

УДК 536.24

О. С. Цаканян, канд. техн. наук**С. В. Кошель**, канд. техн. наук**С. О. Цаканян**

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины
г. Харьков, E-mail: koshel@ipmach.kharkov.ua)

УВЕЛИЧЕНИЕ ТЕПЛОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КОНВЕКТОРОВ С ПОМОЩЬЮ РАЗМЕЩЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ВЕРТИКАЛЬНОМ ВЫТЯЖНОМ КАНАЛЕ

Представлены результаты экспериментальных исследований конвекторов, выполненных на базе проволочных теплообменников, размещенных в вытяжном канале. Исследованы конструкции от одного до четырех рядов. Получено, что наращивание теплообменных элементов в вертикальном ряду приводит к уменьшению относительной теплопередачи, а в горизонтальном – к повышению. С увеличением шага в вертикальном ряду уменьшается влияние теплового следа, что способствует повышению относительной теплопередачи до 32%.

Наведені результати експериментальних досліджень конвекторів, виконаних на базі дротових теплообмінників, розміщених у витяжному каналі. Досліджено конструкції від одного до чотирьох рядів. Отримано, що нарощування теплообмінних елементів у вертикальному ряду призводить до зменшення відносної теплопередачі, а в горизонтальному – до підвищення. Зі збільшенням кроку у вертикальному ряду зменшується вплив теплового сліду, що сприяє підвищенню відносної теплопередачі до 32%.

Введение

Интерес, проявленный к исследованию процессов теплообмена в трубных спирально-тороидальных теплообменных элементах (ТЭ) с проволочным оребрением, вызван их высокой удельной энергоэффективностью, т.е. высокой теплоотдачей при малой материалоемкости. Эти теплообменные поверхности образованы путем пайки металлического проволочного каркаса к металлической трубе.

Высокая интенсивность теплоотдачи при поперечном обтекании проволочных спирально-тороидальных поверхностей теплообмена обусловлена малым периметром обтекания провода, величина которого в 50 раз меньше, чем у существующих теплообменных поверхностей, используемых в водяных отопительных приборах. Физика этого явления объясняется тем, что при обтекании потоком воздуха поверхностей с малым определяющим размером не успевает развиваться тепловой пограничный слой. Толщина его мала, а значит, мало и тепловое сопротивление.

Это утверждение также следует из известных критериальных зависимостей по теплоотдаче тел простейшей формы при их вынужденном или свободном поперечном обтекании потоком жидкости в неограниченном пространстве в спокойной среде [1]. В этих условиях наблюдается максимальная теплоотдача.

Каркас поверхности теплообменника представляет собой систематизированную упорядоченную спирально-тороидальную конструкцию из проволочных элементов, при обтекании которых происходят взаимовлияния между ними, что уменьшает величину как конвективной, так и лучистой составляющих коэффициента теплоотдачи по сравнению с вышеупомянутыми зависимостями. Основным преимуществом спирально-тороидальной проволочной теплообменной поверхности является то, что в относительно малом объеме удается существенно развить площадь поверхности теплообмена при достаточно высокой конструк-

тивной жесткости и прозрачности. В работе [2] описаны закономерности теплопередачи для однорядных конструкций теплообменников, состоящих из трубчатых теплообменных элементов, которые имеют проволочное оребрение. Эти закономерности учитывают влияние порядка десяти геометрических параметров теплообменного элемента на теплоотдачу. Настоящая работа является развитием предыдущей, и здесь изучаются закономерности, связанные с поиском оптимальных конструкций отопительных приборов конвективного типа.

Задача исследования заключается в поиске оптимальной (с точки зрения максимальной теплоотдачи) конструкции проволочной спирально-тороидальной теплообменной поверхности, встроенной в вытяжной канал прямоугольной формы и обладающей необходимой конструкционной жесткостью для заданных условий эксплуатации.

