

Ю.В. ДЬЯЧЕНКО, А.В. ЧИЧИНДАЕВ

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ НА ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ

Допущено УМО Авиационных специальностей МО РФ
в качестве учебного пособия для студентов высших
учебных заведений, обучающихся по направлению
551000 «Авиа- и ракетостроение» и специальности
131100 «Системы жизнеобеспечения
и оборудования ЛА»

2-е издание

НОВОСИБИРСК
2017

УДК 629.7.048(075.8)
Д 937

Рецензенты:

канд. техн. наук, проф. *Ю.М. Шустров* (МАИ)
д-р тех. наук, проф. *В. И. Терехов* (ИТ СО РАН)

Работа подготовлена на кафедре технической теплофизики

Дьяченко Ю.В.

Д 937 Особенности работы авиационных систем кондиционирования на влажном воздухе: учеб. пособие / Ю.В. Дьяченко, А.В. Чичиндаев. – 2-е изд. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 87 с.

ISBN 978-5-7782-3172-6

В пособии рассматриваются специальные вопросы, учитываемые при проектировании СКВ современных пассажирских самолётов Ту-204 (Боинг-767, А-300) с отделением влаги на высоком давлении. Дается общее представление об основных проблемах при работе СКВ на влажном воздухе: при конденсации на низком и высоком давлении. Подробно излагается классификация СКВ с отделением влаги на высоком давлении. В заключение описаны принципиальная схема и особенности конструкции СКВ самолёта Ту-204, особенности её численного моделирования, а также приводится описание специфики её работы на влажном воздухе.

УДК 629.7.048(075.8)

ISBN 978-5-7782-3172-6

© Дьяченко Ю.В., Чичиндаев А.В., 2002, 2017
© Новосибирский государственный
технический университет, 2002, 2017

ВВЕДЕНИЕ

В середине 70-х годов в США началась разработка нового поколения систем кондиционирования воздуха (СКВ) для пассажирских самолётов. При их проектировании были решены несколько крупных инженерных и чисто экономических проблем. С экономической точки зрения данные СКВ позволили: 1) снизить в два раза отбор воздуха от компрессора двигателя на нужды СКВ; 2) расширить область применения СКВ на субтропический влажный климат; 3) повысить экономичность и комфортность условий для пассажиров. С технической точки зрения данные СКВ имели следующие новшества: 1) переход на отделение влаги в линию высокого давления; 2) внедрение экономически более эффективно трёхколёсного ТХ с газовыми опорами; 3) вторичное использование салонного воздуха за счёт рециркуляции. Перечисленный комплекс достоинств позволил перейти к переоснащению зарубежных самолётов фирмы Боинг и западно-европейской Аэробас на более конкурентоспособные СКВ. Среди отечественных фирм к внедрению СКВ с отделением влаги на высоком давлении в середине 80-х годов перешла фирма АНТК им. Туполева. С этой целью на вновь проектируемое семейство самолётов Ту-204, Ту-214, Ту-334 были спроектированы СКВ нового поколения. Конкретной разработкой агрегатов, узлов и всей системы в целом занималась фирма НПО «Наука». Решение некоторых частных проблем СКВ, связанных с тепломассообменом влажного воздуха в элементах СКВ, фирма «Наука» в виде субподряда (хоздоговорных исследований и работ) поручала Отраслевой лаборатории охлаждающих систем (ОНИЛОС) НЭТИ. Наиболее значимые из них были: 1) модельное экспериментальное исследование работоспособности СКВ; 2) разработка модели для численного исследования работоспособности СКВ; 3) исследование и разработка незамерзающей конструкции теплообменника-конденсатора; 4) разработка высокоэффективного ВОВД.

Целью работы является изложение идеологии СКВ с отделением влаги на высоком давлении, технической её реализации для самолета

Ту-204, а также некоторых проведённых в ОНИИОС результатов исследований, имеющих практическое значение.

В первом разделе работы даётся общее представление об основных проблемах при работе СКВ на влажном воздухе: при конденсации на низком и высоком давлении. Второй раздел работы посвящён подробному изложению исторической и технической классификация СКВ с отделением влаги в линии высокого давления. В третьем разделе описаны принципиальная схема и особенности конструкции СКВ самолёта Ту-204. В четвёртом разделе даны особенности её численного моделирования, а также приводится описание специфики её работы на влажном воздухе.

Работа выполнена при финансовой поддержке в форме гранта Министерства образования Российской Федерации по направлению «Фундаментальные исследования в области технических наук» (шифр гранта ТОО-1.2-260 и проекта № А0050 Федеральной целевой программы «Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки»).

1. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОМАССОБМЕНА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА В СКВ

1.1. ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА В СКВ

ПРОБЛЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА В СКВ

Влажный воздух в СКВ. Охлаждение влажного воздуха в СКВ приводит к тому, что в некотором «сечении» СКВ достигается состояние «точки росы», когда влага переходит из парообразного состояния в жидкое. Местоположение «точки росы» по тракту СКВ зависит от структуры СКВ, режима её работы, а также от параметров заборного воздуха. Наиболее часто встречаются следующие два местоположения процесса конденсации. В простейших СКВ открытого типа (ВВР + ТХ) переход состояния «точки росы» происходит в проточной части турбохолодильника и часто называется конденсацией в линии низкого давления. В СКВ нового поколения типа «петля» (ВВР + ТХ + ВВР), а также в комбинированных СКВ, состояние «точки росы» достигается до ТХ в каналах теплообменника и по аналогии называется конденсацией в линии высокого давления. Необходимо также подчеркнуть, что в целом ряде случаев в СКВ могут присутствовать оба процесса конденсации одновременно. В частности, в комбинированных СКВ и «петлях» оставшийся после конденсации на высоком давлении водяной пар приводит к дополнительной конденсации влаги в турбохолодильнике за счет дальнейшего охлаждения влажного воздуха. Уникальной особенностью СКВ типа «петля» является тот факт, что используемый в них конденсатор связан с обоими процессами; в то время как в его «горячем» тракте протекает конденсация на высоком давлении, по холодному тракту движется трехфазный поток с отрицательной температурой, образующийся в ТХ в результате конденсации на низком давлении. Если также учесть, что часть теплообменной по-

верхности конденсатора может иметь отрицательную температуру, то легко убедиться в сложном сочетании тепломассообменных процессов, происходящих в СКВ при работе на влажном воздухе.

Многолетние исследования в данной области позволили сформулировать следующие теплофизические проблемы и задачи, без решения которых невозможно разработать надёжные и высокоэффективные СКВ.

Основные проблемы охлаждения влажного воздуха при конденсации на низком давлении (КНД). Для технической реализации задач конденсации влажного воздуха в ТХ и последующего отделения сконденсировавшейся влаги необходимо решить следующие научно-технические проблемы:

- исследовать особенности и механизмы конденсации водяного пара в проточной части ТХ;
- исследовать особенности гидродинамики водных аэрозольных частиц;
- разработать принципы и устройства для коагуляции водного аэрозоля;
- спроектировать надёжные конструкции влагоотделителей, способные отделить водный аэрозоль, образующийся в ТХ при КНД.

