

тальной плоскости // Тр. БГТУ. Сер. 1. Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2019. № 2 (222). С. 272–279.

3. Сидорик Г. С. Экспериментальный стенд для исследования тепловых и аэродинамических процессов смешанно-конвективного теплообмена круглоребристых труб и пучков // Тр. БГТУ. Сер. 1. Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2018. № 1 (204). С. 85–93.

4. Сухоцкий А. Б., Сидорик Г. С. Интенсификация свободной конвекции в однорядном оребренном пучке в аппаратах воздушного охлаждения // Тр. БГТУ. Сер. 2. Хим. технол., биотехнол., геоэколог. 2017. № 1. С.68–74.

5. Nahne E., Zhu D. Natural convection heat transfer on finned tubes in air // Int. J. Mass Transfer. 1994. Vol. 37. Suppl. 1. P. 59–63.

---

УДК 621.565.93/95 (043.3)

## **ИНТЕНСИФИКАЦИЯ СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА ОДНОРЯДНОГО ПУЧКА ИЗ КРУГЛОРЕБРИСТЫХ ТРУБ С РАЗЛИЧНОЙ ВЫСОТОЙ ОРЕБРЕНИЯ**

**А. Б. Сухоцкий<sup>1</sup>, Е. С. Данильчик<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Белорусский государственный технологический университет, г. Минск*

<sup>2</sup>*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск  
katya.156.156@gmail.com*

Теплообменники воздушного охлаждения (ТВО) нашли широкое распространение в промышленности. В основном это химическая, нефтехимическая, газовая, целлюлозно-бумажная промышленность, системы воздушного отопления, компрессорные станции с трубопроводами, тепловые и атомные электростанции и т.д. Главное преимущество ТВО – это использование широко доступного теплоносителя (атмосферного воздуха).

В настоящее время ТВО в основном применяются в режиме вынужденной конвекции, который позволяет значительно увеличить коэффициент теплопередачи и тем самым снизить габариты теплообменника. Но эксплуатация таких ТВО требует значительного потребления энергии на привод вентиляторов. Одним из технических решений по энергосбережению при эксплуатации ТВО является частичное или полное отключение вентиляторов (безвентиляторный режим) – перевод работы ТВО в режим свободной конвекции.

К сожалению, область температур окружающего воздуха, при которых возможно применение воздухоохлаждаемых теплообменников в условиях свободной конвекции, ограничена. Но при оснащении их дополнительными устройствами, позволяющими интенсифицировать свободную конвекцию, теплопроизводительность теплообменника может оставаться стабильной при более высоких температурах окружающего воздуха без потребления электроэнергии приводом вентилятора. Одним из таких устройств является вытяжная шахта, установленная над воздухоохлаждаемым теплообменником для усиления тяги воздуха. При этом данный режим конвективного теплообмена будет являться смешанным, когда вынужденный и свободно-конвективный теплообмен играют равнозначную роль.

В данной работе были проведены экспериментальные исследования однорядного пучка из шести круглоребристых труб с поперечным шагом  $S_1 = 64$  мм (относительным поперечным шагом  $\sigma_1 = S_1 / d = 1,140$ ) с различной высотой оребрения труб. Геометрические разме-

ры биметаллических оребренных труб со спиральными накатными ребрами были следующие: наружный диаметр  $d = 56$  мм; диаметр трубы по основанию  $d_0 = 26,8$  мм; высота ребра  $h = 14,6$  мм; шаг ребра  $s = 2,5$  мм; средняя толщина ребра  $\Delta = 0,5$  мм; длина трубы  $l_{\text{п}} = 330$  мм (теплоотдающая длина  $l = 300$  мм), коэффициент оребрения трубы  $\varphi = 19,26$ . Материал ребристой оболочки – алюминиевый сплав АД1М, материал несущей трубы – углеродистая сталь. Диаметр несущей трубы  $d_{\text{н}} = 25$  мм, толщина стенки  $\delta = 2$  мм.

