

Маршалова Г.С.^{1,2}, Баранова Т.А.¹, Жукова Ю.В.¹, Чорный А.Д.¹, Сухоцкий А.Б.²,

Данильчик Е.С.^{1,2}, Миронов А.А.³, Кадыров Р.А.³, Попов И.А.³

¹ Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси,
220072, Минск, ул. П.Бровки, 15

² УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск
220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а

³ ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева – КАИ», 420111, Казань, ул. К.Маркса, 10

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ С ВЫТЯЖНОЙ ШАХТОЙ

1. ВВЕДЕНИЕ

Аппараты воздушного охлаждения (АВО) являются составной частью оборудования тепло-технологических процессов в нефтеперерабатывающей, химической, нефтехимической, газовой и пищевой промышленности, а также применяются на автомобильных газонаполнительных компрессорных станциях [1], в тепло- и электроэнергетике [3, 4], в холодильной технике, в деревообрабатывающей промышленности [5], на атомных станциях [6]. По данным работы [7] в странах Евразийского экономического союза в настоящее время работает около 52 000 АВО с установленной мощностью 1,93·10⁶ кВт.

Для оптимизации работы АВО используются различные подходы и методы – как активные (например, установка вентиляторов, ионизация воздуха на входе в камеру АВО), так и пассивные (например, развитие площади теплопередающей поверхности, изменения режима течения в камере АВО за счет профилирования геометрической формы камеры за пучком теплопередающих труб и др.). При профилировании геометрической формы камеры за теплообменным пучком, например, при установке вытяжной шахты, изменяется характер течения воздуха, то есть функционально работа вытяжной шахты в качестве побудителя движения воздуха через теплообменные секции качественно подобна всасывающему действию вентилятора. Принципиальное отличие между способами ускорения потока в камере с теплообменными трубами состоит в том, что установка шахты не требует подвода энергии извне в явном виде и, таким образом, осуществляется интенсификация теплообмена в пучках секций пассивным способом, конечным результатом которого является соответствующая величина энергосбережения. Также применение вытяжной шахты позволяет исключить рециркуляцию воздуха в теплообменнике и повышает срок службы вентиляторов с приводами.

При эксплуатации АВО с вытяжной шахтой необходимо строго соблюдать температурные режимы и точно их регулировать [8]. Для этого необходима достоверная информация о характере теплоотдачи пучков оребренных труб в режимах есте-

ственной и смешанной конвекции воздуха. Однако в настоящее время отсутствуют методики теплового расчета АВО в этих режимах, а известные исследования смешанной конвекции воздуха [9–15] не охватывают распространенные компоновочные параметры пучков, не учитывают влияние аэродинамических характеристик и геометрических параметров вытяжной шахты, не предлагают рекомендаций на проектирование АВО.

При этом проведение экспериментальных исследований по изучению свободной и смешанной конвекции требует значительных расходов на реализацию, высокой мощности оборудования, а также больших временных затрат. Проведение экспериментальной визуализации структуры течения в камере АВО затруднено, поскольку накладываются значительные требования как на соблюдение фиксированного температурного режима, так и на оборудование для визуализации. Поэтому экспериментально охватить весь желаемый диапазон вариантов компоновок пучков, режимов конвективного теплообмена и методов интенсификации теплообмена, а также провести визуализацию структуры течения в камере не представляется возможным. Решением этой проблемы может выступить применение методов вычислительной газодинамики (CFD – computational fluid dynamics), которые позволяют расширить границы экспериментальных исследований.

Целью данной работы является численное исследование конвективного теплообмена четырехрядных шахматных равносторонних пучков аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой, а также оценка влияния вытяжной шахты на теплоотдачу пучков оребренных труб в режимах естественной и смешанной конвекции воздуха.

2. РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Сопоставление численных исследований с экспериментальными проводились для модели АВО, состоящей из четырех рядов ($z = 4$) шахматно расположенных оребренных труб с диаметром несущей трубы $d_0 = 0,0264$ м. Поперечный шаг пучка составлял $S_1 = 0,058$ м (безразмерный шаг $S_1/d_0 = 2,2$). Трубы в пучке имели следующие геометрические параметры: наружный диаметр трубы

с оребрением $d/d_0 = 2,152$; высота ребра $h/d_0 = 0,576$; межреберный шаг $s/d_0 = 0,092$; толщина ребра $\Delta/d_0 = 0,0208$; длина трубы $l/d_0 = 11,36$; коэффициент оребрения $\phi = 21$. Высота вытяжной шахты варьировалась в пределах $H = 0,52-2,12$ м, диаметр выходного отверстия вытяжной шахты оставался постоянным, $d_{\text{отв.}} = 0,105$ м. Подробное описание методики экспериментальных исследований изложено в [15–16].