Основные проблемы охлаждения влажного воздуха при конденсации на высоком давлении (КВД). Для технической реализации задач конденсации влажного воздуха до ТХ и последующего отделения сконденсировавшейся влаги необходимо решить следующие научно-технические проблемы:

- исследовать особенности и механизмы конденсации водяного пара при высоком давлении воздуха в теплообменных каналах конденсатора (горячий тракт);
- спроектировать надёжные конструкции влагоотделителей, способные нейтрализовать капельную влагу при высоком давлении воздуха, образующуюся в конденсаторе при КВД;
- исследовать особенности работы ТХ на влажном воздухе в области отрицательных температур;
- изучить состав и особенности гидродинамики многофазной среды за ТХ при КНД;
- исследовать особенности и механизмы испарения водных аэрозольных частиц в теплообменных каналах конденсатора (холодный тракт);

- изучить особенности обледенения входных кромок теплообменных каналов конденсатора;
- разработать принципы и устройства для противообледенительной защиты конденсатора;
- разработать принципы и устройства для противообледенительной защиты проточной части СКВ за ТХ.

Таким образом, техническая реализация принципов КНД и КВД ставит множество специфических научно-технических проблем, связанных с особенностями тепломассообмена в элементах СКВ при работе на влажном воздухе.

НАПРАВЛЕНИЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА В СКВ

Отраслевая научно-исследовательская лаборатория охлаждающих систем (ОНИЛОС МАП). Научно-исследовательская лаборатория охлаждающих систем (НИЛОС) возникла в середине 60-х годов по инициативе зав. кафедрой Теоретические основы теплотехники НЭТИ А.Н. Хозе для выполнения специализированных задач в рамках научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы (НИОКР) ряда авиационных фирм. В основу специализации НИЛОС легли проблемы работы агрегатов и систем кондиционирования воздуха в условиях влажного воздуха. В конце 70-х годов при расширении авиационного производства и разработке перспективных образцов систем жизнеобеспечения усилиями А.Н. Хозе она была преобразована в отраслевую научно-исследовательскую лабораторию охлаждающих систем Министерства авиационной промышленности. Одновременно на базе научного и педагогического коллектива ОНИЛОС в Новосибирском электротехническом институте была открыта 1976 году специальность «Системы жизнеобеспечения и оборудования ЛА». Впоследствии в 1984 году была создана выпускающая кафедра «Механическое оборудование ЛА» (МОЛА), которая в 1998 году была переименована в кафедру «Техническая теплофизика» (ТТФ) Новосибирского государственного технического университета (НГТУ). При этом можно выделить следующие этапы в развитии и становлении ОНИЛОС – МОЛА – ТТФ.

Первый этап (60-е начало 70-х годов). Лаборатория участвовала по заказам фирмы «Наука» в решении задачи воздушно-испарительного теплообменника для высотных полетов. На крейсерских эшелонах выше 10 км плотность воздуха более чем в 5 раз ниже наземной, что приводит к многократному снижению эффективности работы тепло-

обменников СКВ. Второй группой задач были воздушно-испарительные охладители для снятия пиковых тепловых нагрузок при работе в «горячей» атмосфере. При наземной работе СКВ в зонах жаркого климата (маловысотных полетах крылатых ракет) температура охлаждающего воздуха системы кондиционирования резко повышается до 40...60 °С, что создаёт дискомфортные условия экипажу и пассажирам либо нарушает режим охлаждения бортовой радиоэлектроники. Введение в систему кондиционирования дополнительных блоков с воздушно-испарительным охлаждением позволяло удовлетворительно решить обе проблемы.

Второй этап (70-е – более половины 80-х годов). В основу задач данного этапа легла проблема перехода самолётов на маловысотные полёты. В частности, для преодоления системы ПВО начали применять специальный режим полета самолета с резким снижением высоты от крейсерской до 50 ... 100 метров. При этом наблюдалось заполнение кабины самолета мелким туманом. Первоначально проблему пытались решить с помощью установки в систему специального влагоотделителя низкого давления, осуществляющего захват тумана и его удаления из системы кондиционирования. Внешне простую задачу удалось решить только в результате многолетних опытно-конструкторских работ, так как мелкодисперсный туман практически не улавливался обычными инерционными уловителями. Постепенно удалось поднять эффективность отделения влаги с 30 до 60 %, а последние образцы позволяли достигать 95 % эффективности работы. Добиться такого результата удалось за счет выполнения ряда глубоких исследований в области статистического исследования диаметров частиц аэрозоля, гидродинамики аэрозольных частиц, гидродинамики обтекания сеточных фильтров, гидродинамики проточной части влагоотделителей.

Другим направлением работы явились увлажнители воздуха для высотных полетов. При длительных полетах (более 6 часов) на больших высотах в условиях пониженной влажности происходит высыхание слизистых оболочек организма (глаза и рот), препятствующих нормальной работе летчиков. В лаборатории велась разработка индивидуальных и кабинных увлажнителей воздуха.

Третий этап (80-е годы). Связан с переходом основных мировых фирм на системы кондиционирования воздуха с отделением влаги на высоком давлении. В частности, для самолета ТУ-204 фирма «Наука» начала разрабатывать новую систему кондиционирования типа «петля»,

во-первых, более экономичную, во-вторых, позволяющую работать самолетам в сухом и влажном климате (данными системами начали оснащаться в то время самолеты Боинг-767, А-300). Отличительные черты схемы: наличие специального трехколесного турбохолодильника, наличие специальной подсистемы «петля»: специальной подсистемы кондиционирования, осуществляющей отделение влаги в условиях влажного климата. В результате отраслевого разделения труда в ОНИЛОС-МОЛА проводился комплекс работ по данной проблеме, состоящий:

- в проведении экспериментального исследования работы подсистемы «петля» на влажном воздухе;
- численном моделировании работы системы кондиционирования ТУ-204 для исследования её работоспособности на влажном воздухе;
- оптимизации конструкции конденсатора с целью предотвращения его обмерзания;
- разработке влагоотделителей высокого давления.
- При решении данных задач был выполнен комплекс научно-исследовательских работ, посвященный исследованию:
 - структуры аэрозольного тумана за ТХ при отрицательных температурах;
 - конденсации влаги на высоком давлении;
 - испарения водного аэрозоля в теплообменных каналах;
 - особенностям обмерзания элементов оборудования, устанавливаемых на выходе ТХ.

Четвёртый этап (90-е годы). В связи с прекращением финансирования НИОКР основная направленность работ была связана с решением поисковых исследовательских задач в рамках научной и учебной работы. При этом решались следующие задачи: 1) разработка воздушно-испарительных систем охлаждения для самолетов малой авиации, вертолетов и автомобилей; 2) численное моделирование и исследование траектории полета катапультного кресла; 3) исследование работы и оптимизация первичного теплообменника СКВ; 4) оптимизация систем кондиционирования при работе на влажном воздухе; 5) численное моделирование и исследование работы системы терморегуляции, кровеносной системы (биофизические задачи) при воздействии на них внешних физических факторов; 6) численное моделирование и изучение распределения высотных физических факторов (ионизирующего и неионизирующего излучений); 7) термодинамический анализ циклов воздушно-холодильных машин для авиационных СКВ.

