

УДК 536.24

А. Б. Сухоцкий, доцент (БГТУ); В. Б. Кунтыш, д-р техн. наук, профессор (БГТУ)

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ТЕПЛООВОГО И ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Разработана функциональная модель программы для теплового и гидравлического расчета аппаратов воздушного охлаждения. Программа позволяет рассчитывать коэффициент теплопередачи; запас теплообменной поверхности; гидравлические сопротивления по охлаждаемому и воздушному тракту для различных типов (зигзагообразных и горизонтальных), вариантов конструктивного исполнения (количество труб и ходов, способ соединения секций) аппаратов воздушного охлаждения и режимов работы вентилятора (частоты вращения ротора, угла установки лопастей). Программа также позволяет рассчитывать процесс охлаждения различных однофазных и двухфазных сред, а также среды с фазовым переходом.

The functional model of the program for thermal and hydraulic calculation of apparatus of air cooling is developed. The program allows to count factor of a heat transfer, a stock heat-exchange interfaces, hydraulic resistance on a cooled and air path for various types (zigzag and horizontal), variants of a design (number of lines and courses, a way of connection section) apparatus of air cooling and operating modes of the fan (frequency of rotation of the driving wheel, a corner of installation of blades). The program also allows to count process of cooling of various single-phase and biphase mediums, medium with phase transformation.

Введение. В современном мире целесообразность автоматизации процессов не вызывает сомнения, т. к. позволяет значительно сократить время изготовления и повысить качество продукции. Особенно актуально разрабатывать программные модули для трудоемких и сложных, с большой вероятностью ошибок расчетов, таких как тепловой расчет аппаратов воздушного охлаждения (АВО). Эти аппараты нашли широкое применение в нефтегазовой и химической промышленности [1, 2] для охлаждения больших потоков (от 10 т/ч и более) технологических сред. АВО имеют значительные габариты, их стоимость высока. Ошибка в выборе компоновки АВО может привести к существенному нарушению технологического процесса и значительным экономическим издержкам.

Конструктивные особенности АВО. Теплообменная поверхность АВО представляет собой шахматный пучок из оребренных биметаллических труб. В АВО применяются исключительно два конструктивных типа круглых теплообменных труб: биметаллические трубы с накатными спиральными алюминиевыми ребрами (рис. 1) и биметаллические трубы с навитыми спиральными KLM-ребрами (рис. 2). Последние имеют следующие конструктивные особенности. На наружной поверхности несущей трубы по продольным и концентрическим образующим предварительно накатана искусственная шероховатость в виде непрерывных рифлений «бороздка – выступ» с шагом $s_p \approx 0,6-2,0$ мм и высотой $h_p \approx 0,1-0,3$ мм. Поперечное сечение рифлений в виде треугольной или усеченной пирамиды (рис. 2, сечение I).

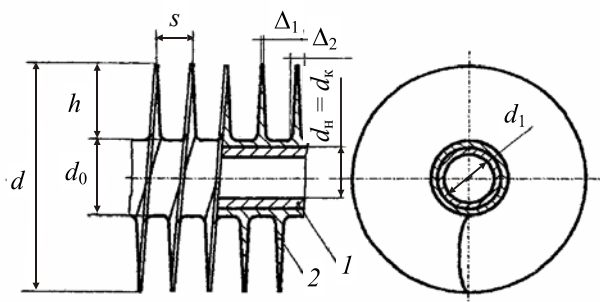


Рис. 1. Конструкция биметаллической ребристой трубы с накатными спиральными алюминиевыми ребрами: 1 – несущая труба; 2 – накатные ребра

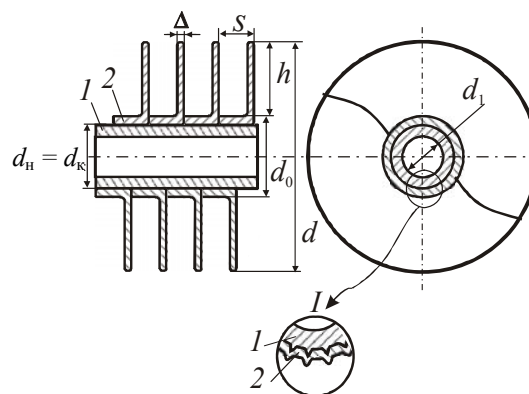


Рис. 2. Конструкция биметаллической ребристой трубы с навитыми спиральными KLM-ребрами: 1 – несущая труба; 2 – KLM-ребра

Алюминиевая лента исходной толщины $\Delta_{л} \approx 0,3-0,4$ мм с предварительно спрофилированным поперечным сечением L-образной формы навивается под натягом на несущую трубу, а механическое соединение горизонтальной

полки L-ребра достигается или за счет усилия натяга, или путем деформации ее роликами, имеющими зубчатый профиль рифлений на несущей трубе.

