

УДК 67.05

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ КОМПОНОВОК ТРУБНЫХ ПУЧКОВ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Абдеев Э.Р., Мицкевич П.В.,
ООО «Грибановский машиностроительный завод», п.г.т. Грибановский,

Швецов М.В.,
Бугульминский механический завод ОАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина

Абдеев Р.Г.,
ФГБОУ ВПО Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Уфа,

Кузнецов В.А.,
ФБГОУ ВПО «Бакирский государственный университет», г. Уфа
e-mail: hmt@inbox.ru

***Аннотация.** В статье приведены результаты научных исследований и технические решения, позволяющие оценить энергоэффективность аппаратов воздушного охлаждения (АВО) с различными компоновками трубных пучков теплообменных секций. Выполнен обзор эффективности существующих компоновок трубных пучков и обоснована актуальность выполнения исследований в данном направлении. В статье описан комплекс лабораторного и стендового технологического оборудования, позволяющего производить экспериментальную оценку энергоэффективности АВО с подетальной композицией теплообменных элементов трубных пучков различного конструктивного исполнения и компоновки. Приведена методика обработки экспериментальных данных по оценке тепловой эффективности трубных пучков АВО различного конструктивного исполнения.*

***Ключевые слова:** аппарат воздушного охлаждения, энергоэффективность, трубный пучок, диффузор, теплообменная секция, теплоотдача, стенд.*

Исследования последних лет показывают, что резервы повышения тепловой эффективности находятся в осуществлении интенсификации теплоотдачи использованием оребренных труб с развитой поверхностью теплообмена и рациональной компоновкой их в пучках, не увеличивая при этом

удельной металлоемкости и габаритных размеров теплообменных секций АВО [1-5].

В последние годы такие предприятия химического и нефтяного аппаратостроения, как Бугульминский механический завод ОАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина и ООО «Грибановский машиностроительный завод» активно включились в процесс переоснащения нефтегазовых и нефтеперерабатывающих производств современными аппаратами воздушного охлаждения повышенной тепловой эффективности.

Ввиду сложности технологических процессов в нефтеперерабатывающей и других отраслях промышленности, и наличия множества факторов, оказывающих влияние на тепловые процессы, протекающие в них, не представляется возможным произвести эффективную оценку тепловой эффективности вновь создаваемой теплообменной аппаратуры [2-5].

Определение величины теплоотдачи со стороны воздуха, необходимого при расчете и конструировании теплообменных аппаратов воздушного охлаждения, рациональней всего вести в экспериментальных конструкциях, максимально приближенных по своим геометрическим размерам, и условиям работы к промышленным аппаратам. В то же время должны быть обеспечены условия, дающие возможность наиболее полно провести исследование во всем диапазоне величин, параметров представляющих практический интерес [2,5,7].

С использованием испытательных стендов созданных ООО НПП «Химмаштехнология», в течение ряда лет, успешно проводится комплекс экспериментальных исследований по оценке энергоэффективности тепловых элементов, компоновок трубных пучков и опытных моделей новой теплообменной аппаратуры различного типа и назначения, конструктивного и материального исполнений [9]. Так при освоении АВОМ отечественного производства, взамен Венгерского, возникла необходимость проведения опытно-экспериментальных исследований, результаты которых показали высокую эффективность использования данного испытательного оборудования. Актуальность необходимости проведения экспериментальных исследований обосновывается так же необходимостью организации производства современного теплообменного оборудования с эффективной поверхностью теплообмена с минимальными установочными площадями теплообменных секций АВО установок добычи нефти на морских шельфах.

Наиболее надежным методом исследования теплопередачи оребренных труб является метод полной теплоотдачи, сохраняющий закон распределения температур на границе потока, соответствующего практическим условиям работы трубных пучков [3, 9].

Как показывают исследования, интенсивность процессов переноса при течении и теплообмене в поперечноохлаждаемых пучках зависит от многих факторов как режимных, так и геометрических. По этой причине разработку и исследование новых компоновок обычно осуществляют, используя множество

подходов. Большинство из этих подходов направлено на улучшение характеристик уже известных компоновок [2-7].

При использовании поперечноомываемых трубных пучков в качестве поверхностей теплообмена, к их теплогидродинамическим характеристикам предъявляются определенные требования. Эти требования относятся ко всем теплообменным поверхностям и кратко могут быть сформулированы так: компоновка трубного пучка должна быть энергетически эффективной. В связи с этим, существующие методики разработок (поиск) новых компоновок трубных пучков можно охарактеризовать двумя направлениями - «формальным» и «энергетическим».

К формальному направлению относится любой метод поиска, не связанный и не ставящий целью разработку физической модели течения и теплообмена в межтрубных каналах, содержащий только формальные оценки энергетической эффективности в разрабатываемой компоновке.

Для анализа энергетической эффективности исследованных пучков труб воспользуемся принципом «при прочих равных» на основе измеренных тепло-аэродинамических характеристиках. Энергетическая эффективность в этом случае оценивается по значению коэффициентов эффективности K_Q и K_N [8].

Суть метода состоит в определении значения одного из коэффициентов эффективности при одинаковых остальных, т.е. решаются задачи:

1. Определение $K_Q = ?$, при $K_N = 1$ и $K_F = 1$;
2. Определение $K_N = ?$, при $K_Q = 1$ и $K_F = 1$.

Расчет значений K_Q и K_N по соответствующим зависимостям проведем на основе полученных обобщенных соотношений для Nu_d и Eu для шахматного пучка, «шахматно-диффузорного» и «шахматно-конфузорного» компоновок оребренных труб.