1.2. ВЫСАЖДЕНИЕ ВЛАГИ В ЛИНИИ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

ОСОБЕННОСТИ КОНДЕНСАЦИИ НА НИЗКОМ ДАВЛЕНИИ

Недостатки КНД. Практически до конца 60-х годов не возникало проблем, связанных с конденсацией влаги в тракте СКВ, поскольку большую часть времени полета самолет находился на высоте более 5 км, где влага в воздухе практически отсутствует. Переход к длительным полетам на малой высоте и в условиях повышенной влажности привёл к подаче на вход СКВ влажного воздуха с влагосодержанием от 5 до 40 граммов на килограмм воздуха. В результате на последней ступени охлаждения СКВ (в турбохолодильнике) заметную часть времени полёта происходит конденсация на низком давлении (КНД). Если же быть более точным, турбохолодильник работает в режиме генератора мелкодисперсного тумана, выбрасываемого далее из СКВ в кондиционируемый объект. При этом наблюдаются следующие недостатки:

- при подаче тумана в кабину летчика происходит ухудшение видимости (туман непрозрачный), увлажнение остекления и поверхностей. Этот недостаток наиболее очевиден на примере противоракетного маневра самолета: при его резком пикировании кабина начинает наполняться туманом;
- при подаче тумана в отсеки с радиоэлектронным оборудованием может произойти выход его из строя;
- при подаче тумана в подкостюмное пространство происходит переувлажнение и ухудшение условий работы летчика.

Особенности КНД. Особенности конденсации водяного пара в проточной части турбохолодильника можно проследить на схеме рис. 1.1, *а, б*. По мере ускорения газа в сопловой решетке I происходит резкое снижение термодинамической температуры потока. Если воздух сухой, процесс конденсации будет отсутствовать, и температура потока в активной турбине достигнет своего минимума на срезе сопла (линия 4, сечение *б*), оставаясь на рабочих лопатках II практически неизменной. Для реактивной турбины (линия 5) за счет частичного расширения и ускорения потока на рабочих лопатках минимальная температура достигается только на срезе рабочих лопаток.

Сечение «точки росы». В случае подачи влажного воздуха на ТХ картина резко изменяется. При движении газа между сопловыми лопатками активной турбины наступает момент (линия *б*, сечение *а*),

когда термодинамическая температура потока достигает значения «точки росы». Дальнейшее расширение и охлаждение газа приводит к тому, что практически все отводимое тепло расходуется на процесс конденсации. В результате термодинамическая температура (линия б) снижается лишь незначительно. В реактивной турбине (линия 7), где на сопловых лопатках отвод тепла осуществляется менее интенсивно, сечение «точки росы» (начала конденсации) а смещается далее по ходу потока. Кроме того, процесс конденсации водяного пара «спускается» ниже по сечению и начинает протекать на вращающихся рабочих лопатках.

Механизм гомогенной конденсации. В связи с тем, что максимальная скорость потока газа наблюдается в ядре потока, там же находится и минимальная температура газа. Одновременный отвод тепла по всему сечению потока приводит к тому, что в проточной части ТХ наблюдается явление *гомогенной* конденсации: каплеобразование происходит в ядре потока на частицах пыли, взвешенных в нём. В результате образуются аэрозольные частицы (рис. 1.1, цифра 2) диаметром 0,5...1,5 мкм. При этом дальнейшего роста диаметра частиц по мере охлаждения не происходит – вся избыточная влага расходуется на образование новых частиц и увеличение их концентрации.

Механизм аэродинамического дробления (диспергирования). Если на входе в турбину уже имеется сконденсировавшаяся влага, она образует жидкую пленку или ручейки 1, выстилающие поверхность сопловой решетки. Достигнув кромки решетки (сечение б), пленка отрывается и дробится на мелкие капли, которые дополнительно разбиваются вращающимися рабочими лопатками на ещё более мелкие частицы. В итоге образуются относительно крупные аэрозольные частицы диаметром 5...15 мкм.

Таким образом, в самом общем случае на выходе турбохолодильника имеются взвешенные аэрозольные частицы в диапазоне диамет-

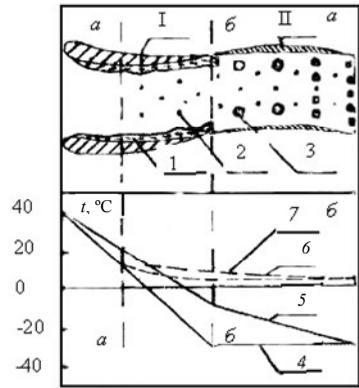


Рис. 1.1. Схема процесса конденсации в проточной части турбохолодильника:

а – кинетика процесса; б – эпюры температур; I – сопловые лопатки; II – рабочие лопатки; 1 – плёнка жидкости; 2 – мелкодисперсный аэрозоль; 3 – крупнодисперсный аэрозоль; 4, б – активная турбина; 5, 7 – реактивная турбина

ров 0,5...15 мкм, представляющие собой синеватый туман. Белый атмосферный туман образован частицами больших размеров – более 50 мкм. В отличие от атмосферного тумана аэрозольные частицы (образованные ТХ) практически не оседают на любых препятствиях, так как они обладают незначительной инерцией и практически «вморожены» в несущую среду.

Особенности КНД при отрицательных температурах. При снижении температуры несущей среды ниже нуля градусов процессы тепломассообмена усложняются, так как наряду с «точкой росы» появляется «точка кристаллизации» влаги. Причём частицы гомогенного аэрозольного тумана не замерзают до температур $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и остаются в переохлаждённом состоянии. Лишь при дальнейшем снижении температур наблюдается «постепенная» «кристаллизация» аэрозоля, «завершающаяся» при $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако наибольшие изменения и проблемы связаны с механизмом аэродинамического дробления влаги, сконденсировавшейся до ТХ. «Точка кристаллизации» любой крупнодисперсной влаги (плёнок воды и капель более 100 мкм) начинается сразу за $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а диапазон существования «переохлаждённого» состояния в сравнении с аэрозольным – незначителен. При этом происходит качественный скачок: ТХ из «генератора тумана» превращается в «генератор снега». Переохлаждённые и замерзающие плёнки жидкости за счёт высокочастотной вибрации и шума не успевают примёрзнуть к сопловым лопаткам и преобразуются в снежно-ледяную «шугу», выбрасываемую турбиной ТХ. Причём снежинки и ледяные частицы обладают существенными инерционными силами и при малейшем гидродинамическом возмущении «отделяются» от несущей среды и «выпадают» на рабочие элементы или в зоны «затенения» потока. Последнее явление приводит к тому, что в проточной части за ТХ образуются «снежные заносы», перекрывающие поперечное сечение для несущей среды. В случае конденсатора – его входной фронт забивается снегом, в случае элементов автоматики (заслонки, датчики и т. п.) – они «заносятся» снежной массой. Наиболее опасны случаи, когда температуры поверхности элементов СКВ имеют отрицательные значения, – при этом происходит дополнительные процессы их «обледенения».