Для изменения высоты оребрения труб в однорядном пучке их ребра стачивались с помощью шлифования (соблюдался относительный поперечный шаг  $\sigma_1 = 1,140$ ) до: 1) высоты ребра  $h = 12$  мм, соответственно наружный диаметр труб составил  $d = 50,8$  мм, а коэффициент оребрения  $\varphi = 15,08$ ; 2)  $h = 8$  мм;  $d = 42,8$  мм –  $\varphi = 9,43$ ; 3)  $h = 4,1$  мм;  $d = 35$  мм –  $\varphi = 4,84$ .

Для интенсификации свободно-конвективного теплообмена над поверхностью однорядного пучка, описанного выше, устанавливались два вида шахт – с регулируемым проходным сечением и регулируемой высотой [1].

Первым типом являлась шахта с регулируемым проходным сечением, представляющая собой параллелепипед из фанеры с прямоугольным основанием, высотой 0,52 м. Для регулирования проходного сечения на ее выходе устанавливались крышки с круглыми отверстиями различного диаметра  $d_{\text{отв}} = 0,105; 0,160$  и  $0,205$  м.

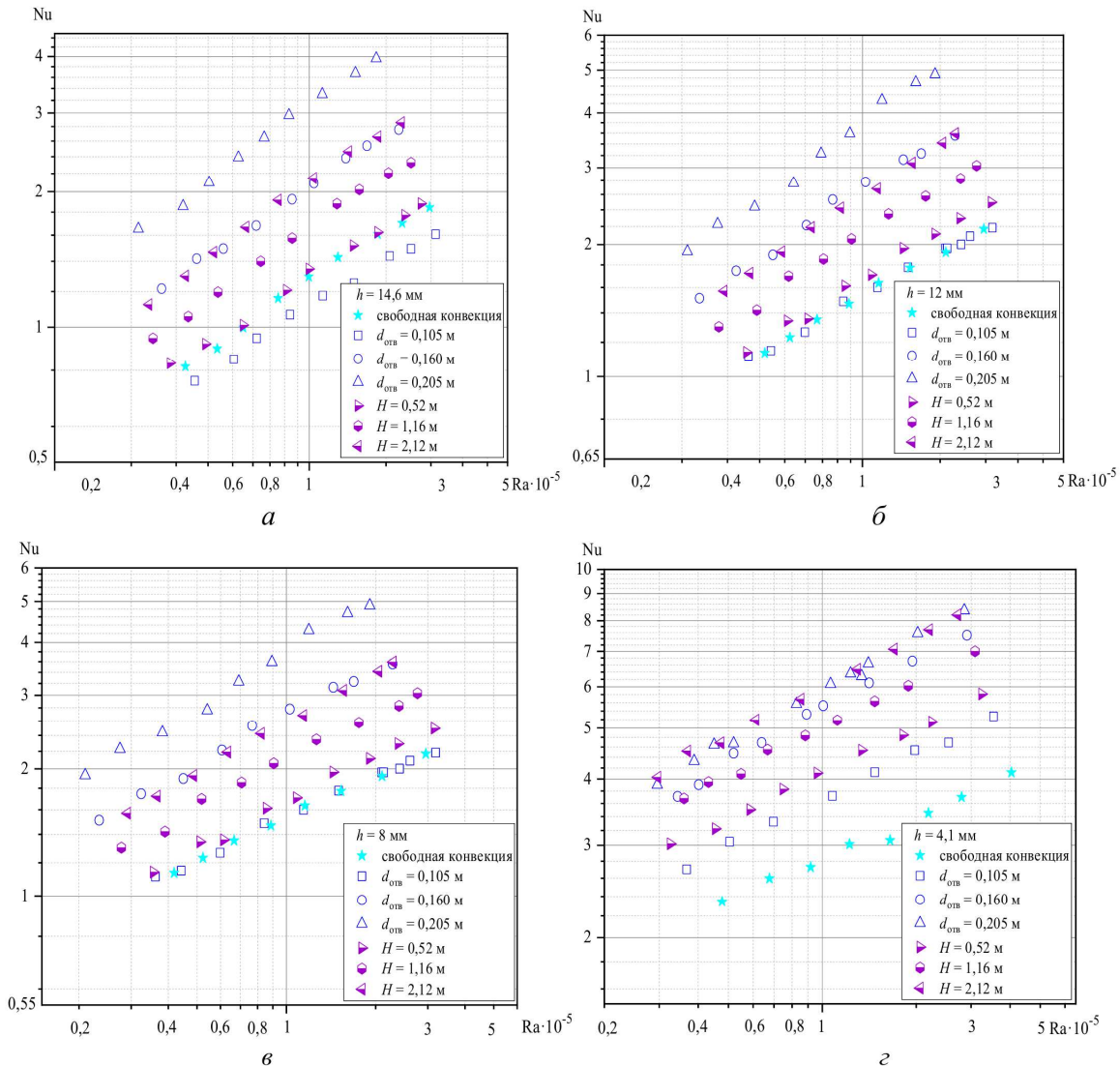
Другой тип – это шахта с прямоугольным основанием, переходящим через конфузур в цилиндрическую трубу диаметром 0,105 м, регулируемой высотой  $H = 0,52; 1,16; 2,10$  м.