Верификация расчетного алгоритма проводилась для АВО с вытяжной шахтой со следующими геометрическими размерами $d_{\text{отв.}} = 0,105$ м, $H = 1,16$ м. Затем по верифицированной методике проводились расчеты конвективного теплообмена шахматного пучка оребренных труб для различных высот вытяжной шахты.

Поставленная задача решалась в трехмерной постановке. Размеры расчетной области составляли $4 \times 3,8 \times 0,00972$ м. Неструктурированная расчетная сетка (рис.1) генерировалась с использованием пакета Ansys Meshing. При построении сетки учитывался тот факт, что вблизи стенок на размер генерируемой ячейки накладывается условие $y^+ \in [1;5]$. Для описания расчетной области потребовалось порядка 30 млн тетрагексагональных ячеек.



Рис.1. Фрагменты расчетной сетки на поверхности трубы и в расчетной области

Для достижения поставленной цели решались стационарные уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу (уравнения Рейнольдса), уравнение неразрывности и уравнение энергии в формулировке для энтальпии. Как показали верификационные расчеты, число Рейнольдса, построенное по диаметру несущей трубы и скорости на входе в расчетную область, соответствует ламинарному режиму течения. Однако, согласно рекомендациям [17], для задач естественной и смешанной конвекции необходимо решать уравнения Рейнольдса. Замыкание уравнений Рейнольдса осуществлялось с помощью $k-\omega$ -модели переноса сдвиговых напряжений Ментера в стандартной формулировке.

В качестве граничных условий на внутренней поверхности несущей трубы задавалось значение теплового потока из условия согласования с экспериментом; на выходе из расчетной области – мягкие граничные условия, то есть равенство нулю градиентов рассчитываемых величин. Стенки шахты предполагались теплоизолированными. В начале расчёта во всей расчётной области задавалось статическое давление, равное атмосферному,

$P = 101325$ Па, и температура воздуха, равная температуре окружающей среды, измеренной экспериментально, $T_{\text{вх}} = t_0$. Численное моделирование теплопередачи от оребренных труб к воздуху осуществлялось в сопряженной постановке.

Сопоставление численных и экспериментальных данных проводилось по следующим величинам – средняя температура ребра нагреваемой оребренной трубы в каждом ряду пучка T_i ; температура воздуха на выходе из вытяжной шахты $T_{\text{вых}}$. Сравнение результатов эксперимента и численного моделирования представлено в виде зависимости температуры на ребре T_i (рис.1,а) и в выходном сечении вытяжной шахты (рис.1,б) от плотности теплового потока для $d_{\text{отв.}} = 0,105$ м, $H = 1,16$ м.

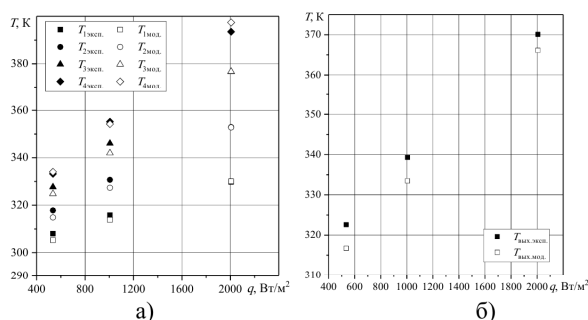


Рис. 2. Сравнение результатов эксперимента и численного моделирования: температура на ребре (а), температуры в выходном сечении вытяжной шахты

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полученные результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными (расхождение результатов не превышает 5 %). В дальнейшем разработанная методика будет использована для расширения границ параметров эксперимента и визуализации структуры течения в многорядных пучках труб с различными компонентами.

Численное исследование распределения температуры по поверхности ребер и в вытяжной шахте, а также структуры течения за пучком оребренных труб в режиме смешанной конвекции проведено для четырехрядного шахматного пучка с вытяжной шахтой со следующими геометрическими параметрами: $H = 0,52; 1,48; 2,12$ м. Диаметр выходного отверстия был зафиксирован, $d_{\text{отв.}} = 0,105$ м. Для каждой высоты вытяжной шахты численное моделирование проводилось для нескольких значений теплового потока на оребренной трубе, эквивалентных экспериментальным.