ПОДСИСТЕМА ВЫСАЖДЕНИЯ ВЛАГИ НА НИЗКОМ ДАВЛЕНИИ

Состав элементов и требования к ним. Подсистема высаждения влаги на низком давлении представляет из себя систему из ТХ, влагоотделителя низкого давления и элементов автоматики для борьбы с обмерзанием. К подсистеме предъявляются следующие требования:

– общетехнические требования к теплообменным аппаратам СКВ (малый вес и габариты, небольшое гидравлическое сопротивление и т. п.);

– высокая эффективность влагоотделения, не менее 90 % в условиях туманообразования;

– высокая надёжность, соизмеримая с надёжностью остальных агрегатов СКВ;

– работоспособность с точки зрения обмерзания при кратковременных «забросах» температуры в область отрицательных температур.

Особенности работы. СКВ данного типа имеют «обычные» (для схем простейшего открытого цикла – ТА + ТХ) параметры воздуха по своему тракту. Температура воздуха до ТХ находится в диапазоне 70...100 °С и давление 0,4...0,7 МПа. За турбиной ТХ поддерживается температура воздуха не менее + 5 °С для предотвращения обмерзания проточной части и агрегатов подсистемы высаждения влаги. Регулирование температуры за турбиной осуществляется путём подмеса «горячего» воздуха, отбираемого в СКВ от компрессора силовой установки в поток перед ТХ. Однако при резких изменениях режима полёта или режима работы силовой установки возможны кратковременные понижения температуры до отрицательных значений. Это явление особенно опасно для туманопоглотителя ВОНД: в нём происходит кристаллизация капельной влаги, «обледенение» коагулирующего элемента, перекрытие сечения воздуха СКВ за ТХ, повышение давления за турбиной и механическое разрушение коагулятора. Для предотвращения таких явлений в конструкции необходимо предусматривать незамерзающие перепускные клапаны, обеспечивающие перепуск воздуха при повышенном давлении за турбиной.

Процесс КНД имеет негативное воздействие на экономическую эффективность СКВ, так как приводит к уменьшению её холодопроизводительности: теплота фазового перехода при конденсации выделяется в поток охлаждаемого воздуха и увеличивает его температуру по сравнению с работой на сухом воздухе. В худшем случае при этом сконденсированная влага (полезная работа ВОНД) сбрасывается за

борт самолёт. В лучшем случае потери холодопроизводительности частично «компенсируются» за счёт испарения собранной в ВОНД влаги в продувочном воздухе первичного теплообменника. Но эта влага отбирается от линии низкого давления («кабинного» давления), поэтому для её диспергирования и впрыска через форсунки необходимо использовать подкачивающий насос или эжектировать с помощью воздуха высокого давления.

1.3. ВЫСАЖДЕНИЕ ВЛАГИ В ЛИНИИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

ОСОБЕННОСТИ КОНДЕНСАЦИИ НА ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ

Недостатки КВД. Конденсация в линии высокого давления (КВД) происходит в тех случаях, когда «точка росы» смещается на более ранние ступени охлаждения, чем ТХ. В комбинированных СКВ этого добиваются путём общего снижения температуры воздуха высокого давления (ВВД), а в «петлях» – дополнительным охлаждением ВВД в конденсаторе. Общие недостатки КВД вытекают из того, что жидкость поступает в проточную часть ТХ и вызывает следующие последствия:

- воздействие жидкости на стенки проточной части приводит к эрозии сопловых и рабочих лопаток ТХ;

- попадание жидкости в систему смазки подшипников приводит к эмульгированию масла, резкому ухудшению его свойств и уменьшению ресурса;

- присутствие жидкости до ТХ является как бы катализатором процесса льдо- и снегообразования в ТХ. В этом случае на ряде температурных режимов кроме аэрозольного тумана на выходе ТХ образуется снежно-ледяная шуга, которая забивает все участки «затенения» потока и все стоящие за ТХ агрегаты.

Особенности КВД. Процесс КВД происходит в теплообменных каналах компактных теплообменников при высоком давлении воздуха (0,3...0,7 МПа). В результате существенно изменяется механизм процессов конденсации.

Механизм гетерогенной конденсации. Особенности конденсации водяного пара в каналах теплообменника можно проследить на рис. 1.2, где приведены все возможные фазы этого процесса. При движении газа по теплообменному каналу отсутствует процесс расширения газа и его

давление остается практически постоянным. Охлаждение воздуха происходит за счет отвода тепла от стенок канала. В этом случае самую холодную температуру имеют пристенные слои газа, а самую высокую температуру – ядро потока. В результате в некотором сечении *a*, где температура потока достигла значения «точки росы», на стенке начинают образовываться мелкие капельки жидкости. Под воздействием скоростного напора они перемещаются по направлению потока газа, постепенно увеличиваясь за счет конденсации дополнительных порций водяного пара.

После того как аэродинамические силы воздействия на каплю превысят силы поверхностного натяжения, капли начинают образовывать отдельные ручейки 2. В случае глубокого охлаждения (температура ядра потока существенно ниже «точки росы») и наличия большого количества влаги жидкость может образовывать «островки» или сплошную плёнку 3. Ввиду малого диаметра теплообменных каналов как ручейки, так и пленка могут смыкаться и образовывать небольшие водяные пробки,двигающиеся со скоростью несущей среды. После достижения ручейком, пленкой или водяной пробкой среза канала происходит их разрушение: пробка разбивается на относительно крупные капли, а ручейки и пленка срываються со стенок в виде более мелких капель. В итоге за выходным фронтом теплообменника образуется широкий спектр капель, превышающих диаметр 50 мкм.

Частицы такого диаметра обладают большой инерционностью: при ускорении потока они значительно отстают от него, а при торможении, наоборот, опережают его. В результате в местах «затенения» потока они выпадают на поверхность и могут скапливаться в виде «лужиц». Если этого не учитывать при задании пространственной ориентации трубопроводов за теплообменником, можно получить в некоторых ме-

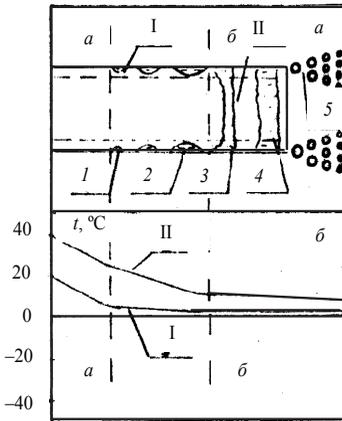


Рис. 1.2. Схема процесса конденсации в канале теплообменника:

a – кинетика процесса; *б* – эпюры температур; I – пограничный слой; II – ядро потока; 1 – капля; 2 – одиночный ручеек, 3 – сплошная пленка; 4 – водяная пробка; 5 – капельная «завеса»

стах «отстойники». В них происходит скопление жидкости, которая не может быть вынесена скоростным напором несущей среды. Наличие описанных выше эффектов наиболее опасно в тех случаях, когда температура стенок каналов может снижаться ниже нуля градусов. Это при длительной работе может привести к постепенному замерзанию жидкости со всеми вытекающими отсюда последствиями.