Влияние количества теплообменных элементов при их размещении в вытяжном канале с шагом, равным диаметру ТЭ, на интенсивность теплопередачи при естественном движении воздуха

Решение поставленной задачи становится возможным после изучения физических закономерностей теплоотдачи при изменении геометрических и режимных характеристик на уровне отдельного теплообменного элемента и их расположения относительно друг друга в вертикальном вытяжном канале. Экспериментальные исследования показали, что основной причиной, влияющей на интенсивность теплоотдачи в условиях естественной конвекции, является так называемый «тепловой след». Он образовывается при нагреве воздуха в результате теплообмена с поверхностью нагревателя, после чего поток воздуха, нагревшись, поднимается вверх по каналу из-за разности плотностей. В горизонтальной плоскости эпюра распределения температуры воздуха после контакта с теплообменником имеет неравномерный характер. Интенсивность теплоотдачи зависит от температуры воздуха, омывающего поверхность теплообмена. Чем величина ее меньше, тем выше температурный напор и интенсивность теплоотдачи. По мере подъема струи теплого воздуха размываются и перемешиваются с холодным воздухом и далее на своем пути могут соприкасаться с другими частями проволочного каркаса. Чем дальше в горизонтальном измерении будут отстоять друг от друга элементы проволочной поверхности, тем меньше влияния на теплоотдачу оказывает «тепловой след», т.е. геометрические параметры и сам рисунок поверхности теплообмена существенно влияет на интенсивность теплоотдачи.

В условиях естественной конвекции влияние «теплого следа» на теплоотдачу наблюдается на уровне конструктивного исполнения теплообменных элементов и на уровне их размещения в ограниченном объеме корпуса прибора, особенно при их вертикальной компоновке.

Для теплообменных элементов с проволочным оребрением спирально-тороидальной формы (рис. 1) увеличение коэффициента теплоотдачи будет происходить с ростом межпе-

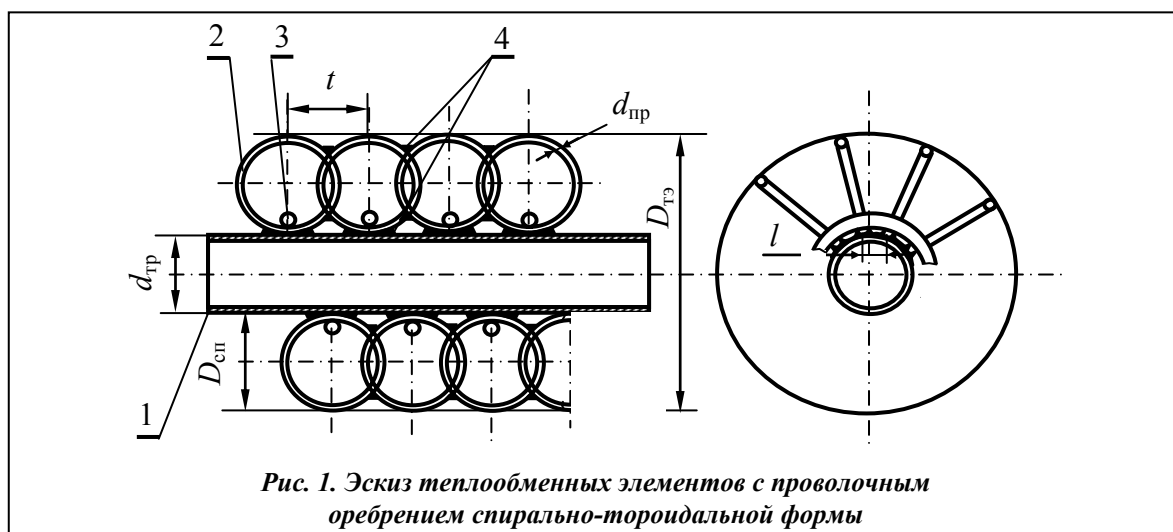


Рис. 1. Эскиз теплообменных элементов с проволочным оребрением спирально-тороидальной формы

