредством выступов. Но можно твердо утверждать, что выбор высоты ребра был сделан неверно (намного больше толщины пограничного слоя в зоне размещения выступа), что должно было привести к уменьшению среднего коэффициента теплоотдачи на пластине в целом. Кроме того, чрезмерная высота выступа привела к нехарактерной картине обтекания выступа.

В.Аунг, Т.Дж.Кесслер и К.А.Бейтин [27] исследовали теплообмен на пластинах с квадратными выступами и прямоугольными поперечными выступами. Было получено хорошее согласование полученных результатов с теплоотдачей на гладких поверхностях.

В работе Г.Р.Петерсона и А. Ортеги [28] приведены результаты некоторых работ по свободной конвекции в негладких каналах. Установлено, что шероховатость на пластинах, создаваемая печатными платами, не влияет на теплообмен пластин.

В работе С.А. Саида и Р.Дж. Крэйна [29] рассматриваются результаты численного и экспериментального исследования стационарного ламинарного течения воздуха и теплообмена в вертикальном плоском канале шириной $b/L=0,1364-0,3636$ с одним полукруглым выступом высотой $t/L=0,091$. Установлено, что наличие выступа уменьшает среднее число Nu при режимах переходного течения в канале на 5% при $Ra=10^4$ и на 40% – при $Ra=10$.

В работах И.А.Попова, Б.Б.Костылева и др [30–32] исследовались теплообмен и течение при свободной конвекции в вертикальных цилиндрических дискретно-шероховатых каналах. При ламинарном режиме течения в дискретно-шероховатых каналах наблюдается интенсификация теплоотдачи до 1,2 раз, а при переходе к турбулентному режиму теплоотдача равна теплоотдаче в гладком канале или даже меньше. Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче в цилиндрическом дискретно-шероховатом канале производилось по следующей модели $Nu_D = f\{Ra^*, D/L, 2h/D, t/D\}$, где в качестве определяющей температуры использовалась температура потока на входе в трубу t_0 , а в качестве определяющего линейного размера – внутренний диаметр трубы D . В итоге результаты экспериментальных исследований для дискретно-шероховатых каналов были обобщены зависимостью:

$$Nu = 0,956Ra^{*0,239} \left(\frac{2h}{D}\right)^{-0,189} \left(\frac{D}{L}\right)^{0,235} \left(\frac{t}{D}\right)^{0,113} \quad (5)$$

Из анализа результатов работы И.А.Попова и Р.А.Усенкова [23] по исследованию средней теплоотдачи в вертикальных плоских дискретно-шероховатых каналах с односторонним нагревом можно сделать вывод о том, что наличие в вертикальном канале дискретно установленных выступов приводит к увеличению теплоотдачи при ламинарном режиме примерно в 1,01...5,34 раза по сравнению с гладким вертикальным каналом, таким образом, интенсификация теплоотдачи в этом случае выше, чем на дискретно-шероховатой поверхности. Наибольшая интенсификация достигается при $t/h = 20...40$. При уменьшении относительного шага теплоотдача резко снижается, то же происходит и при увеличении относительного шага.

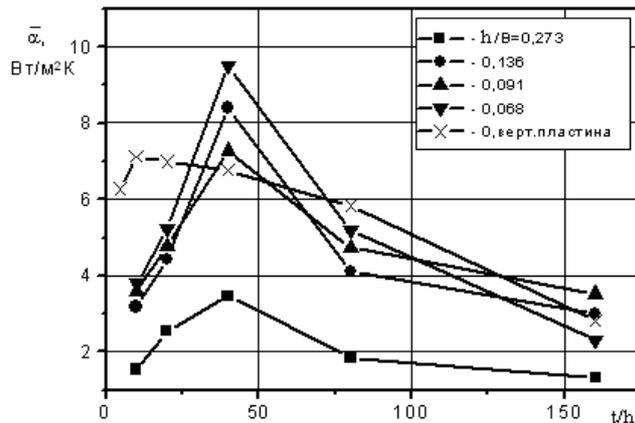


Рис.2. Зависимость $\bar{\alpha}$ на вертикальной дискретно-шероховатой поверхности и в вертикальном дискретно-шероховатом канале с односторонним нагревом от геометрических параметров интенсификаторов при фиксированном $Ra_L^\# = 1,4 \cdot 10^{11}$