ПОДСИСТЕМА ВЫСАЖДЕНИЯ ВЛАГИ НА ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ

Состав элементов. Подсистема высаждения влаги на высоком давлении представляет из себя систему из теплообменника-конденсатора, влагоотделителя высокого давления (ВОВД), ТХ и элементов автоматики для борьбы с обмерзанием. В ряде СКВ для повышения эффективности работы схемы за ВОВД устанавливается дополнительный теплообменник-регенератор (рис. 1.3).

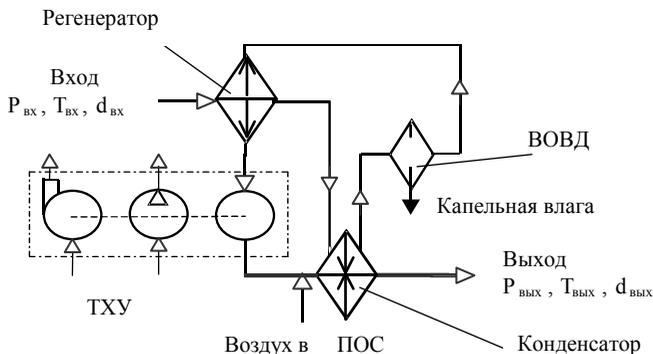


Рис. 1.3. Подсистема высаждения влаги на высоком давлении

Особенности работы. Линия воздуха высокого давления (ВВД). Воздух поступает в подсистему после охлаждения в предварительных ступенях и сжатия в компрессоре турбохолодильной установки. В *регенераторе* происходит предварительное охлаждение входящего воздуха. Второй ступенью охлаждения является *конденсатор*, который продувается «холодным» потоком воздуха из турбины ТХ. В процессе охлаждения температура ВВД снижается до «точки росы» и происходит конденсация паровой влаги в каналах конденсатора. Сконденсированная паровая влага в виде крупных капель выбрасывается из него во

влажнотделитель. ВОВД отделяет капельную влагу из потока и направляет её в поток продувочного воздуха первичного теплообменника. Осушенный ВВД поступает в теплообменник-регенератор, где происходит его подогрев «входящим» в подсистему свежим горячим воздухом. Далее осушенный и подогретый ВВД подаётся на турбину ТХ.

Линия воздуха низкого давления (ВНД). В процессе адиабатного расширения в турбине температура и давление воздуха резко падают. На выходе турбины образуется воздух с отрицательной температурой и взвешенным в нём переохлажденным водным аэрозолем. Образованный двухфазный поток поступает в холодный тракт конденсатора. При его нагреве происходит повышение температуры ВНД и испарение капель аэрозоля. За конденсатором на выходе из подсистемы высаживания образуется ВНД с рабочей температурой $-8... -10$ °С с частично или даже полностью испарённым аэрозолем.

Физической основой работы подсистемы является использование «холода» потока ВНД (за турбиной ТХ) для охлаждения потока ВВД (до турбины ТХ) до температуры ниже «точки росы». Для реализации этого процесса и используется конденсатор, осуществляющий отбор «холода» из линии низкого давления на конденсацию. Функция регенератора состоит в переброске (заимствовании) «тепла» из более «горячей» точки линии ВВД в сечение СКВ за ВОВД для подогрева и доиспарения остатков влаги.

Особенности подсистемы высаживания влаги на высоком давлении. Состояние «точки росы» при КВД. Особенностью термодинамики влажного воздуха является то, что количество паровой влаги в состоянии насыщения зависит от давления. Причём, чем выше давление до турбины (при одинаковой температуре), тем меньше паровой влаги остаётся в потоке воздуха. Температура, до которой охлаждается ВВД, ограничена возможностью кристаллизации капельной влаги при температурах ниже 0 °С. С учётом «забросов» при изменении режимов работы СКВ реально эта температура поддерживается на уровне $+5...+10$ °С. Именно эти значения определяют предельные возможности осушки воздуха данным методом. В частности, при величине абсолютного давления в подсистеме до ТХ на уровне $P_{ВВД} = 4$ ата, количество оставшейся в потоке ВВД паровой влаги составит $d = 3$ г/кг с. в. Учитывая, что при работе на влажном воздухе исходное влагосодержание может достигать в тропических условиях значений $d_{ВХ} = 30$ г/кг с. в.

и более, можно считать, что степень осушки подсистемы высаждения достаточно высокая.

Снижение температуры в ТХ. По сравнению с обычной схемой СКВ наличие подсистемы высаждения влаги на линии высокого давления снижает рабочие температуры на турбине ТХ со значений 70...100 °С до уровня 5...40 °С. Как следствие, происходит существенное снижение температуры на выходе турбины ТХ в область отрицательных температур. Реально, при работе на влажном воздухе она может составлять примерно –28... –30 °С, а при работе на сухом воздухе – до –50 °С. Такое различие выходных температур обусловлено потерей холодопроизводительности СКВ при работе на влажном воздухе.

Снижение холодопроизводительности СКВ. Величина потери холодопроизводительности определяется долей теплоты на конденсацию паровой влаги в конденсаторе, которая выделяется в поток ВВД и «повышает» его температуру. Следует отметить, что этот эффект может быть значительным, так как оценивая соотношение удельной теплоты парообразования воды (теплоты конденсации) и удельной теплоёмкости воздуха, можно заключить, что конденсация 1 грамма воды повышает температуру 1 кг воздуха на 2,5 °С. Для уменьшения потерь холодопроизводительности от конденсации капельная влага, собранная в ВОВД, впрыскивается в тракт продувочного воздуха первичного ВВР. Испарение этой влаги понижает температуру продувочного воздуха и позволяет частично компенсировать потери холодопроизводительности СКВ.

Проблема обмерзания конденсатора. Наличие достаточно низких отрицательных температур воздуха за турбиной и сконденсированной в аэрозоль остаточной паровой влаги значительно осложняет физические условия работы «холодного» тракта теплообменника-конденсатора. Основной опасностью является обмерзание фронта теплообменника, что приводит к повышению давления за турбиной и выходу системы на нерасчётные режимы работы. Для предотвращения этих явлений при повышении давления за ТХ до определённого предела на вход «холодного» тракта вдувается горячий воздух, отбираемый с линии высокого давления. Это позволяет повысить температуру ВВД до положительных температур и произвести «оттаивание» теплообменной поверхности. Эта система называется противообледенительной (ПОС) и служит в качестве аварийной, так как в штатных режимах работы обмерзание не должно происходить.

1.4. ОСНОВНЫЕ АГРЕГАТЫ ПОДСИСТЕМЫ ВЫСАЖДЕНИЯ ВЛАГИ

Теплообменник-конденсатор. К конденсатору предъявляются следующие требования:

– общетехнические требования к теплообменным аппаратам СКВ (малый вес и габариты, небольшое гидравлическое сопротивление и т. п.);

– относительно небольшая тепловая эффективность;

– отсутствие обмерзания и забивание снегом «холодного» тракта в условиях отрицательных температур потока ВВД и содержания в нём переохлаждённой жидкой капельной влаги (тумана) и снега;

– в «горячем» тракте должны быть обеспечены условия для протекания процессов тепломассообмена при конденсации влаги из влажного воздуха и вынос капельной влаги из тракта;

– «холодный» тракт должен соединяться с выходом турбины ТХ напрямую, без дополнительных соединений и поворотов для предотвращения их обмерзания.