Принятые на рис. 1, 2 обозначения соответствуют следующим геометрическим параметрам: d_1 – внутренний диаметр несущей трубы; d – наружный диаметр ребра; $d_0 = d - 2h$ – диаметр ребра по его основанию; d_n – наружный диаметр несущей трубы; d_k – диаметр контактной зоны; h, s – высота и шаг ребра; Δ_1, Δ_2 – толщина ребра у вершины и основания; Δ – средняя толщина ребра.

АВО вынесены в отдельную группу газожидкостных теплообменников из-за больших конструктивных и режимных параметров: длина труб достигает 12 м, коэффициент оребрения трубы – 22, площадь поверхности теплообмена – 10 000 м², количество поперечных рядов труб – >8, скорость воздуха в сжатом сечении пучка – порядка 5–11 м/с. Для предотвращения прогиба труб между поперечными рядами устанавливают дистанционные прокладки, что однако не исключает возможность появления разрывов между трубами по глубине пучка. Все эти особенности оказывают влияние на теплоотдачу и аэродинамическое сопротивление по воздушной стороне, что учитывается введением поправочных коэффициентов.

Расчет АВО при сравнении с расчетом других теплообменных аппаратов отличается характерными трудностями и особенностями [3–5]. Трудность расчета АВО заключается в сложной взаимосвязи теплофизических параметров теплообменного аппарата, а также в необходимости создания множества баз теплофизических и конструктивных данных. Особенностью расчета является согласование рабочих параметров АВО [6, 7] с нелинейными рабочими характеристиками изначально заданного устройства перемещения охлаждающей среды (вентилятора).

Структура программы. Сотрудниками кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники Белорусского государственного технологического университета создана программа ТиГРА-1.0 (тепловой и гидравлический расчет аппаратов) для выбора аппаратов воздушного охлаждения из имеющегося номенклатурного ряда выпускаемых АВО и оптимизации их конструкции на основе теплового и гидравлического расчета. Модель программы включает следующие модули и функции.

Базовый модуль – ввод и расчет энергетических и физических характеристик охлаждаемой среды и воздуха (рис. 3).

Теплотехнические и гидравлические характеристики						
G, т/ч	t _{вх} , °C	t _{вых} , °C	v, м/с	R, м ² К/Вт	ΔP, кПа	N, кВт
153.6	110	45	2.70	0.0	295.9	19.75
252.1	28	37.6	24.85	0.0	1.145	113.21

Рис. 3. Ввод энергетических и физических характеристик охлаждаемой среды и воздуха

Конструктивный модуль – ввод и расчет геометрических параметров АВО (рис. 4) и пучка (рис. 5).

Рис. 4. Ввод геометрических параметров АВО

Рис. 5. Ввод геометрических параметров теплообменного пучка АВО

Расчетный модуль – расчет тепловых и гидравлических параметров АВО.

Оптимизационный модуль – оптимизация конструкции аппарата для обеспечения необходимого запаса теплообменной поверхности.

Стандартные методики [2, 4, 8] теплового и гидравлического расчета АВО основаны на применении большого количества данных, представленных в виде таблиц, графиков и диаграмм, что неудобно для практического применения. Поэтому в программе ТиГРА имеются следующие виды баз данных:

1. Таблица стандартизированных геометрических параметров АВО (количество секций, рядов и ходов труб, площадь проходного сечения (для зигзагообразных – угол атаки воздушного потока)).

2. Таблица технологически возможных компоновочных параметров пучка (продольный и поперечный шаг в пучке, коэффициент обребрения, диаметры несущей трубы и обребрения).

3. Теплофизические свойства воздуха и охлаждаемых сред (зависимость коэффициентов теплоемкости, вязкости, теплопроводности, плотности от температуры (для газообразных сред и от давления)).

4. Характеристики вентиляторов (зависимость создаваемого напора и КПД от расхода для различных углов установки лопастей и частоты вращения).

