**ПРОГРАММА РАСЧЕТА СТАНДАРТИЗИРОВАННЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ**

**1. Структура программы**

Специалистами кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники УО «Белорусский государственный технологический университет» создана программа для выбора аппаратов воздушного охлаждения (АВО) из имеющегося номенклатурного ряда выпускаемых аппаратов и оптимизации конструкции АВО на основе теплового и гидравлического расчета (рис. 40).

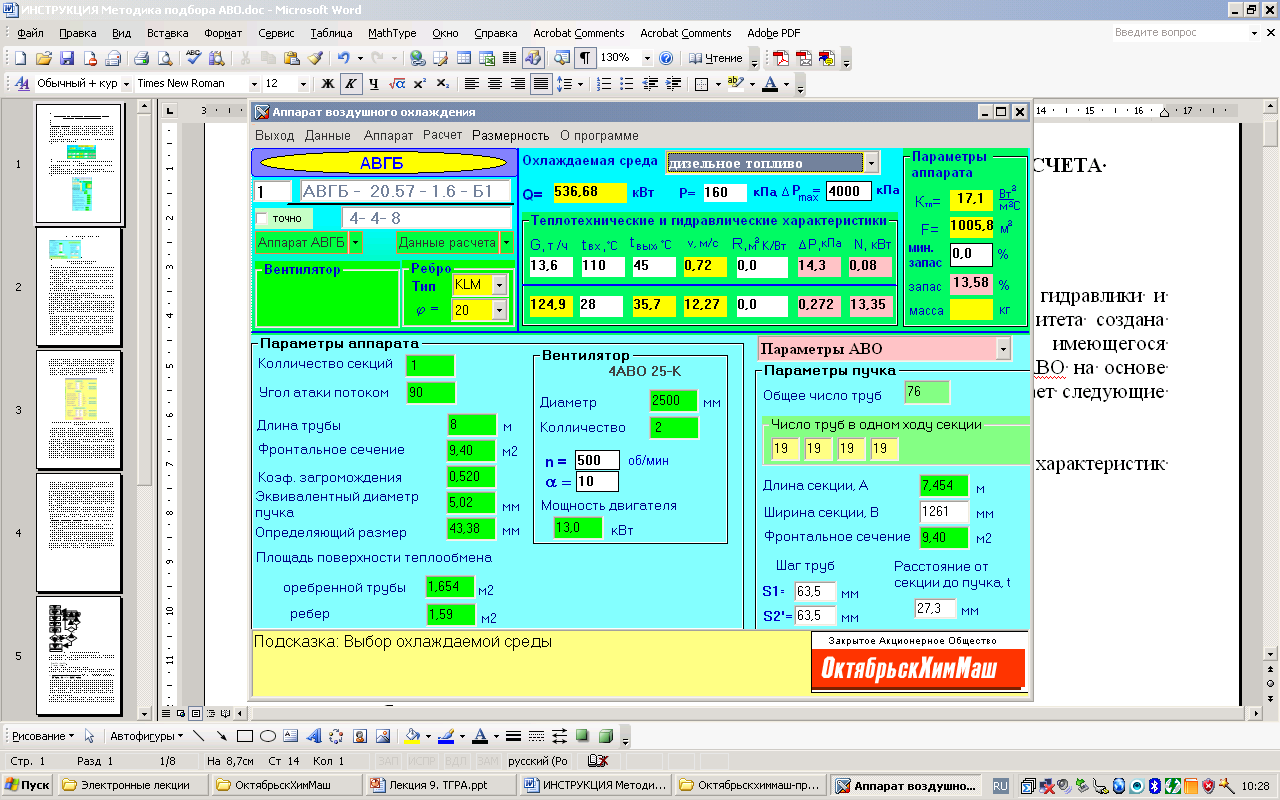


Рис 40

Модель программы включает следующие модули и функции.

*Базовый модуль* – ввод и расчет энергетических и физических характеристик охлаждаемой среды и воздуха (рис. 41).