обобщены зависимостью:

$$\overline{Nu}_B = 0,1497 (Ra_B^\#)^{0,202} (t/h)^{0,351} (h/B)^{-0,335}, \quad (6)$$

где $\overline{Nu}_B = \bar{\alpha} B / \lambda$, $Ra_B^\# = g \beta q_w \rho^2 c_p B^5 / (\mu \lambda^2 L)$. Зависимость описывает все экспериментальные данные с погрешностью $\pm 20\%$ при доверительной вероятности 0,95. Зависимость справедлива в диапазоне изменения определяющих параметров – $Ra_B^\# = 20,7 \dots 1,4 \cdot 10^6$; $t/h = 10 \dots 40$; $h/B = 0,068 \dots 0,27$.

Гидродинамика и теплообмен в вертикальных открытых каналах при наличии закрутки потока

При вынужденной конвекции теплоносителя в трубах используется различные виды местной и постоянной закрутки потока. Интенсификация теплообмена в каналах с постоянной закруткой потока достигает 2,5 раза при сопоставимом росте гидросопротивления. По аналогии с вынужденной конвекцией в работах И.А.Попова, Б.Б.Костылева, и др [30–32] проведены исследования возможности интенсификации теплоотдачи в цилиндрической трубе с постоянной закруткой потока закрученной лентой с относительными шагами закрутки $s/D = 8,5, 9,7, 10,3, 13,3, 16,9, 20,6$, а также с одновременной закруткой потока лентой и разрушением в пристенной области пограничного слоя кольцевыми вставками высотой $h = 2, 3, 3,8$ мм и шагом размещения $t = 43, 50, 100$ мм. Использование низкотеплопроводного материала ленточного закручивателя позволило исключить развитие поверхности и выявить интенсификацию теплообмена только за счет изменения гидродинамической картины течения.

Для канала с $L/D = 9,68$ наблюдается интенсификация теплоотдачи при $Ra^* = 6 \cdot 10^4 \dots 5 \cdot 10^5$ примерно в 1,2 раза по сравнению с гладким каналом; для канала с $L/D = 13,32$ интенсификация теплоотдачи при установке в канал скрученной ленты не обнаружена, для канала с $L/D = 16,95$ наблюдается интенсификация теплоотдачи до 1,3 раза при $Ra^* = 10^4 \dots 4 \cdot 10^5$ как для канала со скрученной лентой, так и для канала,

На рис.2 представлена зависимость среднего коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}$ на вертикальной дискретно-шероховатой поверхности и в вертикальном дискретно-шероховатом канале с односторонним нагревом от геометрических параметров интенсификаторов при фиксированном $Ra_L^\# = 1,4 \cdot 10^{11}$.

Результаты экспериментальных исследований средней теплоотдачи по длине вертикального канала, при наличии теплопроводных интенсификаторов во всем диапазоне изменяемых параметров при свободной конвекции и одностороннем нагреве, были

имеющего дискретные кольцевые поперечные выступы и скрученную ленту одновременно; для канала с $L/D = 20,58$ наблюдается интенсификация теплоотдачи до 1,2 раза при $Ra^* = 10^4 \dots 10^5$ при наличии в нем скрученной ленты с $s/D = 10,29$ и $20,58$. Можно сделать вывод, что интенсификация теплоотдачи в каналах со скрученной лентой наблюдается при ламинарном режиме течения с макровихрями.