На рис.1 представлены результаты расчетов K_Q и K_N для исследованных пучков «Ш-Д» и рисунок 1 - «Ш-К» компоновок.

На приведенных рисунках для K_Q и K_N можно увидеть области, которые характеризуют проигрыш в энергетической эффективности исследованных «Ш-Д» и «Ш-К» компоновках, по сравнению с исходной шахматной компоновкой.

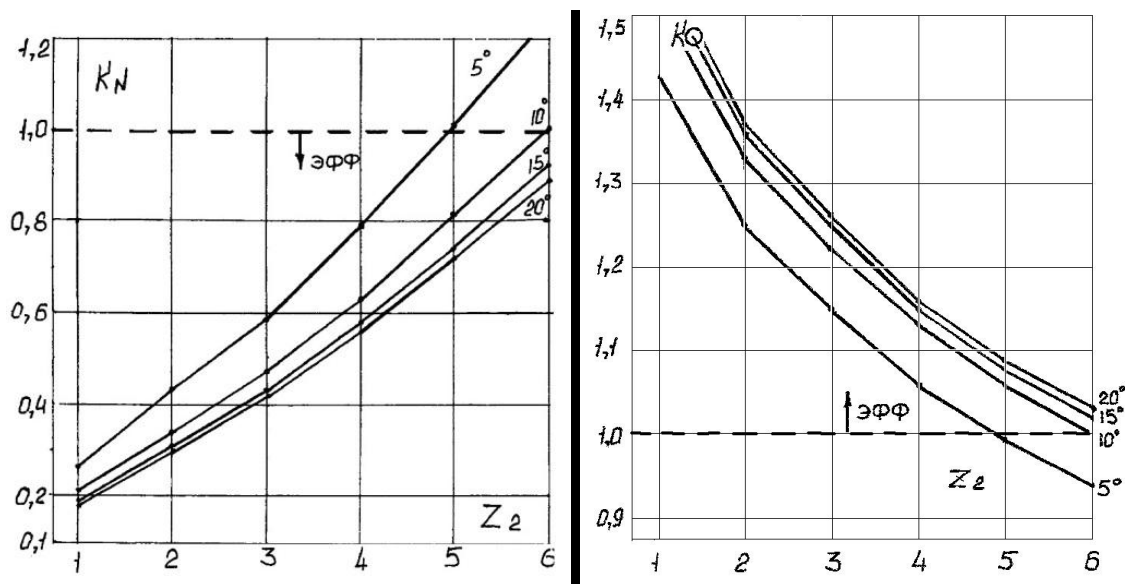


Рис. 1. Энергетическая эффективность шахматно-диффузорной компоновки (Ш-Д)

На рисунках представлены соответствующие графики, по которым можно увидеть повышение энергетической эффективности, как «Ш-Д», так и «Ш-К» компоновок при уменьшении числа рядов труб в пучках. При этом «Ш-К» компоновка пучка труб не приводит к повышению энергетической эффективности исходного шахматного пучка труб, как по K_Q так и K_N .

Напротив, «Ш-Д» компоновка, отличаясь повышенной эффективностью во всем диапазоне числа рядов труб в пучке Z_2 и углах диффузорности β° , приводит к наибольшему выигрышу при $\beta^\circ \approx 10^\circ - 15^\circ$.

Крупномасштабная диффузорность приводит к усилению турбулентности во всех структурах потока, обтекающего трубы.

Во многих отраслях промышленности и на транспорте широко применяются различные теплообменные аппараты. С ростом энергетических мощностей все более увеличиваются габариты применяемых теплообменников, поэтому создание компактных теплообменных аппаратов может обеспечить значительную экономию материальных и трудовых затрат.

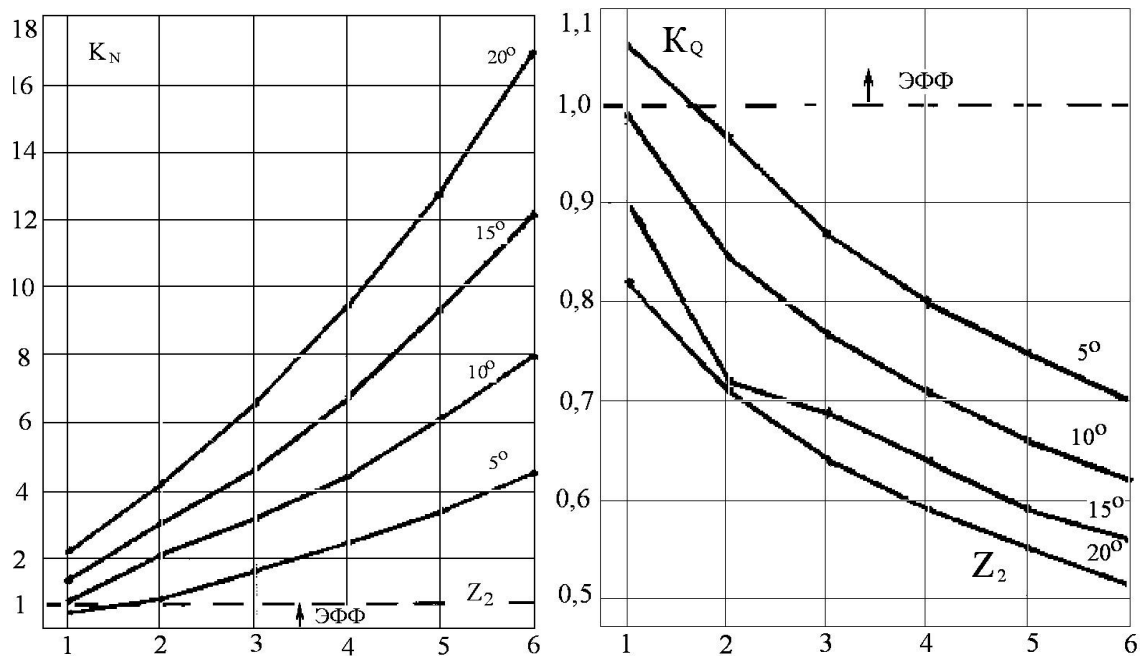


Рис. 2. Энергетическая эффективность (по Q и N) шахматно-конфузорных компонок (Ш-К)