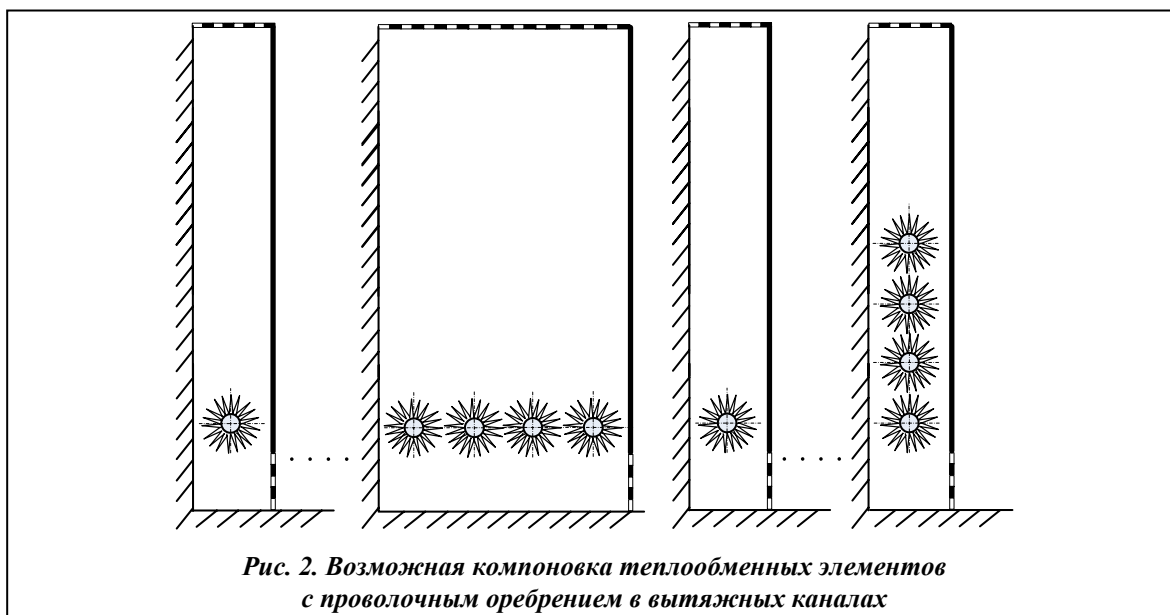


Рис. 2. Возможная компоновка теплообменных элементов с проволочным оребрением в вытяжных каналах

тельного шага l (при этом уменьшается коэффициент оребрения) и относительного диаметра теплообменного элемента $D_{тэ}/d_{тр}$. При этом также увеличивается «прозрачность» проволочной поверхности, что приводит к уменьшению аэродинамического сопротивления, увеличивая скорость движения воздушного потока, а значит, и коэффициент теплопередачи.

Исследование проводилось на трех вариантах ТЭ:

1 – $D_{тэ} = 50$ мм, $d_{тр} = 15$ мм, $d_{пр} = 0,9$ мм, $D_{сп} = 17,5$ мм, $k_{оп} = 6,75$;

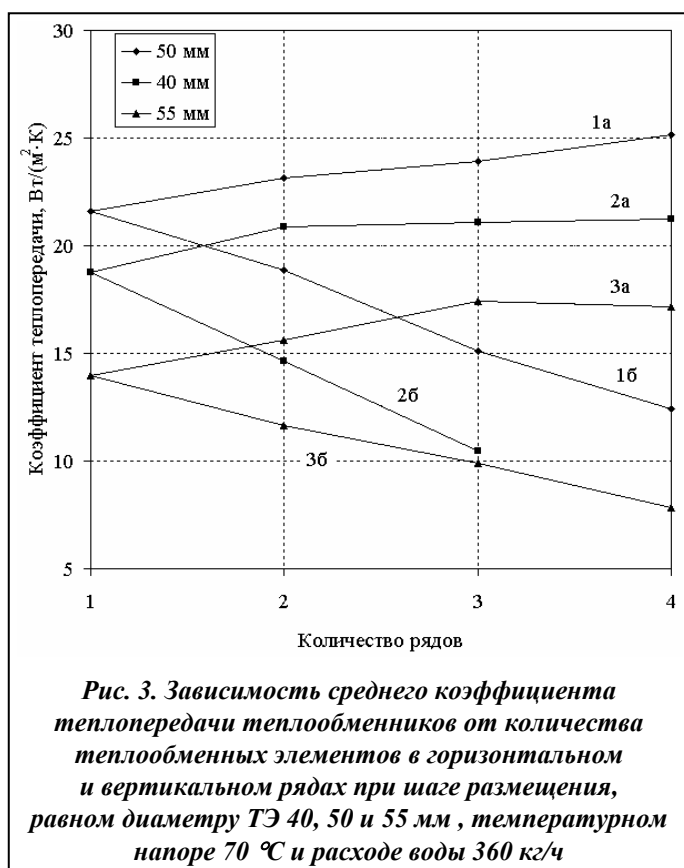
2 – $D_{тэ} = 40$ мм, $d_{тр} = 15$ мм, $d_{пр} = 0,9$ мм, $D_{сп} = 12,5$ мм, $k_{оп} = 6,75$;