Результаты экспериментальных исследований во всем диапазоне изменяемых параметров для каналов с постоянной закруткой потока были обобщены зависимостью:

$$Nu = 7,491(Ra^*)^{0,207} \left(\frac{D}{L}\right)^{0,545} \left(\frac{s}{D}\right)^{-0,192} . \quad (7)$$

Выявленная интенсификация теплообмена в 1,2 раза в условиях свободноконвективного течения при постоянной закрутке потока может быть увеличена за счет использования спиральной ленточной вставки из высокотеплопроводного материала и действия эффекта внутреннего оребрения трубы. В работах В.К.Щукина [33] показано, что эффект оребрения ленточным завихрителем может увеличить тепловой поток в стенку трубы примерно до 30%, причем эта поправка имеет существенное значение при небольшой интенсивности теплообмена, что обычно и наблюдается при свободной конвекции и достаточно хорошем контакте ленточного завихрителя со стенкой трубы.

Свободная конвекция в ограниченном пространстве при шероховатых поверхностях

В предыдущих главах подробно рассмотрены вопросы интенсификации свободноконвективной теплоотдачи на вертикальных шероховатых поверхностях в неограниченном объеме и вертикальных открытых каналах. Для лучшего понимания влияния шероховатости на теплоотдачу следовало бы рассмотреть и другие виды свободной конвекции. Например, в литературе имеются данные по теплоотдаче на шероховатых поверхностях при свободной конвекции в замкнутых пространствах.

М.С.Бон и Р.Андерсон [34] исследовали теплоотдачу при свободной конвекции от крупной механической шероховатости на вертикальных поверхностях в ограниченном объеме. Исследования проводились в кубической замкнутой полости высотой 292 мм, шириной и длиной 305 мм. Одна из стенок выполнена из алюминия и нагревается резистивными нагревателями, остальные стенки выполнены из лусита и охлаждаются. В экспериментах изменялась шероховатость только одной вертикальной нагреваемой стенки. В экспериментах все измерения повторялись при двух случаях: при постоянном тепловом потоке и постоянной температуре стенки. М.С.Бон и Р.Андерсон установили, что максимальная интенсификация теплоотдачи в отдельных точках шероховатой изотермической поверхности составляла до 40% и на всех поверхностях в среднем до 16% при рециркуляционном течении воздуха с $Ra = 3,3 \cdot 10^{10}$ в замкнутом пространстве. В каждом из рассматриваемых случаев (постоянный тепловой поток и постоянная температура стенки) увеличение среднего коэффициента теплоотдачи не обнаруживалось до тех пор, пока протяженность зоны перехода не достигала примерно 40% высоты стенки. При числах $Ra < 2 \cdot 10^{10}$, характерных для ламинарного режима течения, интенсификации теплообмена обнаружено не было. Для расчета среднего коэффициента теплоотдачи М.С.Бон и Р.Андерсон предложили следующие зависимости:

– для изотермических граничных условий:

$$Nu = 0,033Ra^{0,343} ; \quad (8)$$

– для случая постоянного теплового потока:

$$Nu = 0,234Ra^{*0,218}. \quad (9)$$

В другом подобном исследовании С.Шакерина, М.С.Бона и Р.И.Лоэрке [19,35] теплоотдача исследовалась в замкнутом пространстве с поперечными ребрами квадратного сечения на нагреваемой стенке. Увеличение средней теплосъема с поверхности с одиноким выступом обуславливалось увеличением поверхности теплоотдачи и ускорением потока на верхней площадке выступа. Увеличение среднего числа Нуссельта Nu_L на поверхности с одним ребром было около 12%, хотя увеличение поверхности составляло 32%. Теплоотдача для поверхности между двумя близко расположенными элементами шероховатости должна быть относительно низкой. Однако установка второго выступа в следе первого при относительном шаге $s/h=1$ не привела к изменению среднего для дискретно-шероховатой поверхности числа Nu_L по сравнению с поверхностью с одним выступом при $Ra_L=10^6$. Увеличение шага между выступами s/h с 1 до 2 приводит к увеличению Nu_L на 3,9%, т.е. интенсификация теплоотдачи на поверхности с двумя ребрами составляла 16%.