Разработанная компоновка теплообменных поверхностей (рис. 2) может быть использована в качестве замены традиционных поверхностных конденсаторов паровых турбин с использованием воды в качестве охлаждающей среды на воздушные конденсационные установки (ВКУ), в сухих градирнях и других воздухоохладителях, а также в любых других газожидкостных теплообменниках нефтеперерабатывающих производств.

Повышение компактности теплообменных поверхностей неразрывно связано с повышением их энергетической эффективности, то есть с эффективным использованием топливно-энергетических ресурсов. Решение этих задач возможно посредством интенсификации процесса теплообмена и уменьшения гидравлического сопротивления теплообменной поверхности.

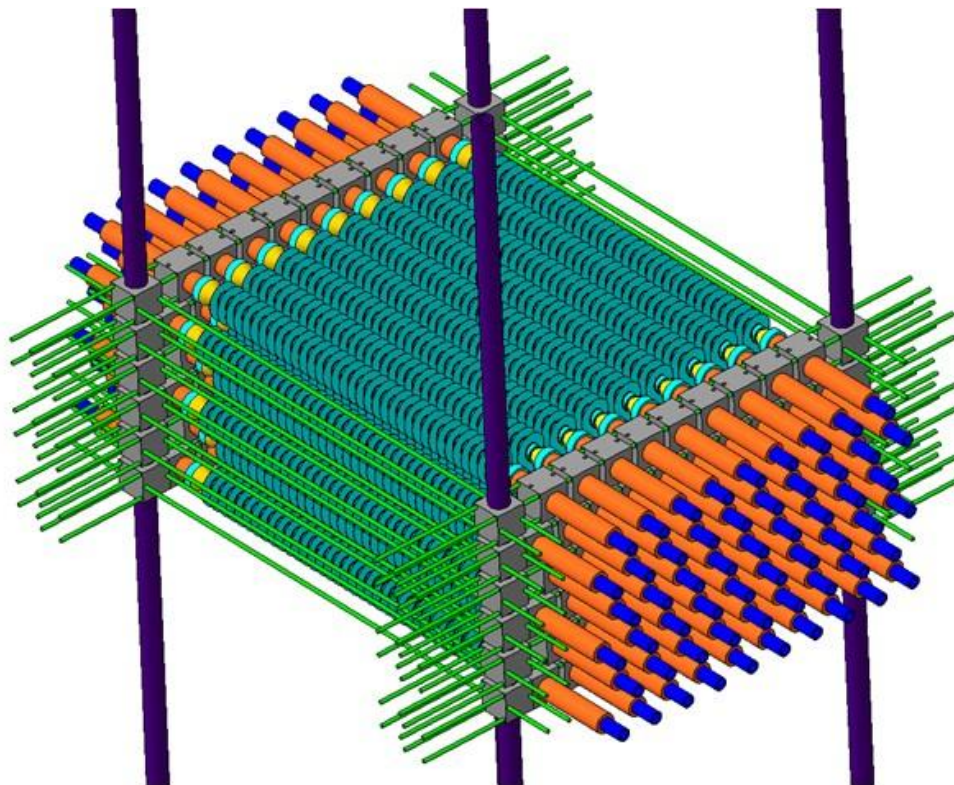


Рис. 3. Твёрдотельная модель для испытания различных компоновок труб теплообменной секции АВО

Как известно, энергетическая эффективность теплообменной поверхности определяется тепловыми и гидродинамическими характеристиками ее элементов, а также организацией внешнего течения. Для трубного пучка, основным элементом которого является труба, существенное значение имеет взаимное расположение труб — компоновка трубного пучка и расстояние между трубами, которые могут существенно влиять на организацию течения в межтрубных каналах и на элементах трубного пучка.

Перечисленные особенности течения и теплообмена в межтрубных каналах коридорного и шахматного пучка дают основание для поиска более эффективного способа организации течения в них.

Экспериментальная модель АВО (рис. 3), предназначенная для испытания различных компоновок труб в пучке, состоит из подвижных универсальных элементов, выполненных в виде куба, диффузора и конфузора, стоек, герметизирующей шторы, трубных досок, подводок, оребренных труб, патрубков, трубные втулки, вентилятора и термодатчиков, анемометра и так далее.

Соединения оребренных труб осуществляется патрубками различным способом на прокладку, резьбу, сварку или склеиванием, с возможностью свободного перемещения.