3 – $D_{тэ} = 55$ мм, $d_{тр} = 15$ мм, $d_{пр} = 1,2$ мм, $D_{сп} = 19,5$ мм, $k_{оп} = 5,4$.

На рис. 2 представлены варианты компоновки ТЭ при их горизонтальном и вертикальном размещении в вытяжном канале с шагом, равным диаметру ТЭ. При этом количество трубок в горизонтальном и вертикальном рядах изменяется от 1 до 4, поэтому они образно представлены многоточием между конструкциями. Также ниже приведены результаты теплопередачи при размещении ТЭ в пространстве, ограниченном вертикальной поверхностью стены, горизонтальными поверхностями пола и подоконника при отсутствии стенок кожуха.

Для группы теплообменных элементов, размещенных в ограниченном объеме (вытяжной канал) – конвекторов, собранных в виде пучка труб, размещенного вертикально или горизонтально – наблюдаются следующие закономерности теплоотдачи (рис. 3): с увеличением количества теплообменных элементов в горизонтальном ряду с 1 до 4 теплопередача увеличивается для вариантов 1, 2 и 3 соответственно в 1,166, 1,138 и 1,23 раза, а в вертикальном – уменьшается в 2,149, 2,54 и 1,4 раза. Характер зависимостей теплопередачи похож друг на друга, а различие по абсолютной величине и диапазону изменения объясняется разными значениями геометрических характеристик ТЭ с одинаковыми поверхностями теплообмена. Для каждого варианта ТЭ имеется две зависимости, которые следует интерпретировать как верхнюю и нижнюю границы изменения теплопередачи теплообменников. Верхняя граница теплопередачи характеризует горизонтальное размещение ТЭ, имеет максимальные значения, поскольку отсутствует влияние теплового следа на ТЭ. При вертикальном размещении ТЭ на величину теплопередачи максимальное влияние оказывает тепловой след.

На рис. 3 обозначены следующие конструкции: 1а – вариант 1 ТЭ при высоте вытяжного канала 600 мм с горизонтальным расположением трубок; 2а – вариант 2 ТЭ при высоте вытяжного канала 600 мм с горизонтальным расположением трубок; 3а – вариант 3 ТЭ при высоте вытяжного канала 400 мм с горизонтальным расположением трубок; 1б – вариант 1 ТЭ при высоте вытяжного канала 600 мм с вертикальным расположением трубок; 2б –



верхнему по мере подъема воздуха, а во вторую – увеличением аэродинамического сопротивления.

Традиционно особым интересом пользуются водяные отопительные приборы настенного типа, имеющие малую глубину встраивания (толщину). У современных отопительных приборов она начинается с 60 мм. Диаметр ТЭ может изменяться от 40 до 60 мм, что дает перспективу создания приборов с меньшей глубиной встраивания. Здесь они могут оказаться вне конкуренции, если увеличить теплоотдачу прибора с помощью минимизации влияния таких факторов, как тепловой след и температурный напор. Сравнение теплопередачи проволочных теплообменников (варианты 1–3), встроенных в вытяжной канал высотой 600 мм, и теплообменника со спирально-ленточным оребрением, имеющего геометрические размеры $D_{тр} = 39$ мм, $d_{тр} = 15$ мм, толщина ленты 0,5 мм, высота ленты 11,75 мм, $k_{ор} = 12$, дало превышение теплопередачи первых: вариант 1 – $530/330 = 1,6$ раза, вариант 2 – $462/330 = 1,4$ раза, вариант 3 – $335/330 = 1,02$ раза. Увеличение поверхности ТЭ с пластинчатым алюминиевым оребрением и коэффициентом оребрения порядка 20 может обеспечить равенство теплопередачи с вариантами 1 и 2. В то же время при постоянных поверхностях оребрения и несущей трубы проволочных теплообменников увеличение диаметра ТЭ с 40 до 60 мм приводит к увеличению теплопередачи в 1,43 раза.