Распределение температур на пучках и в шахтах показано на рис.2-4. Для каждой используемой вытяжной шахты оно имеет идентичный характер.

Как видно из рис.2-4, первый ряд пучка охлаждается наилучшим образом, так как температура поступающего воздуха имеет наименьшее значение. По мере продвижения воздуха через пучок его температура повышается, за счет нагрева от оребренных труб, и температура четвертого ряда является самой высокой.

Однако характер распределения температур в вытяжной шахте зависит от высоты вытяжной шахты. Для $H=0,52$ м наблюдается неравномерность распределения температур непосредственно над пучком. С увеличением высоты вытяжной шахты данная зона неравномерности смещается вверх по шахте, и для высоты $H=2,12$ м температура воздуха на выходе из орбренного пучка равна температуре на выходе из вытяжной шахты. Для объяснения данного явления необходимо также исследовать распределения скоростей в пучке и вытяжной шахте (рис.2-4).

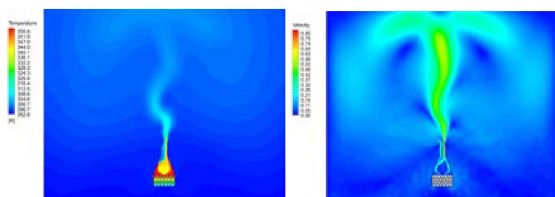


Рис. 2. Распределение температур и скоростей в пучке и в вытяжной шахте $H = 0,52$ м, $q = 534$ Вт /м²

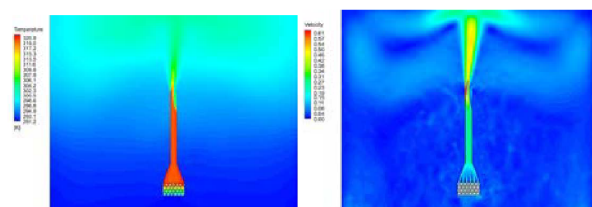


Рис. 3. Распределение температур и скоростей на пучке и в вытяжной шахте $H = 1,48$ м, $q = 422$ Вт /м²

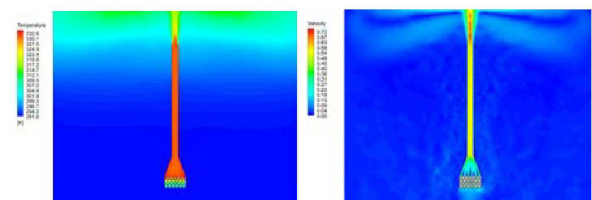


Рис. 4. Распределение температур и скоростей на пучке и в вытяжной шахте $H = 2,12$ м, $q = 1093$ Вт /м²

Для данных по изменению температуры значения численного моделирования и экспериментальных исследований отличаются на 1 % – 4 %, что говорит о достоверности применения модели.

Однако при определении скорости воздуха в сжатом сечении пучка погрешность составила для шахты $H = 0,52$ м – 20 % – 40 %, $H = 1,16$ м – 4 % – 6 %, $H = 1,48$ м – 4 % – 12 %, $H = 2,12$ м – 20 % – 23 %.

Как видно из рис.2-4, первый ряд пучка охлаждается наилучшим образом, так как температура поступающего воздуха имеет наименьшее значение. По мере продвижения воздуха через пучок его температура повышается, за счет нагрева от орбренных труб, и температура четвертого ряда является самой высокой.

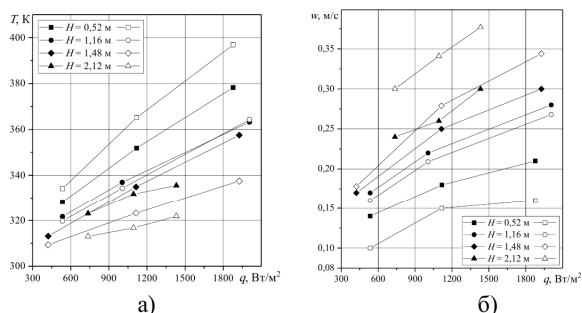


Рис. 5. Зависимость средней температуры на ребре (а) и скорости в сжатом сечении пучка (б) от подаваемой тепловой мощности

На рис.5 показаны графики изменения средней температуры на ребре и скорости в сжатом сечении пучка от подаваемой тепловой мощности (на рис.5 закрашенные символы) и их сопоставление с экспериментальными данными (на рисунке не закрашенные символы).