5. Система критериальных уравнений с библиотекой характерных коэффициентов и зависимостей для расчета теплопередающих параметров (коэффициентов теплоотдачи, термического контактного сопротивления).

В техническом задании на подбор АВО пользователь должен выбрать его тип: малопоточный, зигзагообразный, горизонтальный с учетом особенностей охлаждающей среды. Кроме того, выбирается способ присоединения секций (последовательный или параллельный), а также в зависимости от характеристик охлаждаемой среды (вязкость, токсичность, пожароопасность, взрывоопасность, коррозионная агрессивность и другие) и условий охлаждения (температура и влажность воздуха) – способ исполнения АВО.

Программа ТиГРА проста в работе: пользователь вводит известные величины в выделенные белым цветом окошки интерфейса. К таким параметрам относятся температурный режим охлаждающего воздуха; тепловая нагрузка, тип (состав) и параметры (расход, температура, давление) охлаждаемой рабочей среды; термическое сопротивление загрязнений; допустимые гидравлические потери, минимальный запас площади поверхности теплообмена.

Пользователь может сам выбирать единицы измерения различных величин в соответствии со своими задачами. Так, расход среды можно задавать в тоннах в час или килограммах в секунду, тепловую мощность – киловаттах или гикалориях в час, давление – паскалях или

атмосферах. При изменении единиц измерения ранее введенные величины корректно пересчитываются: программа хранит значения во внутренних единицах, не зависящих от выбора пользователя.

Программа ТиГРА может осуществлять расчет АВО для охлаждения потоков сред, имеющихся в базе данных (дизельное топливо, бензин, природный газ, мазут, трансформаторное масло и др.), а также для других сред с известными теплофизическими характеристиками. В последнем случае параметры задаются в специальном модуле, в котором пользователь может выбрать размерность теплофизических величин (рис. 6). При этом существуют следующие варианты процесса охлаждения потока: однофазная среда (газ или жидкость), двухфазная (смесь жидкости и газа), среда с фазовым переходом (охлаждение газа с конденсацией (полной или частичной), а затем охлаждение жидкости или смеси жидкости и газа).

The screenshot shows a software window titled "Теплотехнические параметры среды в заданном диапазоне температур". It is divided into three sections, each with a checked checkbox and a "другая размерность" (other unit) option.

- охлаждение газа:**
 - Теплоемкость: 4,2 Дж/кг·°C
 - Плотность: 9,5 кг/м³
 - Вязкость: 1,71 10⁻⁶ м²/с
 - Теплопроводность: 0,157 Вт/м·°C
- конденсация:**
 - Температура кипения: 105 °C
 - Давление кипения (абс): 125 кПа
 - Теплота парообразования: 319 кДж/кг
 - Плотность конденсата: 743 кг/м³
 - Вязкость конденсата: 0,73 10⁻⁶ м²/с
 - Теплопроводность: 0,14 Вт/м·°C
 - Массовое содержание: 100 %
- охлаждение жидкости/газа:**
 - Теплоемкость: 2150 Дж/кг·°C
 - Плотность: 751 кг/м³
 - Вязкость: 0,73 10⁻⁶ м²/с
 - Теплопроводность: 0,14 Вт/м·°C

At the bottom of the window is a "Продолжить" (Continue) button.

Рис. 6. Ввод параметров для охлаждения среды с известными теплофизическими характеристиками

Методики расчета тепловых и гидравлических параметров АВО основаны на российских нормах, приведенных в нормативно-технических документах [8] с принципиальными дополнениями и уточнениями [3–5]. Корректность задания параметров, а также выполнения условий применимости методик теплового и

гидравлического расчетов проверяется программой на этапе ввода – в случае обнаружения проблемы выдается соответствующее диагностическое сообщение.

Программа ТиГРА позволяет оптимизировать компоновочные параметры теплообменного пучка. Для этого имеются функции «Частный расчет» и «Обобщенный расчет», которые задаются пользователем.

Особенность функции «Частный расчет» заключается в том, что здесь применяются уравнения подобия для теплоотдачи и сопротивления, осуществляемых по воздушной стороне, для конкретного типа поверхности теплообмена с ее геометрическими и компоновочными параметрами, которые в большинстве случаев являются собственностью разработчиков программы или заводов-изготовителей АВО, для которых создается программа. Данные уравнения получены на основании целевых продувок пучков в аэродинамической трубе, и погрешность расчета по ним приведенного коэффициента теплоотдачи α_2 и перепада давления воздуха не превышает $\pm 5\%$. Диапазоны характеристик оребрения, для которых получены критериальные уравнения, заложены в библиотеку компоновочных параметров пучка. В случае если параметры пучка не соответствуют заданным диапазонам, программа автоматически включает функцию «Обобщенный расчет».