Влияние вертикального шага размещения теплообменных элементов в вытяжном канале на интенсивность теплопередачи при естественном движении воздуха

Здесь рассматривается задача достижения максимальной тепловой мощности теплообменника, размещенного в свободном пространстве или в вытяжном канале при заданных габаритных размерах и количестве ТЭ, т.е. при одинаковой материалоемкости. Такая постановка позволит провести сравнение результатов при неизменных материальных затратах.

Увеличение количества теплообменных элементов по вертикали повышает аэродинамическое сопротивление, что приводит к уменьшению расхода воздуха через вытяжной канал, увеличению температуры воздуха и существенному уменьшению температурного

вариант 2 ТЭ при высоте вытяжного канала 600 мм с вертикальным расположением трубок; 3б – вариант 3 ТЭ при высоте вытяжного канала 400 мм с вертикальным расположением трубок.

Тенденция увеличения теплопередачи при увеличении ширины канала при компоновке ТЭ с минимальным шагом связана с уменьшением размывания восходящих струек теплого воздуха, в результате чего ТЭ, расположенные посередине, обтекаются воздухом с большей скоростью и имеют более высокую теплопередачу, чем ТЭ, расположенные с краю, поскольку установившийся воздушный поток на выходе ТЭ тормозится сильнее из-за интенсивного перемешивания нагретого воздуха с окружающим. Тенденция уменьшения теплопередачи при вертикальном наращивании ТЭ объясняется в первую очередь влиянием теплового следа, т.е. уменьшением температурного напора от нижнего элемента к

напора от нижестоящего ТЭ к вышестоящему. С ростом вертикального шага размещения ТЭ увеличиваются конвективная и лучистая составляющие коэффициента теплоотдачи как у теплообменников, размещенных в вытяжном канале, так и без него, установленных непосредственно на стене. Увеличение шага между ТЭ в вертикальном канале приводит к выравниванию температуры воздуха в сечении канала перед теплообменной поверхностью вышестоящего ТЭ. Это обстоятельство несколько увеличивает температурный напор и теплоотдачу. Анализ результатов исследования теплоотдачи показывает, что полное выравнивание температуры воздуха наступает при шаге, равном шести диаметрам ТЭ. При дальнейшем увеличении шага теплоотдача мало изменяется. Лучистые составляющие теплового потока между ТЭ и стенками канала и между самими теплообменными элементами увеличивается, причем переизлучение между ТЭ и стенками канала преобладает.

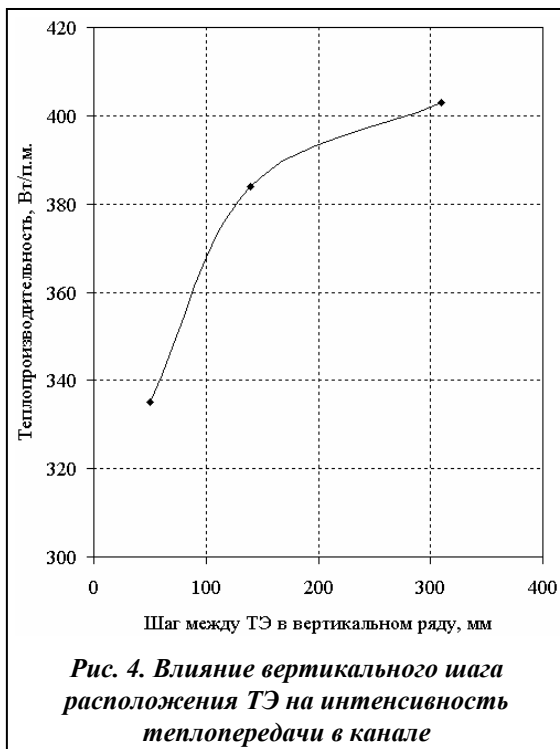


Рис. 4. Влияние вертикального шага расположения ТЭ на интенсивность теплопередачи в канале