Выполнить все эти требования с помощью типовой конструкции компактного теплообменного аппарата и интегральных осреднённых методик расчёта очевидно невозможно. Гарантированная работоспособность теплообменника-конденсатора с точки зрения обмерзания может быть обеспечена только в том случае, если на наиболее тяжёлых расчётных режимах область поверхности теплообмена с минимальной температурой будет иметь температуру не менее +5 °С. Причём эта величина положительного запаса требует ещё дополнительной экспериментальной проверки. Расчёт локальных температур поверхности и всего пространственного поля температур возможен только численными методами с помощью специализированных программ расчёта и комплексной оптимизации теплообменника-конденсатора.

Конструктивно конденсатор должен иметь в «холодном» тракте перепускной канал, который гарантирует частичную работоспособность СКВ даже в условиях обмерзания фронта теплообменника. Один из возможных вариантов конструкции конденсатора показан на рис. 1.4. «Холодный» поток проходит через две теплообменные секции и перепускной канал, образованный стенками секций. Перепускной канал имеет сужение к выходу, что создаёт дополнительный эжекционный эффект, улучшающий процесс уноса снега и образующегося льда с фронтальной поверхности теплообменных секций в условиях

обмерзания. В выходном патрубке «холодного» тракта за теплообменными секциями создаются «тёплые» зоны с положительной температурой, в которые может коммутироваться поток рециркуляционного воздуха без опасности обмерзания подводящих патрубков. Данная конструкция показала хорошую работоспособность с точки зрения обмерзания в стендовых испытаниях.

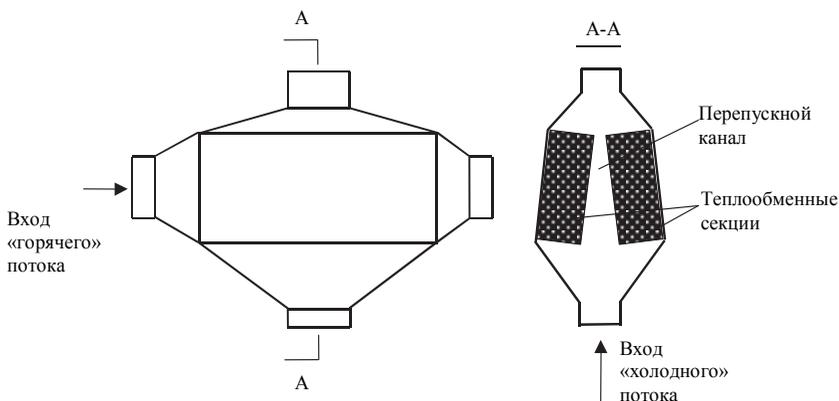


Рис. 1.4. Конструкция теплообменника-конденсатора с перепускным каналом

Теплообменник-регенератор предназначен для регенерации «холода» на линию высокого давления. К нему предъявляются следующие требования:

- общетехнические требования к теплообменным аппаратам СКВ (малый вес и габариты, небольшое гидравлическое сопротивление и т. п.);

- регенератор должен быть рассчитан не только на тепловые, но и массообменные процессы: в «горячем» тракте при повышенной влажности возможна дополнительная конденсация водяных паров; в «холодном» тракте должно происходить доиспарение остаточной капельной влаги, пропущенной ВОВД.

Конструктивно регенератор может быть выполнен как обычный компактный теплообменник.

Влагоотделитель высокого давления (ВОВД). *Назначение ВОВД.* Влагоотделитель высокого давления предназначен для выделения капельной влаги из потока воздуха за теплообменником-конденсатором. К ВОВД предъявляются следующие требования:

- общетехнические требования к агрегатам СКВ (малый вес и габариты, небольшое гидравлическое сопротивление и т. п.);
- высокий коэффициент влагоотделения (отношение выделяемой из потока капельной влаги к массе капельной влаги на входе ВОВД);
- высокую надёжность, соизмеримую с другими агрегатами СКВ.

Схема и особенности работы ВОВД. Один из возможных вариантов принципиальной схемы ВОВД показан на рис. 1.5. *Закручивающее устройство и сепарационный канал.* Газ, содержащий капельную влагу, входит через патрубок 1. В камере 2 он проходит через щель 14 тангенциального завихрителя, выполненную в стенке сепарационного канала 4. Таким образом, газокapельная смесь приобретает вихревое (вращательное) движение и поступает во внутренний сепарационный канал 4. Капельная влага и пыль под действием центробежной силы оседают на стенке сепарационного канала.

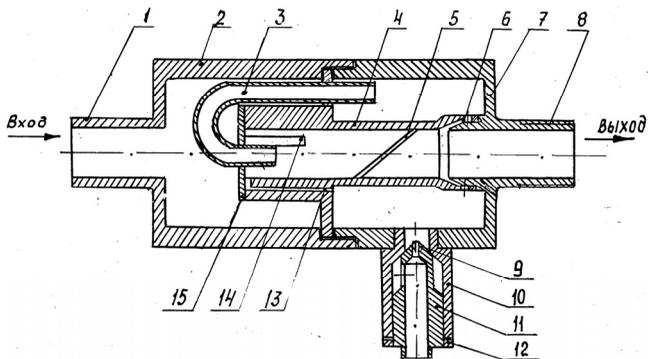


Рис. 1.5. Схема ВОВД:

- 1 – штуцер входа; 2 – корпус камеры завихрителя; 3 – трубка рециркуляционная; 4 – завихритель; 5 – щелевая ловушка; 6 – кольцевая ловушка; 7 – корпус сепарационной камеры; 8 – штуцер выхода; 9 – калиброванное отверстие; 10 – корпус канала слива; 11 – штуцер слива; 12 – контргайка; 13 – канал сброса; 14 – щель завихрителя; 15 – заглушка

Осадительная камера. Двигающаяся плёнка жидкости через каналы 5 щелевой ловушки отводится в объём сепарационной камеры, образуемый внутренним объёмом корпуса 7. При повышенном содержании влаги возможен частичный «проскок» жидкости через щелевые ловушки 5, поэтому эта жидкость улавливается кольцевой ловушкой 6

и также сбрасывается в объём сепарационной камеры. Очищенный воздух через патрубок 8 поступает в магистраль.

Система рециркуляции. Заглушка 15 закрывает торцевую часть завихрителя, поэтому в этой части завихрителя возникает зона разрежения и жидкость частично скапливается в ней. Отвод этой жидкости в сепарационную камеру осуществляется через канал сброса 13. Для улучшения отвода жидкости через ловушки создаётся спутный поток воздуха за счёт рециркуляции. Последняя осуществляется с помощью рециркуляционной трубки 3. Короткий конец рециркуляционной трубки входит через заглушку 15 в осевую зону закрученного потока сепарационного канала, где создаётся разрежение. Длинный конец рециркуляционной трубки вводится в объём сепарационной камеры. Таким образом, создаётся внутренняя рециркуляция воздуха в ВОВД: из сепарационного канала в виде спутного потока воздух проникает через щели ловушек 5 в объём сепарационной камеры, далее в длинный конец рециркуляционной трубки и по ней возвращается в осевую зону закрученного потока через короткий конец. Чтобы исключить возможность захвата жидкости воздухом в сепарационной камере, длинный конец рециркуляционной трубки расположен в верхней части объёма камеры, а слив собранной жидкости осуществляется в нижней части через систему слива жидкости 9, 10, 11, 12.