Функция «Обобщенный расчет» позволяет выполнять расчеты теплоаэродинамических характеристик пучка в широком диапазоне геометрических и компоновочных параметров, но на основе уравнений, имеющих погрешность до 20%. Особенностью функции «Обобщенный расчет» является задание исходных взаимовлияющих параметров (шаг и диаметр оребрения, число труб в каждом ряду, шаги разбивки пучка, площадь фронтального сечения и др.) теплообменного аппарата в едином многооконном диалоге (рис. 5). Определение компоновочных параметров пучка (количество и расположение труб, коэффициент загромождения, коэффициент оребрения) автоматизировано.

Еще одной особенностью программы является форма представления результата: пользователь получает полный протокол расчета, включая промежуточные параметры и ссылки на примененные методики. Этим достигаются две цели: пользователь имеет возможность контролировать весь ход расчета и анализировать полученные результаты. Отчеты формируются на основе шаблонов, заполненных пользователем, что позволяет быстро получить результаты расчета в требуемом виде, а также изменять их в Microsoft Excel.

Алгоритм оптимизации конструкции АВО. Расчеты АВО, выполняемые в программе ТиГРА, могут быть двух типов:

– поверочный – пользователь проверяет реализацию тепловых нагрузок АВО, выбранного из имеющегося номенклатурного ряда выпускаемых аппаратов;

– конструкторский – пользователь проектирует конструкцию АВО под определенные тепловые режимы.

При проведении поверочного расчета АВО пользователь с помощью диалогового окна задает определенную конструкцию аппарата (рис. 4), а при конструкторском – позволяет программе выбирать длину труб, число рядов и ходов секции (режим «авто»).

Оптимизацию конструкции теплообменных аппаратов можно производить путем решения системы математических уравнений с ограничениями. Но в данном случае при небольшом количестве вариантов (менее 20) конструктивного исполнения параметров АВО задачу проще решить простым перебором всех вариантов, начиная с варианта с наименьшей длиной трубы, наименьшим числом поперечных рядов и наибольшим числом ходов. Алгоритм оптимизации конструкции АВО представлен на рис. 7.

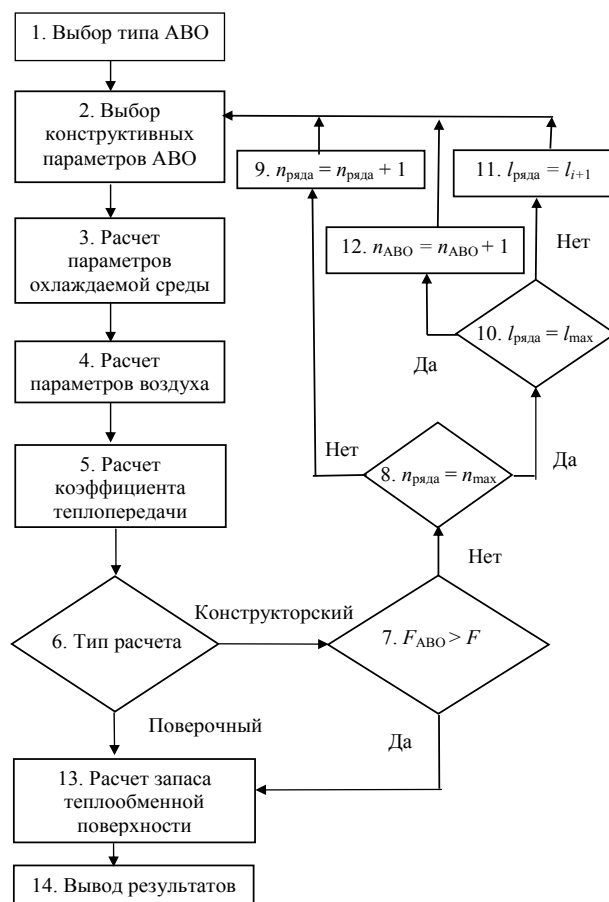


Рис. 7. Алгоритм оптимизация конструкции АВО

Четвертый и пятый этапы решаются методом схождения через цикл. Четвертый этап заключается в решении системы уравнений аэродинамических характеристик воздушного тракта АВО и вентилятора

$$\begin{cases} H_{\text{в. АВО}} = f(V_{\text{в. АВО}}), \\ H_{\text{вент}} = f(V_{\text{вент}}), \end{cases} \quad (1)$$

где H – напор воздуха; V – объемный расход воздуха.