На рис. 4 изображены результаты эксперимента для двухтрубного теплообменника, размещенного в канале из гипсокартона толщиной 12, высотой 600 и глубиной 60 мм при диаметре ТЭ 50 мм. Если принять, что аэродинамическое сопротивление конвектора остается постоянным при изменении шага между двумя ТЭ от 50 до 310 мм (поскольку объем загромождения канала ТЭ одинаков и высота неизменна), то основной причиной увеличения теплопередачи является увеличение температурного напора при незначительном росте переизлучения теплового потока на стенки канала.

Вторым способом уменьшения влияния теплового следа на теплопередачу конвектора является организация отдельных притоков свежего воздуха для одного или нескольких ТЭ. На лицевой и задней стенках канала располагают щели для выхода теплого и входа холодного воздуха. В этом случае конвектор представляет собой конструкцию, состоящую из нескольких автономных каналов, в каждом из которых находится один или несколько ТЭ. Эффект увеличения теплопередачи конвектора зависит от того, насколько будет преобладать доля теплопередачи, вызванная увеличением температурного напора по сравнению с долей теплопередачи в результате уменьшения естественной тяги из-за малой высоты автономных каналов и появлением на пути воздушного потока двух местных сопротивлений (поворотов на 90°) в каждом из них. Достижение максимальной теплопередачи возможно при выборе оптимальной величины шага по вертикали между ТЭ и количестве автономных каналов в конвекторе. На рис. 5 и 6 представлены коэффициенты теплопередачи для конвекторов, собранных из ТЭ диаметрами 50 и 40 мм соответственно (варианты конструкций 1 и

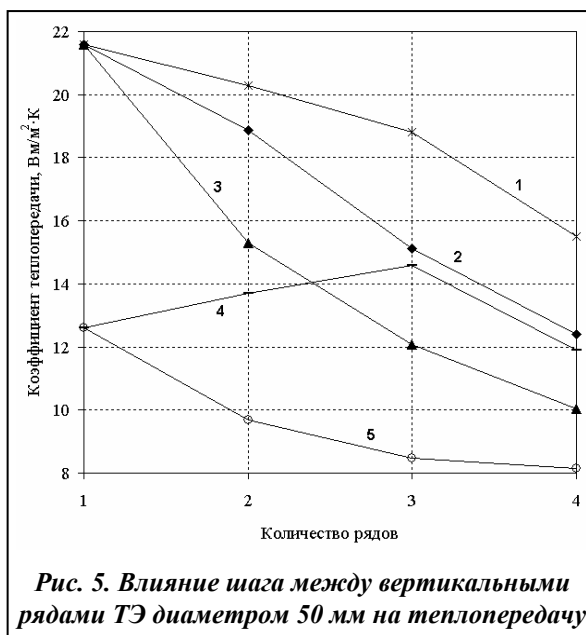
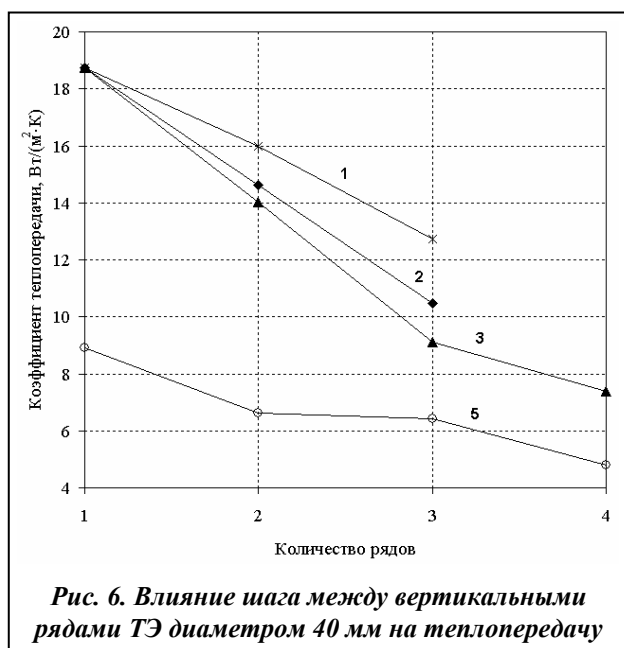