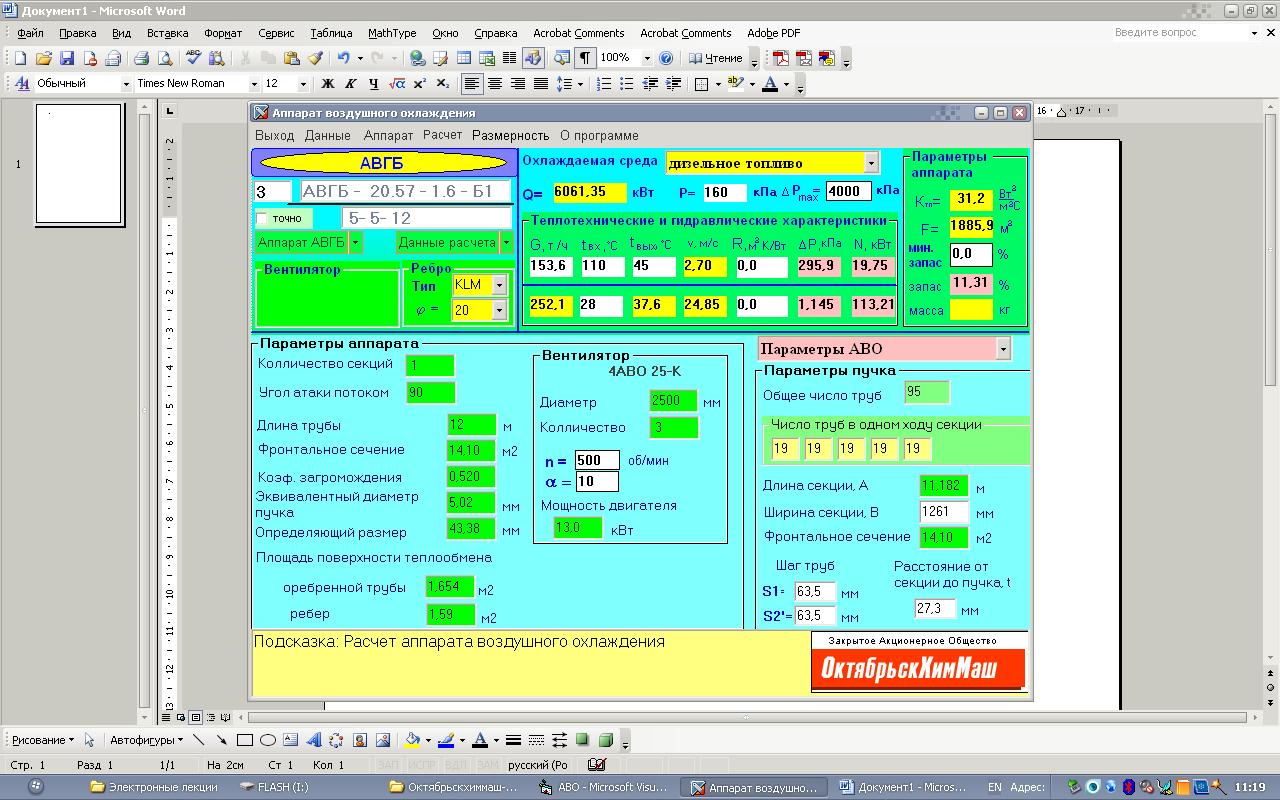
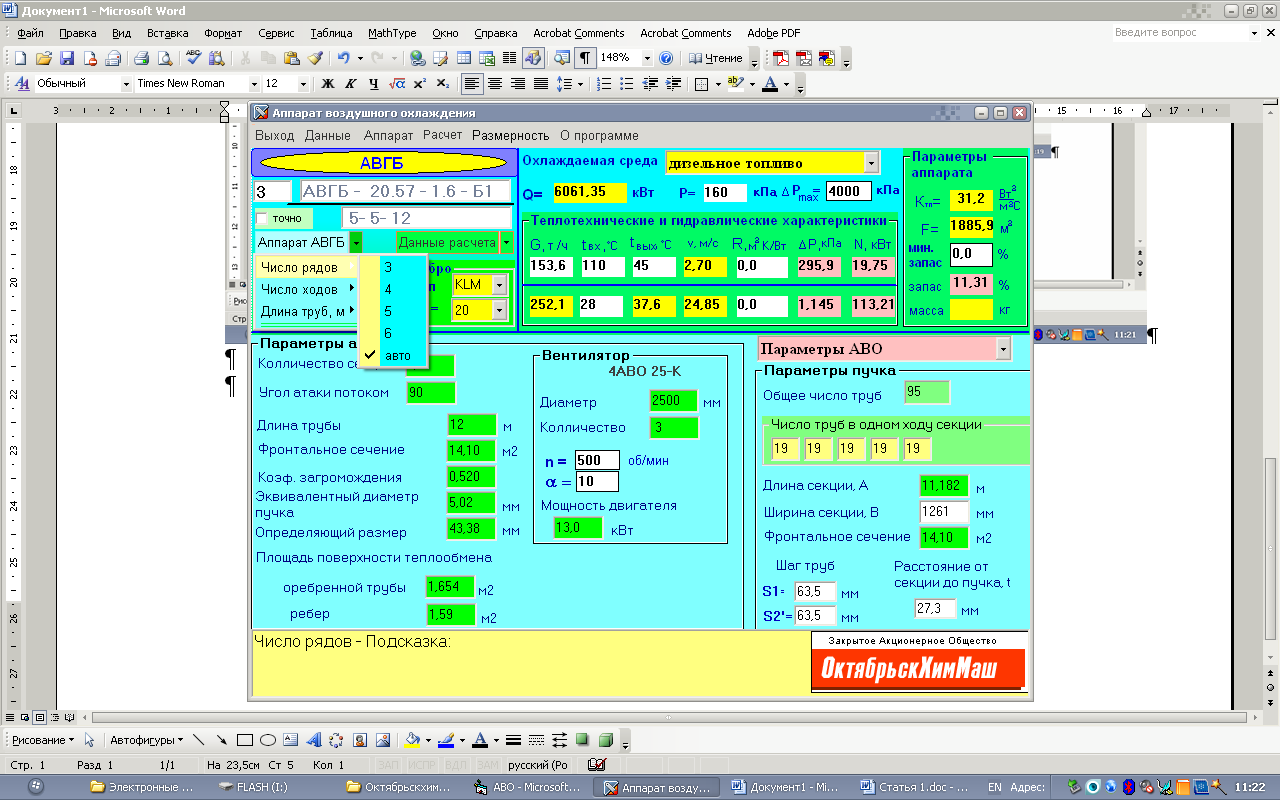