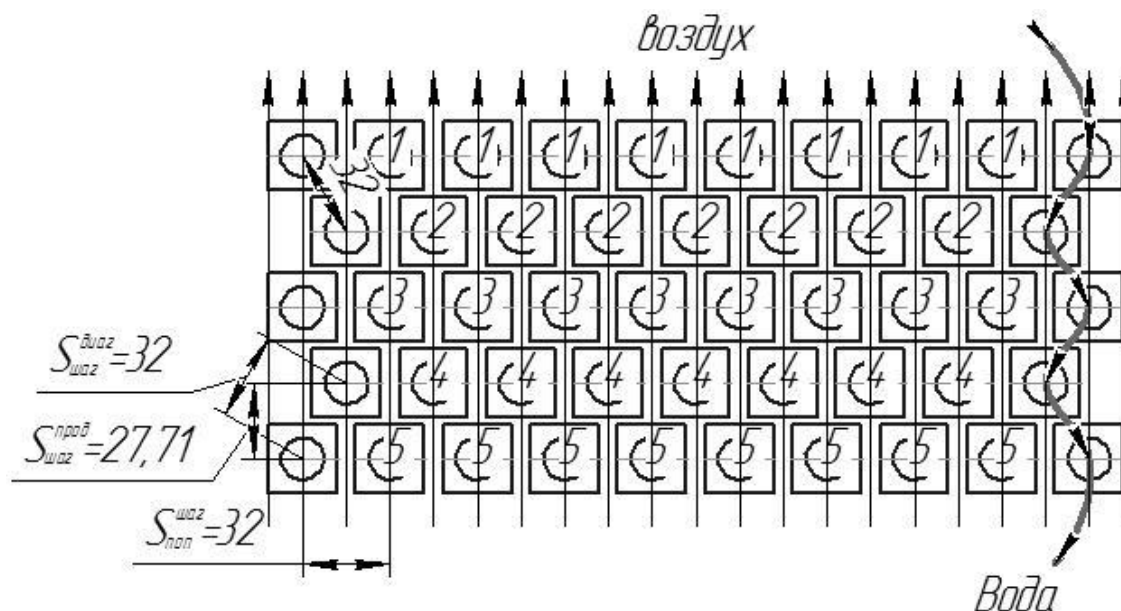


Рис. 4. Схема движения воздуха и воды по горизонтальной шахматной компоновке.

Стойки удерживают конструкцию АВО в подвешенном состоянии относительно фундамента, на котором установлен вентилятор, создающий воздушный поток в теплообменную секцию АВО. Подводка соединяется резьбой с патрубками и коллекторами, которые формируют водные ходы по трубному пучку. Вход и выход в межтрубное пространство формируют диффузоры и конфузоры соответственно. Для замера температуры воздуха на входе, на диффузоре располагаются термодатчики и термоанемометр для измерения скорости воздуха. Конфузор по конструкции аналогичен диффузору, только без анемометра.

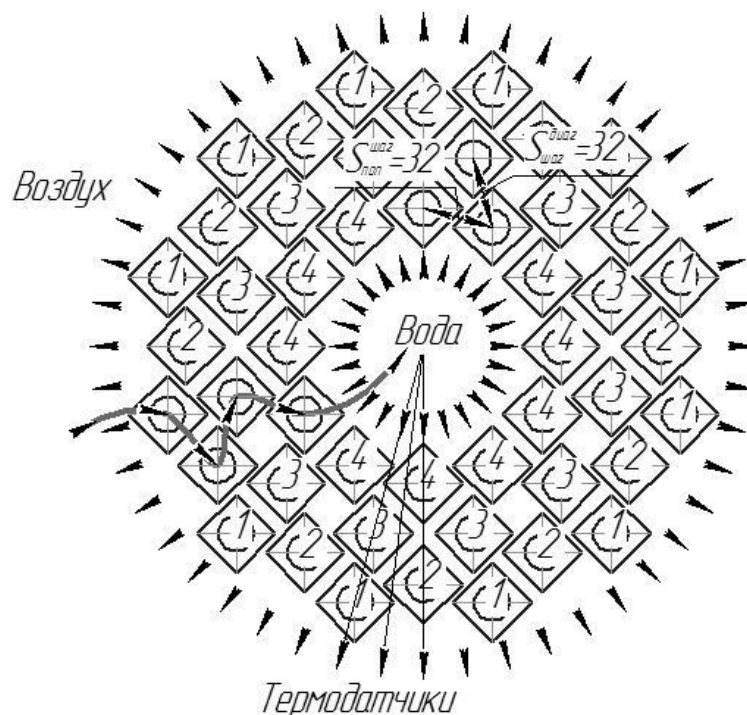


Рис. 5. Схема движения воздуха и воды по радиально-диффузорной компоновке.

В исследуемых компоновках применяется оребренная труба с несущей трубой из нержавеющей стали и оребрения из алюминиевого сплава АД2. Схема движения теплоносителей с компоновочными размерами указана на рис. 4 – для горизонтальной шахматной компоновки и на рис. 5 – для радиально-диффузорной компоновки. Стрелками указано движение воздуха в межтрубной пространстве а цифрами движение воды в трубном.

Радиально-диффузорная компоновка строиться на основе шахматной компоновки и получается совмещением двух его краёв. Каждый ряд радиально-диффузорной компоновки представляет собой окружность, таким образом линии рядов образуют концентрические окружности. При одинаковом количестве труб в каждом ряду и равномерном распределении труб в ряду, от центра к периферии расстояние между трубами одного ряда увеличивается. Для радиально-диффузорной компоновки характерны следующие свойства:

1. Расстояние между ближайшими трубами соседних рядов всегда одинаково.
2. Трубы первого и второго рядов лежат в вершинах равносторонних треугольников.

Для проведения сравнительных экспериментальных исследований моделей различных аппаратов воздушного охлаждения в режиме постоянного мониторинга, создан универсальный двухконтурный стенд, принципиальная схема которого приведена на рис. 6.