Смешанно-конвективная теплоотдача изучалась методом полного теплового моделирования. Внутри труб соосно с помощью центровочного кольца вставлялся, изготовленный на ОАО «Минский завод тэнов», стальной теплоэлектронагреватель (ТЭН) диаметром  $d_{\text{ТЭН}} = 12,5$  мм, максимальной мощностью 320 Вт. Центральная труба ряда являлась калориметром, на ней устанавливались необходимые датчики для измерения средней температуры у основания ребра трубы для вычисления приведенного коэффициента теплоотдачи. Для снижения торцевых потерь на концах труб однорядного пучка применялся теплоизолирующий короб с минеральной ватой. Схема экспериментальной установки, аппаратное оснащение ее измерительными приборами, методика и порядок проведения опытов изложены в [1, 2]. Во время проведения опытов электрическая мощность, подводимая к трубе, изменялась в пределах  $W = 7–210$  Вт, средняя температура стенки у основания ребер составляла  $t_{\text{ст}} = 30–200$  °С, а температура окружающего воздуха в камере  $t_0 = 16–27$  °С.

По данным измерений рассчитывался средний приведенный коэффициент теплоотдачи конвекцией, отнесенный к полной наружной поверхности круглоребристой трубы  $\alpha_{\text{к}}$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К). При его определении учитывалась лучистая составляющая и составляющая потеря. Теплофизические свойства воздуха  $\lambda, \nu, \rho, c_p, \beta$  определяли по температуре окружающего воздуха в камере  $t_0$ . За определяющий размер был принят диаметр трубы по основанию ребер  $d_0$ . Вся расчетная методика подробно представлена в [2, 3]. Полученные данные обобщались в виде чисел подобия Рэлея и Нуссельта ( $\text{Nu} = f(\text{Ra})$ ).

Результаты экспериментальных исследований свободной и интенсифицированной (смешанной) конвективной теплоотдачи однорядного пучка (с относительным шагом  $\sigma_1 = 1,140$ ) из круглоребристых труб с различной высотой оребрения труб представлены на рисунке. Видно, что при снижении высоты оребрения круглоребристых труб (от одной высоты к другой, например  $h = 14,6$  мм по сравнению с  $h = 12$  мм и т. д.) теплоотдача однорядного пучка в режиме свободной и смешанной конвекции увеличивается в 1,1–1,6 раза. Также видно, что интенсификация свободно-конвективного теплообмена однорядного пучка протекает по-разному при различных высотах оребрения труб. Например, при  $h = 14,6$  мм вытяжная шахта с выходным диаметром отверстия  $d_{\text{отв}} = 0,105$  м ухудшает теплоотдачу однорядного пучка по сравнению со свободно-конвективным режимом в 1,1 раза (более подробно объяснено в [4]),

а при  $h = 4,1$  мм, наоборот, увеличивает теплоотдачу однорядного пучка в 1,28 раза. В остальных случаях при увеличении диаметра выходного отверстия шахты и высоты шахты при различных высотах оребрения труб наблюдается увеличение теплоотдачи однорядного пучка по сравнению со свободно-конвективным тепловым режимом.