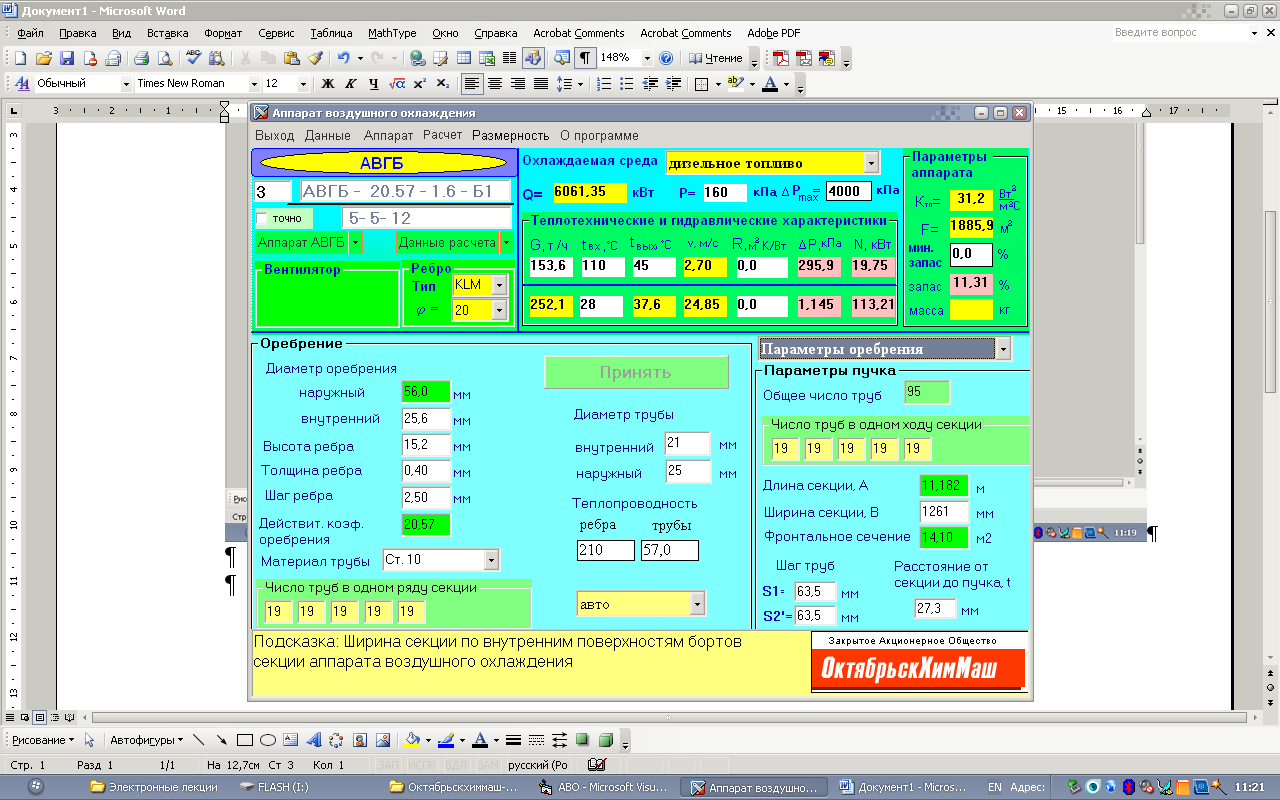