В первом контуре напор жидкости создается насосом Нс.1, расход

которого регулируется байпасом с помощью вентиля Вн.1. Жидкость проходит через задвижки Зд.1 и Зд.2 поступает в электродвигатель ЭК нагревается в нем до заданной температуры и через задвижку Зд.3 или обходя котел по байпасу через Зд.4 поступает в Рм.1. Пройдя измерительную линию Тд.1-1 и Мр.1-1, через задвижки Зд.5 и Зд.6 жидкость поступает в трубное (условно) пространство ТО. Жидкость, передавая тепло через Зд.7 или минуя теплообменник через Зд.8, и измерительную линию с Мр.1-2 и Тд.1-2 через регулирующую Вн.3, поступает в Ет.1. Пар и воздух из Рб.1 удаляется через Зд.9, а жидкость через Зд.10 поступает на вход в Нс.1.

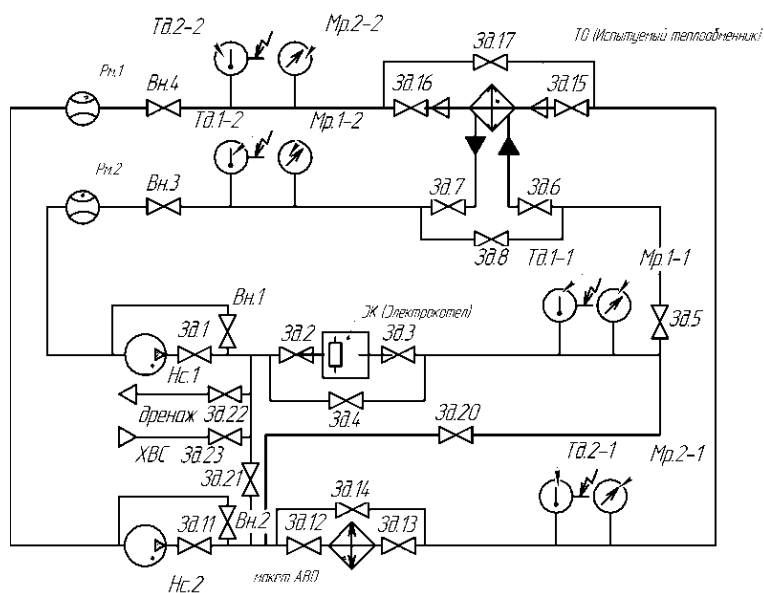


Рис. 6. Принципиальная схема универсального двухконтурного стенда.

Стенд оснащен двумя жидкостными контурами.

Во втором контуре в отличие от первого, вода после насоса охлаждается в макете АВО и потом нагревается в межтрубном (условно) пространстве испытуемого теплообменного аппарата.

Для адекватной оценки результатов испытаний принято использовать экспериментальные данные, полученные при установившихся режимах, которые характеризуются постоянством величин температуры, давления и скорости теплоносителей. Режим считается установившимся при постоянстве чисел Re и Pr , значения которых зависят от температуры и скорости движения теплоносителя. Разработанный нами алгоритм оценки данных параметров изображен на рис. 5.

В контрольных точках датчиками стенда измеряются расход, температура и давление сред, значения которых через преобразователи поступают в компьютер. Мощность насосов, электронагревателей и вентилятора регулируются в процессе испытания.

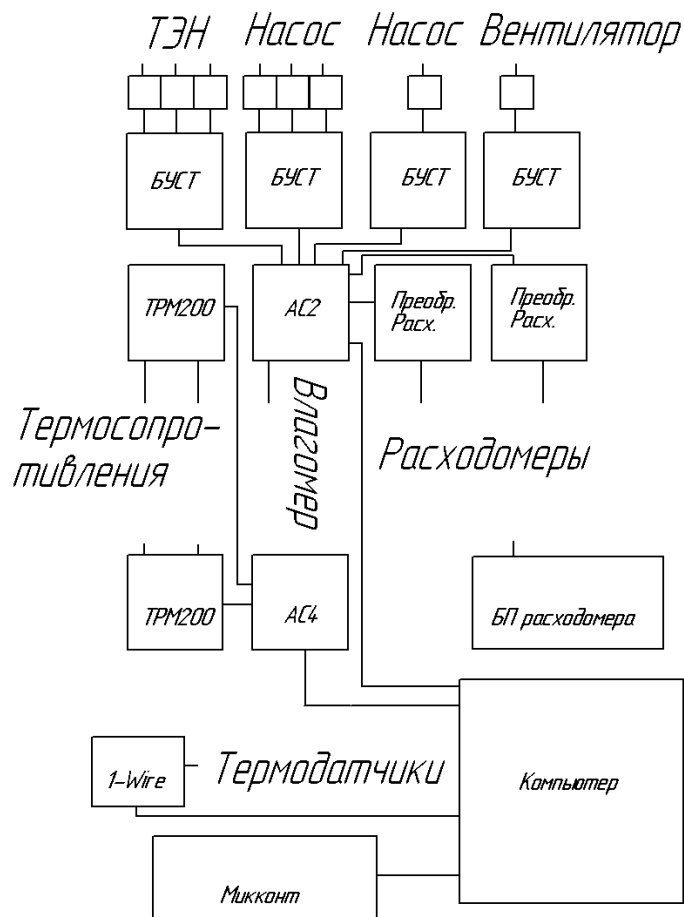


Рис. 7. Схема управления узлами двухконтурного стенда

Управление узлами двухконтурного стенда осуществляется с панели управления по схеме приведенной на рисунке 7. Устройством для ввода вывода является контролер Микконт М-180 с жидкокристаллического дисплея которого можно получать данные с измерительных датчиков и регулировать мощность управляющих систем. Микконт М-180 подключается к компьютеру через порт RS-232. Компьютером осуществляется пересылка команд от Микконта БУСТАм и производятся промежуточные вычисления, прием и пересылка данных к остальным устройствам. С помощью токового преобразователя АС2, подключенного через RS-232, управляющий сигнал идет БУСТАм которые, в свою очередь, регулируют производительностью электронагревателей, насосов и вентилятора. Данные с расходомеров и психрометров, пройдя частотное преобразование, через АС2 попадают в компьютер. Значения температуры жидкостей в 2-х контурах с термосопротивлений поступают к измерителю ТРН200 и через преобразователь АС4 подаются на порт USB компьютера. Температуры воздуха через преобразователь протокола 1-WIRE поступают на порт RS-232 компьютера.