Влияние уступов на теплообмен при естественной конвекции в вертикальном слое жидкости с изотермическими боковыми стенками исследовалось в работе В.П Ивакина и А.Н Кекалова [36]. Экспериментальные данные по теплоотдаче получены для одиночных уступов высотой $h=10$ мм и шириной 10 мм, а также для регулярных уступов высотой $h=5$ мм с шагом 20 мм. Одиночный уступ, установленный на вертикальной стенке, высота которого соответствует удвоенному расстоянию от стенки до области максимума скорости, оказывает незначительное влияние на профиль скорости уже на расстоянии порядка 3,5 высоты уступа. При наличии уступа высотой порядка толщины пограничного слоя его влияние на профиль температуры мало на расстоянии от уступа, равном его высоте, а отклонение локального числа Нуссельта от экспериментальной зависимости для течения без уступов не превышает 13%.

В работе В.И.Терехова и др. [37] численно рассчитана теплоотдача в вертикальной прослойке с односторонними и двухсторонними дискретно установленными поперечными ребрами. В зависимости от шага расположения выступов и их взаимного размещения на противоположных стенках вертикальной узкой полости возможна интенсификация теплопереноса в зазоре до 70%.

На основе приведенных опытных данных можно предположить, что выбор оптимального интервала расположения элементов шероховатости может быть определяющим для достижения максимальной интенсификации.

Заключение

Выполненный обзор и анализ имеющихся данных показал, что они противоречивы по отношению к возможности интенсификации свободноконвективного теплообмена. Подробный обзор дан в работе автора [24].

В одних работах за счет использования шероховатых поверхностей была достигнута интенсификация теплоотдачи до 100%, в других интенсификация теплоотдачи достигнута не была. В этом случае вставал вопрос – в каких случаях и при каких формах поверхности достигается интенсификация теплоотдачи?

Это достаточно важный вопрос, так как интенсификация теплоотдачи при свободной конвекции важна в системах охлаждения различных технических систем.

В докладе представлены данные автора, которые отвечают на поставленный вопрос. Можно утверждать, что возможна интенсификация теплоотдачи при свободной конвекции на вертикальных поверхностях в неограниченном пространстве и в каналах за счет использования различных типов шероховатости и закрутки потока.

Установлено влияние дискретных поперечных выступов на теплоотдачу на вертикальной пластине при ламинарном режиме течения и выявлено, что уровень средней теплоотдачи на вертикальной поверхности с выступами до 2,79 раза выше, чем на гладкой поверхности в исследованном широком диапазоне изменения определяющих параметров. Максимальная теплоотдача наблюдалась при относительном шаге выступов $t/h=2\dots3$.

Установлено влияние дискретных поперечных выступов на теплоотдачу в вертикальном канале при ламинарном режиме течения и выявлено, что уровень средней теплоотдачи в вертикальном плоском канале с теплопроводными выступами до 5,3 раза выше, чем в гладком канале в исследованном диапазоне изменения определяющих параметров. Максимальная интенсификация наблюдалась при $t/h=40$.

Установлено влияние постоянной закрутки потока в вертикальных цилиндрических открытых каналах на теплоотдачу и выявлено, что интенсификация за счет закрутки потока достигает 20% и может быть увеличена еще на 30% за счет использования высокопроводного материала спирального закручивателя потока.

На основе экспериментальных исследований теплоотдачи и течения на интенсифицированных вертикальных поверхностях и в вертикальных каналах в условиях свободной конвекции в широком диапазоне определяющих параметров получены обобщенные зависимости для расчета теплоотдачи.

Материалы подготовлены по результатам работ, выполненных в рамках и при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 06-08-08145-офи) и Минобразования России (программы № 02.516.11.6025, 02.516.11.6001).