Рис 41

*Конструктивный модуль* – ввод и расчет геометрических параметров АВО (рис. 42, *а*) и пучка (рис. 42, *б*).

*Расчетный модуль* – расчет тепловых и гидравлических параметров АВО.

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

*а б*

Рис. 42

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

* таблица конструкторско возможных геометрических параметров АВО (количество секций, рядов и ходов труб, площадь проходного сечения (для зигзагообразных – угол атаки воздушного потока));
* таблица технологически возможных компоновочных параметров пучка (продольный и поперечный шаг в пучке, коэффициент оребрения, диаметры несущей трубы и оребрения);
* теплофизические свойства воздуха и охлаждаемых сред (зависимость коэффициентов теплоемкости, вязкости, теплопроводности, плотности от температуры (для газообразных сред и от давления));
* характеристики вентиляторов (зависимость создаваемого напора и к.п.д. от расхода для различных углов установки лопастей и частоты вращения);
* 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, коррозийная агрессивность и др.) и условий охлаждения (температура и влажность воздуха) выбирается способ исполнения АВО.

Программа проста в работе: пользователь задает известные величины в окошки, выделенные белым цветом. 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.

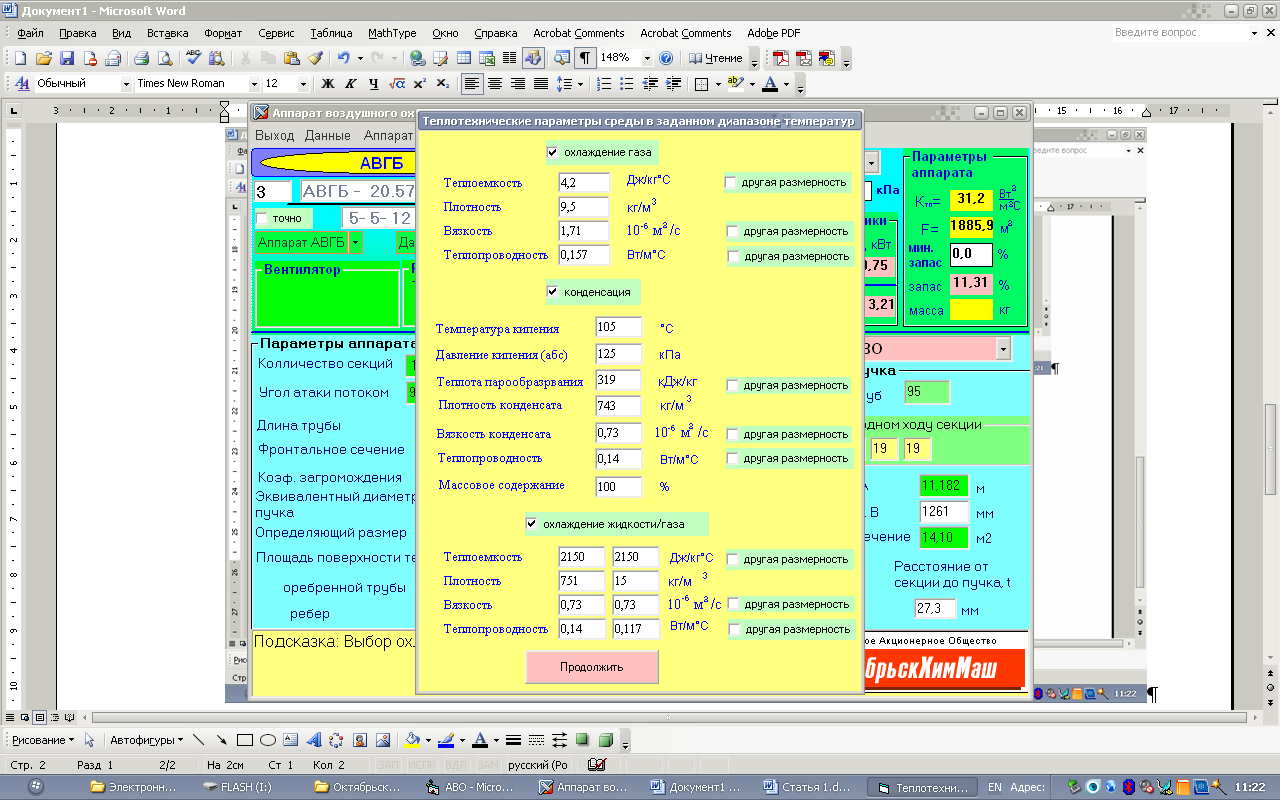
Пользователь может сам выбирать единицы измерения различных величин в соответствии со своими задачами. Так, расход среды можно задавать в т/ч или кг/с, тепловую мощность – кВт или Гкал/ч, давление – Па или атм. При изменении единиц измерения ранее введенные величины корректно пересчитываются: программа хранит значения во внутренних единицах, не зависящих от выбора пользователя.