Таблица 1. Техническая характеристика приборов схемы управления двухконтурного стенда

Наименование параметра	Тип прибора	Пределы измерений	Количество точек измерения	Абсолютная погрешность
Температура теплоносителя 1-го контура на входе и выходе теплообменника, °С	Термо-преобразователь сопротивления ДТС035-100М.В3.60	от -50 до 180	1	±0,5
Температура теплоносителя 2-го контура на входе и выходе теплообменника, °С			1	±0,5
Расход теплоносителя контура 1, л/сек.	Расходомер электромагнитный ВЗЛЕТ ЭР 440Л	от 0,0008 до 0,1885	1	±0,004
Расход теплоносителя контура 2, л/сек.			1	±0,004
Давление теплоносителя 1-го контура на входе и выходе теплообменника, атм	Манометр ТМ 310Т (0-10,0 атм) М12*1,5	от 0 до 10	1	±0,15
Давление теплоносителя 2-го контура на входе и выходе теплообменника, атм			1	±0,15
Температура воздуха на входе в аэродинамическую секцию, °С	Цифровой датчик температура DALLAS DS 18S20	от -55 до 125	1	±0,5
Температура воздуха на выходе из аэродинамической секции, °С			100	±0,5
Относительная влажность, %	Измерительный преобразователь влажности и температуры ДВ2ТТ20-Г	от 0 до 98	1	±2
Расход воздуха, м/сек.	Анемометр WindMaster 2	от 0,7 до 42	1	±0,000015

Технические характеристики измерительных приборов схемы управления двухконтурным стендом представлена в табл. 1. Применение цифровых датчиков высокого качества позволяет значительно снизить погрешность измерительных

параметров.

При исследовании принудительной циркуляции воздуха температура греющей среды изменялась в пределах от 35°C до 75°C. Расход греющей воды изменялся от 0,00126 до 0,00278 м³/с. Температура атмосферного воздуха в модели АВО изменялась в пределах 23,1 ÷ 37, с помощью регулятора устанавливалась постоянная средняя температура воздуха $T_{\text{ср}}^{\text{возд}} = 30^\circ\text{C}$. Число поперечных рядов оребренных труб изменялось от $z = 1$ до $z = 5$, и до $z = 4$ для радиально-диффузорной компоновки.

Результаты опыта обработаны в числах подобия и зависимость между ними представлена в виде безразмерных уравнений. Это позволяет обобщить данные экспериментов в этой области в виде степенной функции:

$$Nu = c \cdot Re^n \cdot z^m, \quad (1)$$

где Nu — теплоотдача наружного оребрения к воздуху, выраженная безразмерным числом Нуссельта;

Re — Скорость воздуха в узком сечении трубного пучка, выраженная безразмерным числом Рейнольдса;

z — Количество рядов труб в трубном пучке;

n, m, c — Константы получаемые экспериментальным путём.

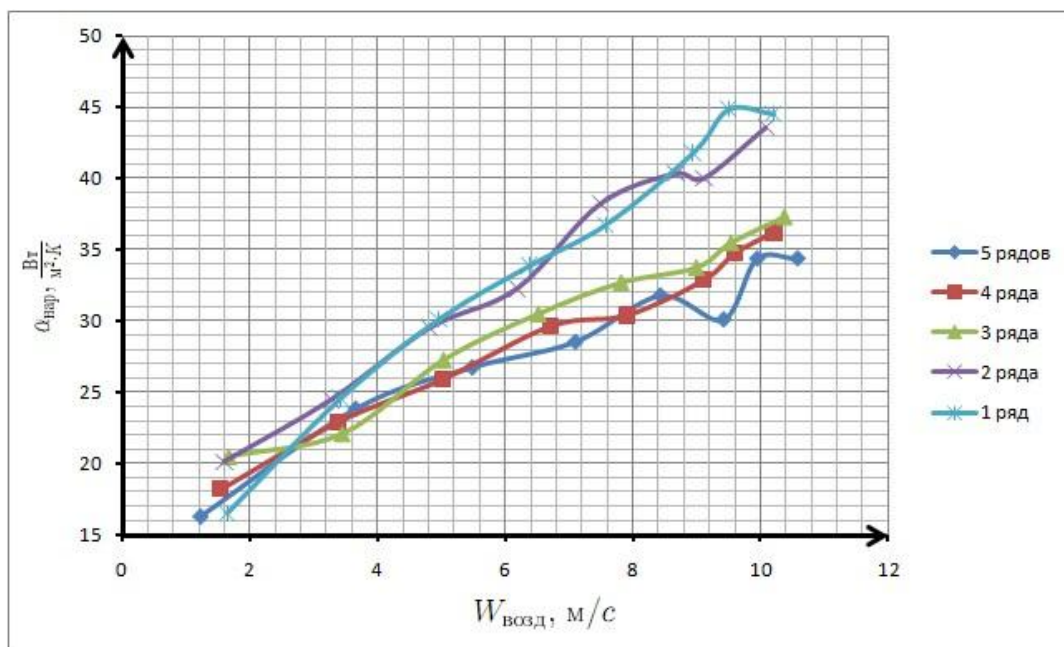


Рис. 8. Зависимость теплоотдачи приведённой к наружному оребрению от скорости воздуха в узком сечении и количества рядов труб для горизонтальной шахматной компоновки.