Свободно-конвективная и смешанно-конвективная теплоотдача однорядного пучка с относительным шагом  $\sigma_1 = 1,140$  с различными высотами ребра труб: а –  $h = 14,6$  мм; б – 12; в – 8; г – 4,1

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект T19PM-076).

## Литература

1. Сидорик Г. С. Экспериментальный стенд для исследования тепловых и аэродинамических процессов смешанно-конвективного теплообмена круглоребристых труб и пучков // Тр. БГТУ. Сер. 1. Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2018. № 1 (204). С. 85–93.
2. Сухоцкий А. Б., Данильчик Е. С. Исследование свободноконвективного теплообмена оребренной трубы и однородного пучка при различных углах наклона труб к горизонтальной плоскости // Тр. БГТУ. Сер. 1. Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2019. № 2 (222). С. 272–279.

3. Сухоцкий А. Б., Сидорик Г. С. Интенсификация свободной конвекции в однорядном оребренном пучке в аппаратах воздушного охлаждения // Тр. БГТУ. Сер.2. Хим. технол., биотехнол., геоэколог. 2017. № 1. С. 68–74.

4. Сухоцкий А. Б., Сидорик Г. С. Исследование смешанноконвективной теплоотдачи однорядных воздухоохлаждаемых теплообменников при различных поперечных шагах установки труб // Изв. ВУЗов. Проблемы энергетики. 2017. № 19. С. 3–11.

УДК 532.516; 532.5; 629.9:662.92

## АПРОБАЦИЯ МОДЕЛИ ПЛОСКОГО ТЕЧЕНИЯ В ВИХРЕВОЙ КАМЕРЕ

В. Д. Тютюма<sup>1</sup>, Г. В. Дашков<sup>2</sup>, А. Д. Солодухин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт энергетики НАН Беларуси, г. Минск

<sup>2</sup>Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск

**Введение.** Движение рабочей среды в вихревой камере вихревых аппаратов характеризуется весьма сложной пространственной структурой течения и теплообмена. В то же время, для инженерных методов расчета более желаемым было бы применение упрощенных моделей, которые, несмотря на менее сложное математическое описание процессов теплообмена, позволяли бы учитывать характерные черты протекающих в вихревой камере процессов [1–4]. Как показано в работе [5], специфика течения и теплообмена в вихревой камере такова, что для ее описания требуется учет всех сопутствующих течению факторов в их полном объеме и многообразии. В этом случае упрощение задачи может быть осуществлено большей частью только за счет уменьшения ее размерности в координатном пространстве. Такому упрощению модели течения в вихревой камере способствуют три обстоятельства: преобладающая величина тангенциальной составляющей скорости по сравнению с осевой и радиальной компонентами, преимущественное влияние ее на распределение давления и незначительное изменение закрученного течения вдоль оси вращения [6]. В этих условиях в первом приближении можно пренебречь воздействием осевого потока на структуру течения и рассматривать задачу в плоскости поперечного сечения вихревой камеры. Такой переход к плоской задаче значительно упрощает интегрирование исходных уравнений и позволяет получить точное замкнутое аналитическое решение в общем случае движения вязкой, теплопроводной, сжимаемой жидкости [5].

Следует заметить, что помимо математических трудностей движению среды в вихревой камере присущи и проблемы концептуального плана. Как показано [7, 8], в высоконапряженных сдвиговых потоках при описании движения вязкой сжимаемой среды необходимо принимать во внимание изэнтропичность процесса переноса импульса.

В настоящей работе рассмотрено, как согласуются расчеты на основе модели плоского течения с экспериментальными данными распределения гидродинамических и термодинамических параметров в вихревой камере. Для сравнения анализ проводится на основе теории Навье–Стокса и для модели плоского осесимметричного течения вязкого сжимаемого газа с учетом изэнтропичности переноса импульса.

**Профиль тангенциальной составляющей скорости.** В результате решения уравнений плоского осесимметричного движения вязкой сжимаемой жидкости для распределения тангенциальной скорости в поперечном сечении вихревой камеры обе модели дают одно и то же соотношение [5]