Система слива жидкости. Собранная в сепарационной камере жидкость отводится через калиброванное отверстие 9 штуцера слива 11. Штуцер слива ввернут в корпус 10. При полном вворачивании штуцера его верхняя конусная часть упирается в конус корпуса, обеспечивая отвод жидкости спутного потока воздуха только через калиброванное отверстие 9.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ СКВ С ОТДЕЛЕНИЕМ ВЛАГИ НА ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ

В настоящем разделе содержится анализ СКВ, в которых применено отделение влаги на линии высокого давления, начиная от самых первых и заканчивая установленными на современных пассажирских самолетах. В обзор вошли патенты США и Великобритании, опубликованные в 70-х и 80-х годах, а также СКВ самолетов Боинг-757, А-310, ТУ-204. Для удобства сравнения все схемы СКВ представлены в стандартных обозначениях ЕСКД.

Основные особенности СКВ с отделением (высаждением) влаги на высоком давлении (ВВВД или ОВВД). Перед тем как перейти к характеристикам конкретных схем СКВ с ОВВД, необходимо выделить пришедшие этим схемам общие особенности.

Первая особенность – охлаждение воздуха перед ТХ до температуры ниже точки росы. При этом можно отметить несколько способов охлаждения. Наибольшее распространение из них получило охлаждение воздуха в теплообменнике-конденсаторе холодным воздухом, выходящим из ТХ. Однако имеются и другие способы: как с использованием конденсатора, например за счет продувки воздухом, выбрасываемым из гермокабины, так и без него (за счет охлаждения в основном теплообменнике в комбинированных СКВ).

Вторая особенность – степень высаждения влаги, определяемая температурой воздуха перед турбиной ТХ. В зависимости от назначения и конкретной реализации схем можно выделить две группы СКВ: системы с полным высаждением влаги при температуре за конденсатором, близкой к нулю, и системы с неполным высаждением влаги при температуре $\sim 20...30$ °С.

Третья особенность – фазовое состояние влаги за влагоотделителем высокого давления (ВОВД). В случае непосредственной подачи

воздуха после ВОВД на турбину (схема с однократной регенерацией), за счет неполного отделения влаги влагоотделителем на вход в турбину поступает капельная влага, что приводит к ряду нежелательных последствий. В схемах с подогревом (двукратная регенерация) оставшаяся капельная влага испаряется, и на вход в турбину поступает воздух при $\varphi < 1$.

Т а б л и ц а 2.1

Классификация СКВ по способам высаждения влаги на линии высокого давления

Схема СКВ, номер патента		Способ охлаждения ВВД	Степень высаждения влаги до ТХ	Состояние влаги до ТХ	Способы борьбы с обмерзанием в линии за ТХ
С однократной регенерацией	Схема Келлера №3587243	Воздухом из ТХ	Полная	Не доиспаряется	Нет
	Схема Фернандеса №3623332	Воздухом из ТХ	Неполная		Нет
	Схема Жилеса №1583143	Воздухом из ТХ Эжектором			Обогрев ТХ, подмес кабинного воздуха
	Схема Пейна №4334411	Воздухом из гермокабины			Рециркуляция кабинного воздуха
	Схема Ранненберга №4374469	Воздухом из ТХ			Рециркуляция кабинного воздуха
Комбинированные СКВ № 4021212, № 1565981		Забортным воздухом	Неполная	Частичное доиспарение	Подмес ВВД
С двукратной регенерацией	Схема Кэмпбелла №4198830	Воздухом из ТХ	Неполная	Полное доиспарение	Нет
	Схема Кинселла № 4352273	Частью воздуха из ТХ			Конденсатор с обводной линией и обогревом стенок

Четвертая особенность – наличие средств борьбы с обледенением. Несмотря на их большое многообразие, можно выделить три группы противообледенительных средств по функциональным назначениям: средства, направленные на создание незамерзающей конструкции ТХ; противообледенительные средства конденсатора; средства, ис-

ключающие возможность образования льда в воздухоотводящих каналах за турбиной, а также агрегатах автоматики, расположенных в этих каналах.

В зависимости от назначения и варианта схем для создания противообледенительных систем используются следующие способы. Самый простейший – подмес горячего воздуха на выходе из ТХ, в том числе и подмес кабинного воздуха. К более сложным относится создание специальных противообледенительных каналов, обводящих холодный воздух при замерзании агрегатов. Используется также принцип воздушного обогрева частей конструкции, на которых возможно образование льда и снега.

Характеристики СКВ с ОВВД приведены в обзоре в соответствии с вышеуказанными особенностями (см. табл. 2.1). В результате любую схему можно описать как различные сочетания из этих четырех факторов. Это позволяет сравнить все применённые технические решения и выбрать приемлемую для данного технического задания схему СКВ.

2.1. «ПЕТЛИ» С ОДНОКРАТНОЙ РЕГЕНЕРАЦИЕЙ

Общие свойства СКВ. Главной особенностью СКВ этой группы является присутствие в системе перед ТХ теплообменника, в котором воздух высокого давления (ВВД) охлаждается воздухом из турбохолодильника. Этот теплообменник и выполняет функцию конденсатора. Из рассмотрения механизма охлаждения ВВД следует, что данный процесс является процессом передачи тепла из одной части системы с высокой удельной энергией в другую – с низкой удельной энергией. Такой процесс переноса энергии называется регенерацией тепла. Он незначительно меняет холодопроизводительность системы в целом, но перераспределяет тепло в границах схемы. Согласно этому все приведенные схемы с отделением влаги по своему механизму могут быть охарактеризованы как системы с высаждением влаги на линии высокого давления с регенерацией тепла на линию низкого давления. В дальнейшем эти схемы, для краткости, будут называться «петлями» (по внешнему виду) с однократной регенерацией. В американской и английской патентной литературе для обозначения указанного способа отделения влаги часто используется термин «*shoestring*», дословно не переводимый, но имеющий тот же смысл.

Функциональные различия СКВ. В приведенных в настоящем разделе схемах можно выделить несколько способов отделения влаги

по их функциональным отличиям. **Во-первых**, по типу продувки конденсатора можно отметить три различных варианта. Наибольшее распространение получила схема с полной регенерацией, когда конденсатор продувается всем воздухом, выбрасываемым из ТХ (схема Келлера, Фернандеса, Ранненберга). Вторым способом продувки конденсатора является эжектирование части воздуха, отбираемого за ТХ (схема Жилеса). Третьим вариантом продувки конденсатора является рециркуляция кабинного воздуха перед его выбросом в атмосферу (схема Пэйна). Последний способ обеспечивает достаточное охлаждение воздуха высокого давления для выделения влаги и позволяет утилизировать использованный в гермокабине воздух. **Во-вторых**, по степени высаждения влаги в данной группе встречаются схемы как с полным отделением влаги (схема Келлера), так и неполным (все остальные). **В-третьих**, в предложенных схемах можно выделить два способа борьбы с обмерзанием элементов СКВ за ТХ. Первый, простейший способ – подмес горячего воздуха на выход турбины ТХ (схема Фернандеса). Второй способ – подмес на выход турбины воздуха из гермокабины. Этот вид рециркуляции, кроме необходимого подогрева воздуха, обеспечивает улучшенную вентиляцию гермокабины (схемы Жилеса, Пэйна Ранненберга).