Рис. 5. Влияние шага между вертикальными рядами ТЭ диаметром 50 мм на теплопередачу



5 – коэффициент теплопередачи конвектора при шаге, равном диаметру ТЭ, при отсутствии вытяжного канала.

Теплообменные элементы с небольшим относительным диаметром (менее $40/15 = 2,66$) обладают малой прозрачностью, большим сопротивлением воздушному потоку, поэтому зависимости 2 и 3 на рис. 6 не сильно отличаются. Более подробно представлены результаты исследования ТЭ диаметром 50 мм (см. рис. 5). При одинаковой площади поверхности оребрения ТЭ имеет относительный диаметр 3,33, что делает его более прозрачным и привлекает своей высокой теплопередачей. Зависимости 1 и 2 на рис. 5 существенно превышают теплопередачу, представленную зависимостью 3 (для двух рядов ТЭ в 1,33, для трех в 1,5, а для четырех в 1,4 раза). Сравнение коэффициентов теплопередачи одинаковых конструкций теплообменников, заключенных в вытяжной канал (1, 2 и 3), и без него (4 и 5) показывает, что вызывает интерес зависимость 4. Теплопередача этой конструкции при изменении шага между элементами увеличивается при двух ТЭ, при трех имеет точку перегиба, а по абсолютной величине мало отличается для трех и четырех элементов, представленная зависимостью 2. Получается, что канал не дает преимущества по теплопередаче в этих случаях.

Относительная теплопроизводительность конвекторов, содержащих ТЭ как с пластинчатым (медная труба с алюминиевыми пластинами), так и с проволочным (медная труба с медным проводом) оребрением представлена на рис. 7. Теплопроизводительность для зависимости 1 рассчитана относительно двухтрубного ТЭ с пластинчатым оребрением (габариты пластины 100x50 мм), установленного в канал высотой 400 и глубиной 100 мм (каталог производственной фирмы «Кимрский завод теплового оборудования»). Для зависимостей 2 – 5 тепловые мощности рассчитаны относительно однотрубного ТЭ с проволочным оребрением, заключенного в канал высотой 600 и глубиной 40 (2 и 4) и 50 мм (3, 5 и 6). Зависимости 1 и 3 получены при увеличении количества ТЭ по вертикали с шагом 50 мм, 2 – с шагом 40, 4 и 5 – при выборе оптимального шага между элементами по вертикали для диаметров ТЭ 40 и 50 мм соответственно, 6 и 7 – в результате выбора шага и количества автономных каналов для ТЭ диаметром 50 и 60 мм соответственно (для ТЭ диаметром 60 мм зависимость получена экстраполяцией). Анализируя приведенные результаты, видно, что теплообменники с проволочным оребрением имеют преимущества перед пластинчатыми по относительной теплопроизводительности и абсолютной, начиная с двухрядных конструкций теплообменников. Поскольку с ростом $D_{ТЭ}$ уменьшается аэродинамическое сопротивление, то следу-

2). Зависимости 1–3 относятся к теплообменникам, заключенным в канал, а 4 и 5 – без канала.

На рис. 5 и 6 обозначены ломаные при следующих условиях, при которых они были получены:

1 – максимальный коэффициент теплопередачи конвектора, достигнутый экспериментально выбором количества каналов и шага между ТЭ;

2 – коэффициент теплопередачи конвектора, достигнутый выбором шага между ТЭ;

3 – коэффициент теплопередачи конвектора при шаге, равном диаметру ТЭ;

4 – коэффициент теплопередачи конвектора, достигнутый выбором шага между ТЭ, при отсутствии вытяжного канала;

ет ожидать увеличения теплопроизводительности при увеличении шага и количества автономных каналов.