Литература

- [1] Прасолов Р.С. О влиянии шероховатости на теплообмен при свободной конвекции в воздухе // Инженерно-физический журнал. 1961. №4. с.3–7.
- [2] Heya, N., Takeuchi, M., and Fujii, T. Influence of surface roughness on free convection heat transfer from a horizontal cylinder. Chem.Engng. J., 1982. №23. pp.185–192.
- [3] Jofre, R.J., and Barron, R.F. Free convection heat transfer to a rough plate. ASME Paper №67-WA/HT-38. 1967.
- [4] Eckert, E.R.G., and Jackson, T.W. Analysis of turbulent free convection boundary layer on a flat plate. NACA Report 1015. 1951.
- [5] Bergles, A.E., and Junkhan, G.H.. Energy conservation via heat transfer management. Quartely progress report №C00-4649-5. 1 January-31 March. 1979.
- [6] Sastry, C.V.S.N., Murty, V.N., and Sarma, P.K.. effect of discrete wall roughness on free convection heat transfer from a vertical tube. paper presented at the Int. Conf. of Heat and Mass Transfer on Turbulent Buoyant Convection. Dubrovnik, Yugoslavia. 1976.
- [7] Ramakrishna, K., Seetharamu, K.N., and Sarma, P.K.. Turbulent heat transfer from a rough surface. J. Heat Transfer. 1978. №100, pp.727–729.
- [8] Fujii, T., Fujii, M., and Takeuchi, M. Influence of various surface roughness on the natural convection. Int.J. Heat Mass Transfer, 1973. №16. pp.629–640.
- [9] McAdams, W.H. Heat transmission. 3rd Edn. McGraw-Hill, New York. 1954.

- [10] Bhavnani S.H., and Bergles A.E. Effect of surface geometry and orientation on laminar natural convection heat transfer from a vertical flat plate with transverse roughness elements. *Int.J. Heat Mass Transfer*. 1990. Vol.13, №5, pp.965-981.
- [11] Bhavnani S.H., and Bergles A.E. An experimental study of laminar natural convection heat transfer from wavy surfaces. *ASME Proc. 1988 National Heat Transfer Conf.*, New York (edited by H.R.Jacobs), ASME-HTD/96. 1988. Vol.2. pp.173–180.
- [12] Bhavnani S.H., and Bergles A.E. Interferometric study of natural convection heat transfer from an isothermal vertical flat plate with transverse roughness elements. In *Current Research in Heat and Mass Transfer* (Edited by M.V.Krishnamurthy et al.), Hemisphere, New York, 1986. pp.1–12.
- [13] Се С.К., Колдви Р.В. Естественная конвекция воздуха от нагретой пластины с направленным навстречу потоку уступом // *Теплопередача*, 1977, №3, 102–108.
- [14] Яо Л.С. Свободная конвекция вдоль волнистой поверхности // *Теплопередача*, 1983, т.105, №3, с.43–46.
- [15] Бурак В.С., Волков С.В., Мартыненко О.Г., Храмцов П.П., Ших И.А. Свободно-конвективное течение на вертикальной пластине с постоянным тепловым потоком при наличии одного или нескольких уступов // *Инженерно-физический журнал*, 1994. Т.57, №3-4, с.190–196.
- [16] Burak V.S., Volkov S.V., Martynenko O.G., Khramtsov P.P. and Shikh I.A. Experimental study of free-convection flow on a vertical plate with constant heat flux in the presence of one or more steps. *Int.J. Heat Mass Transfer*, 1995, Vol.38, №1, pp.147–154.
- [17] Бар-Коэн А., Розенау В.М. Термически оптимальный промежуток между вертикальными пластинами, охлаждаемыми свободной конвекцией // *Теплопередача*. 1984. т.106. №1. с.114–122.
- [18] Kwak C.E. and Song T.H. experimental and numerical study on natural convection from vertical plates with horizontal rectangular grooves. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 1998. Vol.41. № 16. pp.2517–2528.
- [19] Shakerin, S., Bohn, M.S., and Loehrke, R/I. Natural convection in an enclosure with discrete roughness elements on a vertical heated wall. *Int.J. Heat Mass transfer*, 1988. №31, pp.1423–1430.
- [20] Топорков М.А., Кунтыш В.Б., Пиир А.Э. Исследование теплоотдачи спирально-ребренных труб аппаратов воздушного охлаждения в условиях свободной конвекции. Минск, 1978. – 11с. Деп. в НИИЭинфорэнергомаш 7.09.78. №29 – 9с.
- [21] Мартыненко О.Г., Соковишин Ю.А. Свободно-конвективный теплообмен: Справочник. – Минск: Наука и техника, 1982. 400 с.
- [22] Дрейцер Г.А. Теплообмен при свободной конвекции. Учебное пособие. М.: Изд-во МАИ, 2002. 100 с.
- [23] Попов И.А., Усенков Р.А. Экспериментальное исследование теплоотдачи и течения на вертикальных поверхностях с дискретной шероховатостью при свободной конвекции газа // *Труды Третьей Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т.3. Свободная конвекция. Тепломассообмен при химических превращениях. М.: Издательство МЭИ. 2002. с.132–135.*
- [24] Попов И.А. Гидродинамика и теплообмен внешних и внутренних свободноконвективных вертикальных течений с интенсификацией. *Интенсификация теплообмена: монография / Под общ. ред. Ю.Ф.Гортышова. – Казань: Центр инновационных технологий, 2007. 326 с.*
- [25] Tanda G. Natural convection heat transfer in vertical channels with and without transverse square ribs. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 1997. Vol 40. №9. pp.2173–2185.