Программа может осуществлять расчет АВО для охлаждения потоков сред, имеющихся в библиотеке (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 имеет возможность выбрать размерности теплофизических величин (рис. 43, *а*). При этом допустимы следующие варианты процесса охлаждения потока: однофазная среда (газ или жидкость), двухфазная среда (смесь жидкости и газа), с фазовым переходом (охлаждение газа с конденсацией (полной или частичной), а затем охлаждение жидкости или смеси жидкости и газа.)

Программа 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 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 α2 и перепада давления воздуха не превышает ±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 данных 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 (см. рис. 42, *б*). Определение компоновочных параметров пучка (количество и расположение труб, коэффициент загромождения, коэффициент оребрения) во многом автоматизировано.

*а б*

Рис. 43

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. 44, *а*) и биметаллические трубы с навитыми спиральными *KLM*-ребрами (рис. 44, *б*).

Принятые на рис. 44 *а*, *б*, обозначения соответствуют следующим геометрическим параметрам: *d*1 − внутренний диаметр несущей трубы; *d* − наружный диаметр ребра;  − диаметр ребра по его основанию; *d*н − наружный диаметр несущей трубы; *d*к − диаметр контактной зоны; *h*, *s* − высота и шаг ребра; Δ1, Δ2 − толщина ребра у вершины и основания; Δ − средняя толщина ребра.

*а б*

Рис. 44

**2. Алгоритм оптимизации конструкции АВО**

Расчет АВО, выполняемый при помощи программы, может 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 (см. рис. 42, *а*), а при конструкторском пользователь позволяет программе выбирать длину труб, число рядов и ходов секции (режим авто).

Алгоритм оптимизации конструкции АВО представлен на рис. 43, *б*. Два этапа (четвертый и пятый) решаются методом схождения через цикл. Четвертый этап заключается в решении системы уравнений аэродинамических характеристик воздушного тракта АВО и вентилятора:



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

Пятый этап заключается в определении термического сопротивления контакта оребрения с основной трубой *R*к через неявную связь с коэффициентом теплопередачи *k*:



где α1 – коэффициент теплоотдачи от охлаждаемой среды к несущей трубе; δ1, λ1 − толщина и коэффициент теплопроводности материала несущей трубы; δ2, λ2 − толщина и коэффициент теплопроводности материала оребрения; α2 – приведенный коэффициент теплоотдачи от воздуха к оребрению; *t*1, *t*2, *t*к − 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*АВО аппарата), а затем на основе гидравлического расчета (критерием соответствия являются допустимые потери давления по тракту охлаждаемой среды).

Если расчетная площадь (для осуществления теплового режима) теплопередающей поверхности *F* более площади теплопередающей поверхности *F*АВО выбранного АВО, то программа сначала увеличивает число поперечных рядов секции *n*ряда, а затем длину труб *l* пучка (см. рис. 43, *б*). При отсутствии необходимого результата программа увеличивает количество аппаратов.

Если потери давления по тракту охлаждаемой среды больше допустимого значения, то программа первоначально уменьшает число ходов, а затем увеличивает количество подключенных параллельно аппаратов.

Результатом расчета является подбор АВО из имеющегося номенклатурного ряда выпускаемых аппаратов с учетом накладываемых требований, а также определение всех конструктивных и энергетических параметров.