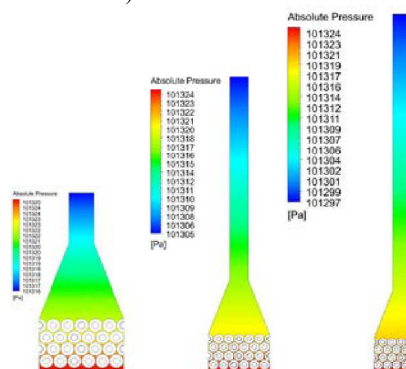


Рис. 6. Распределение давлений в орбренном пучке и вытяжной шахте а) $H = 0,52$ м, б) $H = 1,48$ м, в) $H = 2,12$ м

Перепад давлений в вытяжной шахте повышается с увеличением высоты вытяжной шахты (рис.6). Стоит отметить, что с ростом высоты шахты поток в вытяжной шахте стабилизируется.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено численное исследование теплоотдачи и аэродинамического сопротивления четырехрядных шахматных равносторонних пучков аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой. Полученные результаты позволили визуализировать течение воздуха в пучке и вытяжной шахте, установить неравномерность скоростей и температур. Численное моделирование позволило установить перепады давления на пучке, что ввиду их небольших значений сложно определить экспериментально.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проекты T21PM-019, Ф21MC-011, и гранта РФФИ 20-58-04002

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бессонный А. Н., Кунтыш В. Б.** Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения. СПб.: Недра, 1996. – 512 с.
2. **Королев И. И., Генова Е. В., Бенклян С. Е.** О комбинированных системах охлаждения ТЭЦ // Теплоэнергетика. 1996. № 11. С. 49–55.
3. **Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И.** Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. СПб.: Судостроение, 2005. – 392 с.
4. **Kong Y., Wang W., Zuo Zh., Yang L., Du X., Yang Y.** Combined air-cooled condenser layout with in line configured finned tube bundles to improve cooling performance // Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 154. P. 505-518.
5. **Кунтыш В. Б., Позднякова А. В., Мелехов В. И.** Теплоотдача естественной конвекцией одиночного ряда вертикальных оребренных труб calorиферов лесосушильных камер // Изв. ВУЗов. Лесной журнал. 2002. № 2. С.116–121.
6. **Зорин В. М.** Атомные электростанции: уч. пособие. М.: Изд. дом МЭИ, 2012. – 672 с.
7. **Кунтыш В. Б., Сухоцкий А. Б., Самородов А. В.** Инженерный метод теплового расчета аппарата воздушного охлаждения в режиме свободноконвективного теплообмена // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2013. № 12. С. 3–6.
8. **Самородов А. В.** Совершенствование методики теплового расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения с шахматными оребренными пучками: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / А. В. Самородов. - Архангельск, 1999. – 176 с.
9. **Мартыненко О. Г., Соковишин Ю. А.** Теплообмен смешанной конвекцией. Мн.: «Наука и техника», 1975. – 256 с.
10. **Мильман О. О., Алешин Б.А.** Экспериментальное исследование теплообмена при естественной циркуляции воздуха в модели воздушного конденсатора с вытяжной шахтой // Теплоэнергетика. 2005. № 5. С. 16–19.
11. **Васильев Ю. Н. Марголин Г. А.** Системы охлаждения компрессорных и нефтеперекачивающих станций. М.: «Недра», 1977. – 222 с.
12. **Габдрахманов А. А.** Повышение эффективности эксплуатации аппаратов воздушного охлаждения на магистральных газопроводах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.09.19 / А. А. Габдрахманов; Уфим. гос. нефт. техн. ун. – Уфа, 2007. – 24 с.
13. **Маршалова Г. С.** Тепловой расчет и проектирование аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / Г. С. Маршалова. – Минск, 2019. – 153 л.
14. **Маршалова, Г. С. Сухоцкий А. Б., Кунтыш В. Б.** Повышение энергосбережения в аппаратах воздушного охлаждения интенсификацией внешнего теплообмена // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2020. № 2. С. 3–7.
15. **Сухоцкий А. Б., Маршалова Г. С.** Особенности гравитационного течения нагретого воздуха в вытяжной шахте над многорядным оребренным пучком // Инженерно-физический журнал. 2019. Т. 92, № 3. С. 619–625.
16. **Сухоцкий А. Б., Маршалова Г. С.** Особенности гравитационного течения нагретого воздуха в вытяжной шахте над оребренным пучком // Тепловые процессы в технике. 2018. Т. 10, № 1. С.62–70.
17. **Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И.** Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. СПб.: Судостроение, 2005. – 392 с.