- [26] Hung Y.H. and Shiau W.M. Local steady-state natural convection heat transfer in vertical parallel plates with a two-dimensional rectangular rib. *Int.J. Heat and Mass Transfer*. 1983. Vol.31. №6. pp.1279–1288.
- [27] Aung W., Kessler T.J. and Beitin K.I. Free convection cooling of electronic systems. *IEEE Transactions on Parts, Hybrids and Packaging*. Vol.PHP-9, №2. 1973. pp.75–86.
- [28] Петерсон Г.Р., Ортега А. Свободноконвективный теплообмен при внешнем обтекании тел. М.: Энергоатомиздат, 1992.
- [29] Said S.A. and Krain R.J. An analytical and experimental investigation of natural convection heat transfer in vertical channels with a single obstruction. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 1990. Vol.23.№6. pp.1121–1134.
- [30] Гортышов Ю.Ф., Попов И.А., Олимпиев В.В., Костылев Б.Б. Теплообмен в вертикальных открытых каналах при наличии интенсификаторов в условиях свободноконвективного течения газа // Труды IV Минского международного форума по тепломассообмену ММФ-2000. Т.1. Конвективный тепломассообмен. – Минск: Изд-во АНК ИТМО им.А.В.Лыкова НАНБ, 2000. с.452–455.
- [31] Попов И.А., Костылев Б.Б. Исследование течения и теплообмена в вертикальных каналах энергетических установок в условиях свободной конвекции. // Труды XII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И.Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках». Москва, МЭИ, 1999.
- [32] Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В., Попов И.А., Костылев Б.Б. Исследования гидродинамики и теплообмена при свободной конвекции в вертикальных цилиндрических открытых каналах энергетических установок. // Материалы 4-ой ICHMT-ASME конференции по тепломассообмену и 15 национальной конференции по тепломассообмену, Пуна, Индия, 2000.
- [33] Щукин В.К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. 240 с.
- [34] Bohn, M.S., and Anderson, R. Heat transfer enhancement in natural convection enclosure flow. *Solar Energy Research Institute report TR-252-2103*. 1984.
- [35] Shakerin, S., Bohn, M.S., and Loehrke, R.I. Natural convection in an enclosure with discrete roughness elements on a vertical heated wall. *Heat Transfer 1986. Proc. Eighth. Int. Heat Transfer Conf., Vol.3, Hemisphere, Washington, DC, 1986, pp.1311–1316*.
- [36] Ивакин В.П., Кекалов А.Н. Влияние уступов на теплоотдачу при естественной конвекции в вертикальном слое // Некоторые задачи гидродинамики и теплообмена. Новосибирск, 1976. с.23-28.
- [37] Маслова Е.О., Терехов В.В., Терехов В.И. Управление теплообменом в вертикальной прослойке с оребрением боковых стенок // XVI школа-семинар молодых ученых и специалистов под рук. акад. РАН А.И.Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках». Т.2. СПб.: СПбГТУ. 2007. С.416–419.