Выводы

1. Исходя из проведенных исследований, приведем наблюдаемые физические закономерности. Однотрубный теплообменник, расположенный в свободном пространстве вдоль стены, имеет максимальные конвективные и лучистые составляющие коэффициента теплоотдачи. Нарастание ТЭ по вертикали приводит к уменьшению теплоотдачи, а по горизонтали – к повышению. Максимальная теплопередача наблюдается у конвекторов с однорядным вертикальным размещением ТЭ.

2. Ослабление влияния теплового следа путем выбора шага по вертикали между ТЭ и количества автономных каналов позволяет увеличить теплопроизводительность конвекторов на 25% для двух-, на 32% для трех- и на 25% для четырехрядных конструкций. Наличие нескольких автономных каналов в конвекторе помимо увеличения теплопроизводительности позволяет организовать ее ступенчатое многопозиционное регулирование со стороны воздушной среды, т.е. изменением расхода воздушного потока с помощью воздушных клапанов.

3. Увеличение теплопроизводительности конвекторов при одном и том же количестве ТЭ путем изменения шага и организации автономных каналов экономит материальные средства, являясь существенным моментом при организации управления теплопроизводительностью на уровне отопительного прибора. Это вызвано тем, что с целью сокращения времени разогрева помещения из холодного состояния мощность конвектора должна превосходить тепловые потери помещения как минимум в два раза.

4. С ростом диаметра ТЭ увеличивается абсолютная и относительная теплопроизводительность конвектора. Для ТЭ, диаметр которого равен 60 мм, увеличение теплопроизводительности при соблюдении равенства поверхностей по сравнению с $D_{ТЭ} = 50$ мм составит 7–10% по абсолютной величине.

Литература

1. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 343 с.
2. Цаканян О. С. Теплоотдача пучков трубок с проволочным оребрением в каналах с естественной тягой воздуха / О. С. Цаканян, С. В. Кошель, С. О. Цаканян // Пробл. машиностроения. – 2009. – Т. 12, № 2. – С. 24–31.

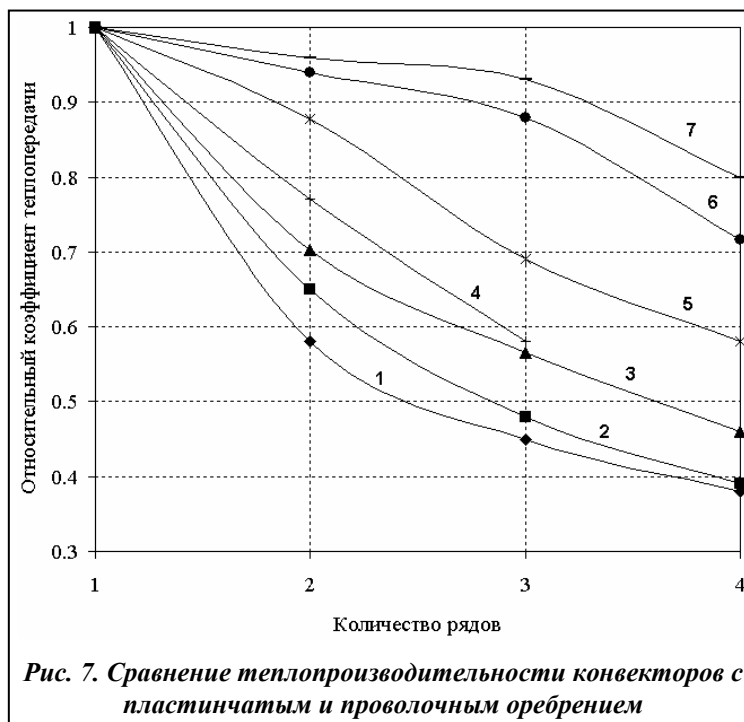


Рис. 7. Сравнение теплопроизводительности конвекторов с пластинчатым и проволочным оребрением

Поступила в редакцию
06.10.10