Пятый этап заключается в определении термического сопротивления контакта оребрения с основной трубой R_k через неявную связь с коэффициентом теплопередачи k

$$k = \frac{1}{\frac{\varphi d_0}{d_1} \left(\frac{1}{\alpha_1(t_1)} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + R_k(t_k) + \frac{d_1 \delta_2}{d_k \lambda_2} \right) + \frac{1}{\alpha_2(t_2)}}, \quad (2)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от охлаждаемой среды к несущей трубе; δ_1, λ_1 – толщина и коэффициент теплопроводности материала несущей трубы; δ_2, λ_2 – толщина и коэффициент теплопроводности материала оребрения; α_2 – приведенный коэффициент теплоотдачи от воздуха к оребрению; t_1, t_2, t_k – средняя температура соответственно охлаждаемой среды, воздуха и контакта основной трубы и оребрения.

Для конструкторского расчета оптимизация конструкции АВО выполняется сначала на основе теплотехнического расчета (критерием соответствия является теплопередающая поверхность $F_{\text{АВО}}$ аппарата), а затем на основе гидравлического (критерием соответствия являются допустимые потери давления по тракту охлаждаемой среды).

Если расчетная площадь теплопередающей поверхности F больше площади теплопередающей поверхности $F_{\text{АВО}}$ выбранного АВО, то программа сначала увеличивает число поперечных рядов секции $n_{\text{ряда}}$, а затем длину труб l пучка (рис. 4). При отсутствии необходимого результата программа увеличивает количество аппаратов.

Если потери давления по тракту охлаждаемой среды превышают допустимое значение, то программа первоначально уменьшает число ходов, а затем увеличивает количество параллельно подключенных аппаратов.

Результатом расчета является подбор АВО из имеющегося номенклатурного ряда выпускаемых аппаратов с учетом накладываемых требований, а также определение всех конструктивных и энергетических параметров. Затем осуществляется уточнение тепловых параметров, которое заключается в нахождении действительной тепловой нагрузки и темпера-

туры на выходе охлаждаемой среды (с учетом полученного коэффициента запаса теплопередающей поверхности) и (или) определении оптимального угла установки лопастей вентилятора, при котором коэффициент запаса равен нулю.

Заключение. Разработана функциональная модель программы для теплового и гидравлического расчета аппаратов воздушного охлаждения, позволяющая выполнять следующие задачи:

- определять коэффициент теплопередачи, запас поверхности, гидравлические сопротивления по охлаждаемому и воздушному тракту для различных вариантов конструкционного исполнения стандартизированных АВО и режимов работы вентилятора;

- оптимизировать компоновочные параметры теплообменного пучка и конструкцию аппарата под определенные теплотехнические и гидравлические нагрузки;

- рассчитывать АВО для охлаждения различных однофазных и двухфазных сред, а также среды с фазовым переходом.

Литература

1. Шмеркович, В. М. Аппараты воздушного охлаждения для технологических установок нефтеперерабатывающих и химических заводов: обзорн. информ. / В. М. Шмеркович. // Опыт проектирования нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1971. – 111 с.

2. Машины и аппараты химических производств: примеры и задачи: учеб. пособие / И. В. Доманский [и др.]; под общ. ред. В. Н. Соколова. – Л.: Машиностроение, 1982. – 384 с.

3. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: справочник / под общ. ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессонного. – СПб.: Недра, 1996. – 512 с.

4. Примеры расчетов нестандартизированных эффективных теплообменников / под ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессонного. – СПб.: Недра, 2000. – 300 с.

5. Кунтыш, В. Б. Тепловой и гидравлический расчет теплообменников воздушного охлаждения / В. Б. Кунтыш, Н. М. Кузнецов. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 280 с.

6. Стандартизованные аппараты общего назначения: каталог. – М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1973. – 24 с.

7. Аппараты воздушного охлаждения: каталог / А. Н. Бессонный [и др.]. – М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1992. – 17 с.

8. Методика теплового и аэродинамического расчета аппаратов воздушного охлаждения. – М.: ВНИИнефтемаш, 1981. – 101 с.

Поступила 31.03.2010