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 получать результаты расчета в требуемом виде, а также изменять их в Microsoft Excel.

**3. Подбор аппарата воздушного охлаждения**

Программа создавалась с целью обеспечить максимальное удобство пользования, поэтому на интерфейсе имеется достаточное количество пояснений. Также при выделении курсивом внизу программы в нижнем окне (рис. 45, *32*) появляется подсказка о назначении окна или кнопки.

При вызове программы для расчета АВО автоматически предлагается произвести расчет для АВМК (рис. 45). Для расчета АВО другого типа необходимо в командной строке в графе аппарат (рис. 45, *в*) выбрать необходимый тип АВО, пометив его галочкой. При расчете программа автоматически подбирает число рядов в аппарате, число ходов и длину оребренной трубы. Однако если необходимо точно задать эти параметры, то можно сделать это через активную кнопку Аппарат АВО, (рис. 45, *12*), выделив необходимый параметр галочкой. Также необходимо выбрать тип исполнения АВО (Б1, или Б2, или …) и способ присоединения секции (последовательный и параллельный) через активную кнопку Данные расчета → Исполнение АВО и Данные расчета → Способ присоединения секций (рис. 45, *3*). Затем выбираем охлаждаемую среду через активную кнопку Охлаждаемая среда (рис. 45, *8*). После этого начинаем вводить данные для расчета.

Расчет можно производить по тепловой нагрузке *Q* (рис. 45, *1*) или по расходу охлаждаемой среды *G* (рис. 45, *2*). Выбор расчета осуществляется через активную кнопку Данные расчета → Заданный параметр (рис. 45, *3*), пометив необходимый параметр галочкой. При этом окошки, в которые необходимо ввести данные выделяются белым цветом. Нажатие командной строки размерность (рис. 45, *д*) позволяет переключать единицы измерения нагрузки *Q* с Гкал/ч на кВт, единицы измерения расхода *G* т/ч на кг/с и т. д. Далее в графе (рис. 45, *1* или *2*) необходимо ввести исходные данные. После чего вводятся входные и выходные температуры по охлаждающей среде (рис. 45, *3*, *4*) и температура воздуха (рис. 45, *5*), задаются давление охлаждаемой среды (рис. 45, *6*) и допустимые потери давления в АВО по охлаждаемой среде (рис. 45, *7*). При необходимости можно ввести коэффициент термического загрязнения со стороны охлаждаемой среды (рис. 45, *9*) и воздуха (рис. 45, *11*), а также запас по теплообменной поверхности (рис. 45, *10*).



Рис. 45

Затем необходимо ввести тип (накатное или *KLM*-ребро) (рис. 45, *13*) и коэффициент оребрения (рис. 45, *14*). Параметры оребрения можно посмотреть, выбрав в активной кнопке (рис. 46, *15*) пункт Параметры оребрения (рис. 46). При необходимости высоту, толщину и шаг ребра (рис. 46, *17*, *18*, *19*) можно изменить. Корректность изменений необходимо проверить, нажав кнопку Принять (рис. 46, *20*). При этом также произойдет расчет нового коэффициента оребрения (рис. 46, *21*).

При выборе исполнения АВО автоматически выбирается тип стали основной трубы, который затем можно уточнить через активную кнопку Материал трубы (рис. 46, *22*); можно также задать теплопроводность материала, из которого изготовлено оребрение, и теплопроводность материала, из которого сделана основная труба (рис. 46, *23* и *24*). Для осуществления правильного расчета необходимо проверить точно ли заданы параметры секции: внутренняя длина А (рис. 46, *2*5) и внутренняя ширина В (рис. 46, *26*), а также шаги пучка оребренных труб (рис. 46, *27* и *28*).



Рис. 46

Расчет производится при нажатии на кнопку Расчет (рис. 45, *г*) в командной строке. Нажатие на указанную кнопку проводится после каждого изменения каких-либо исходных данных. Параметры рассчитанного аппарата будут представлены в окне (рис. 45, *29*), а количество аппаратов − в окне (рис. 45, *30*). При необходимости расчета точного количества аппаратов следует задть это количество в окне (рис. 45, *30*), а в окне Точно (рис. 45, *31*) поставить галочку.

Выполненный расчет можно сохранить в Microsoft Excel или распечатать на принтере, выбрав в командной строке Данные (рис. 45, *б*) требуемую операцию.