На рис. 8 и 9 представлены результаты определения $a_{\text{возд}}$, отнесённого к

полной поверхности теплообмена, в зависимости от скорости воздуха в узком сечении и количества рядов труб для горизонтальной шахматной и радиально-диффузорной компоновок соответственно.

Из рисунка видно, что с увеличением скорости воздуха в узком сечении пучка труб увеличивается теплоотдача.

Результаты опытов обработаны в числах подобия (рис.9), и зависимость между ними представлена в виде безразмерных уравнений. Это позволило обобщить данные экспериментов в этой области в виде степенных функций. При обобщении опытных данных определяющим размером служил эквивалентный гидравлический диаметр прохода воздуха через ребристый трубный пучок.

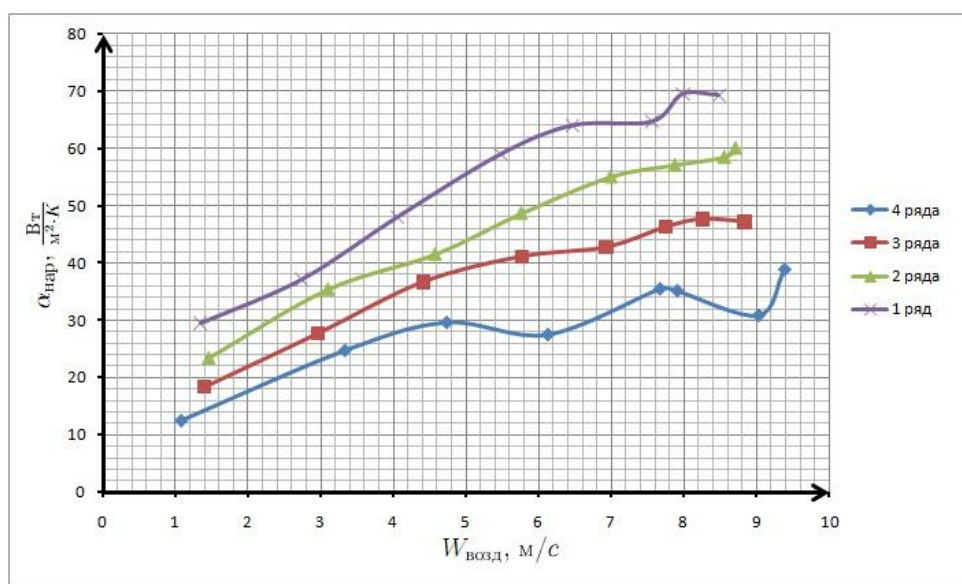


Рис. 9. Зависимость числа Нуссельта от Рейнольдса и количества рядов труб в логарифмических координатах для горизонтальной шахматной компоновки.

В результате обобщения были получены следующие зависимости:

$$Nu = 0,3524 \cdot Re^{0,3672} \cdot z^{-0,202}, \quad (2)$$

для горизонтального шахматного пучка оребренных труб с компоновкой по равнобедренному треугольнику со стороной равной 64 мм и характеристиками трубы $d \times d_0 \times h \times s \times \Delta = 54 \times 25 \times 13,5 \times 3$. Данные обобщены с точностью до 5%

$$Nu = 0,2697 \cdot Re^{0,5145} \cdot z^{-0,696} \quad (3)$$

для радиально-диффузорной компоновки от количества рядов труб в диапазоне 2 ÷ 4

и числа скорости воздуха в узком сечении, Рейнольдса, в пределах $243 \div 2109$. Данные обобщены с точностью до 15%.

Во всём диапазоне Re , радиально-диффузорная компоновка оребрённых труб имеет теплоотдачу наружной поверхности минимум на 35% больше, чем для горизонтальной шахматной компоновки.

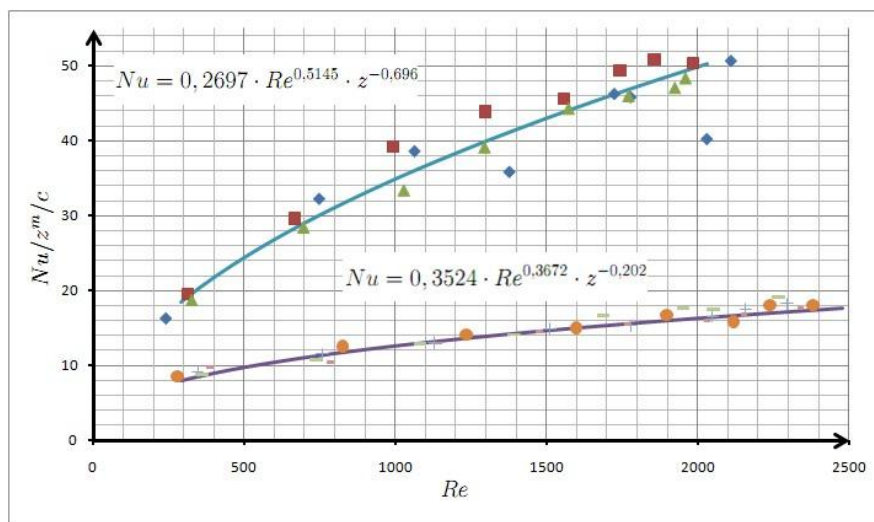


Рис. 10. Результаты обобщения экспериментальных данных.

Выводы

1. Разработана методика экспериментального исследования различных компоновок оребрённых труб аппаратов воздушного охлаждения, позволяющая изучать влияние компоновочных характеристик трубных пучков на теплоотдачу и аэродинамическое сопротивление теплообменной поверхности АВО.
2. Разработан экспериментальный стенд позволяющий исследовать тепловую эффективность теплообменных секций с различными компоновками трубных пучков.
3. Разработана радиально-диффузорная компоновка труб АВО позволяющая увеличить тепловую эффективность аппаратов воздушного охлаждения при том же аэродинамическом сопротивлении.
4. Полученные безразмерные критериальные зависимости позволяют рассчитывать и проектировать аппараты воздушного охлаждения с различной компоновкой оребрённых труб.
5. Проведённый комплекс расчётно-экспериментальных исследований тепловой эффективности различных компоновок трубных пучков позволил создать аппарат воздушного охлаждения вертикального исполнения с минимальной установочной площадью.

Литература

1. Асланян Г.С., Молодцов С.Д., Соловьянов А.А., Энергосбережение как важнейший компонент природоохранной политики // Теплоэнергетика. 1998. № 1. С. 76-80.
2. Кунтыш В.Б., Кузнецов Н.М. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения. СПб.: Энергоатомиздат, 1992. С. 280.
3. Шмеркович В.М. Современные конструкции аппаратов воздушного охлаждения. М.: 1979. С. 70. (Химическое и нефтеперерабатывающее машиностроение: Обзор. информ./ ЦИНТИхимнефтемаш)
4. Крюков Н.П. Аппараты воздушного охлаждения. М.: Химия, 1983. С. 168.
5. Кунтыш В.Б., Стенин Н.Н., Краснощёков Л.Ф. Исследование тепло-аэродинамических характеристик шахматных пучков с нетрадиционной компоновкой оребренных труб//Холодильная техника. 1991. №9. С.11-13.
6. Легкий В.М., Аэродинамическое сопротивление поперечноомываемых коридорных пучков оребренных труб // Теплоэнергетика. 1994. С. 58-61.
7. Основы расчёта и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: Справочник / А.Н. Бессонный, Г.А. Дрейцер, В.Б. Кунтыш. и др.: под общ. ред. В.Б. Кунтыша. – СПб.: Недра, 1996.- 512с.
8. Пронин В.А. Компоновки трубных пучков и синтез конвективных поверхностей теплообмена с повышенной энергоэффективностью: дис. ... док. техн. наук. М., 2008. 48с.
9. Абдеев Э.Р. Совершенствование конструкции аппаратов воздушного охлаждения применением секции с радиально-диффузорной компоновкой оребренных труб: дис. ... канд. техн. наук. Уфа., 2011. 24с.

ENERGY RESEARCH DIFFERENT LAYOUTS OF THE TUBE BUNDLES OF AIR-COOLING

E.R. Abdeev, P.V. Mickiewicz,
urban village Gribanovsky, LLC "Gribanovsky Engineering Works"

M.V. Shvetsov,
Bugulma Mechanical Plant OJSC "Tatneft" them. VD Shashin

R.G. Abdeev,
FSBEI Ufa state petroleum technical university

V.A. Kuznetsov,
*Ufa, the Federal State Government Educational Institutions of higher education
"Bashkir State University"
e-mail: zealot.hmt@gmail.com*

Abstract. *In article results of scientific researches and the technical decisions are resulted, allowing to estimate power efficiency of devices of air cooling (DAC) with various configurations of trumpet bunches heat exchange sections. The review of efficiency of existing configurations of trumpet bunches is executed and the urgency of performance of researches in the given direction is proved. In article the design of the test bed is resulted, allowing to conduct researches of trumpet bunches heat exchange sections DAC of various execution. The technique of processing of experimental data is resulted according to thermal efficiency of trumpet bunches DAC.*

Keywords: *the Device of air cooling, power efficiency, a trumpet bunch, diffusion cell, heat exchange sections, heat emission, the stand.*

References

1. G.S. Aslanian, well done S.D., Solovyanov A.A. Energy conservation as an essential component of environmental policy // Thermal. 1998. Number 1. Pp. 76-80.
2. Kuntysh V.B. Kuznetsov N.M. Thermal and aerodynamic calculations finned air-cooled heat exchangers. St. Petersburg. Energoatomizdat, 1992. S. 280.
3. Shmerkovich V.M. Modern designs of air-cooling. New York: 1979. S. 70. (Chemical and petroleum engineering: review. inform. / TsINTIhimneftemash)
4. Hooks N.P. Air coolers. Khimiya, 1983. S. 168.

5. Kuntysh V.B. Stenin N.N., L.F. Krasnoschekov Study of heat aerodynamic staggered with unconventional layout finned tubes // Refrigeration. 1991. Number 9. P.11-13.
6. Lightweight V.M. Air resistance poperechnomyvaemyh line bundles of finned tubes // Thermal. 1994. Pp. 58-61.
7. Basis of calculation and design of air-cooled heat exchangers: directory / A.N. Sleepless, G.A. Dreitzer, V.B. Kuntysh. etc.: under society. ed. V.B. Kuntysh. St. Nedra, 1996. - 512s.
8. Vladimir Pronin The layout of the tube bundles and the synthesis of the convective heat transfer surfaces with high energy efficiency: dis. ... doc. tech. science. Moscow, 2008. 48c.
9. Abdeev E.R. Improving the design of air-cooling application section with radial diffuser layout finned tubes: dis. ... candidate. tech. science. Ufa., 2011. 24c.