Отдельно необходимо отметить средства борьбы с обледенением самой турбины ТХ и её выходного патрубка. Такое средство представлено лишь в одном патенте (схема Жилеса), где предложен обогрев стенок выходной части турбины либо воздухом, поступающим в турбину, либо горячим воздухом, взятым из системы до конденсатора.

Схема Келлера (патент США № 3587243, 1971 г., рис. 2.1). В этом патенте впервые предлагается способ и система с высаждением влаги на линии высокого давления с использованием в качестве охладителя воздуха, выходящего из ТХ. Основным назначением предлагаемой СКВ является снабжение блоков радиоэлектронного оборудования самолетов сухим воздухом при наземном их обслуживании.

При расширении влажного воздуха на турбине ТХ образуется мелкодисперсный туман. Это приводит к необходимости осуществить сначала коагуляции влаги, а лишь потом её отделение. Однако несмотря на особую конструкцию применяемых в данном случае влагоотделителей, они обеспечивают неполное отделение влаги, в результате чего большое количество её поступает на охлаждаемую электронную аппаратуру, что является нежелательным. В связи с этим в рассматриваемом патенте (рис. 2.1) предложено поддерживать температуру пе-

ред влагоотделителем высокого давления устанавливаемого до ТХ, в пределах $-1,7^{\circ}\text{C}$ для достижения полного отделения влаги, а также с целью исключения замерзания конденсатора 12 и ВОВД 13. Необходимо также отметить, что в системе отсутствуют средства борьбы с обледенением турбины конденсатора и выводящих трубопровода, так как схема рассчитана на практически полное отделение влаги до турбины. Возникающие при этом в схеме низкие отрицательные температуры на выходе ТХ предлагается компенсировать подогревом в теплообменнике 15, в который подается часть ВВД.

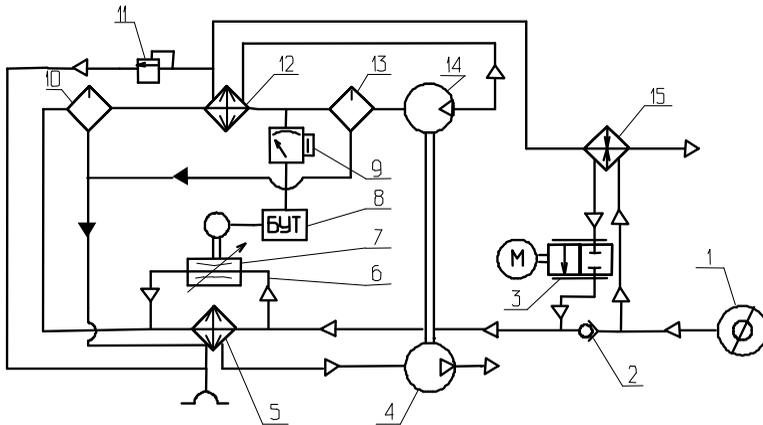


Рис. 2.1. Патент США № 3587243, 1971 г.:

1 – отбор ВВД; 2 – обратный клапан; 3 – заслонка; 4 – вентилятор ТХ; 5 – основной ТО; 6 – обводная линия ТО; 7 – заслонка; 8 – блок управления температурой; 9 – датчик температуры; 10 – влагоотделитель; 11 – предохранительный клапан; 12 – конденсатор; 13 – влагоотделитель; 14 – турбина; 15 – подогревающий ТО

Схема Фернандеса (патент США № 3623332, 1971 г.). Данная схема относится к схемам с частичным высаждением влаги на линии высокого давления. Схема позволяет получать относительно сухой воздух высокого давления для работы пневмоавтоматики самолета. Она тоже дает возможность получать относительно сухой воздух низкого давления для подачи в кабины и отсеки самолета на земле при отключенном двигателе на обогрев либо охлаждение салонов.

Для этого в системе (рис. 2.2) предусмотрено отделение влаги на линии как высокого, так и низкого давления. Используемый в системе

трубопровода за ТХ. Кроме того, данная СКВ допускает дискретное регулирование холодопроизводительности системы с помощью многопозиционного и многоходового крана.

В соответствии с этим в схеме (рис. 2.3) предложены:

- продувка конденсатора 4 частью воздуха, отбираемого за ТХ с помощью эжектора 9;
- обогрев стенок выходной части турбины 8 за счет обдува их снаружи воздухом, поступающим на сопла турбины;
- регулирование температуры воздуха (холодопроизводительности) в системе с помощью многопозиционного крана 6.

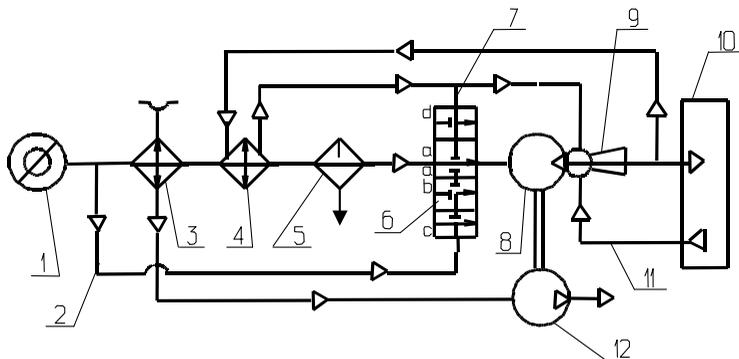


Рис. 2.3. Патент Англии № 1583143, 1981 г.:

1 – отбор ВВД; 2 – обводная линия горячего воздуха; 3 – предварительный теплообменник; 4 – конденсатор; 5 – влагоотделитель; 6 – четырехпозиционный четырехходовой кран; 7 – обводная линия; 8 – турбина; 9 – встроенный эжектор; 10 – гермокабина; 11 – рециркуляционная линия cabinного воздуха; 12 – вентилятор ТХ

Рассматриваемая схема характеризуется неполным отделением влаги на линии высокого давления. В патенте предлагается еще один вариант компоновки системы. Вторая схема реализует идею обогрева выходной части турбины более горячим воздухом из узла отбора 1.

Схема Пэйна (патент США № 4334411, 1982 г.). В патенте предлагается схема ВВД, отличающаяся от схемы типа «петля» охлаждением конденсатора с помощью cabinного воздуха и подмесом к воздуху на выходе из ТХ воздуха из отсеков самолета. В патенте отмечается, что при работе СКВ на влажном воздухе возникает опасность обледенения воздухопроводящих каналов СКВ при отрицательных темпера-

турах за ТХ. Поэтому необходимо поддерживать температуру воздуха за турбиной положительной (1,7...2,8 °С).

С этой целью в несколько ранее опубликованных патентах предлагается подмес на выход турбины горячего воздуха высокого давления, что позволило за счет эквивалентного добавления горячего воздуха поддерживать температуру смешения на заданном уровне (~2 °С). Однако такой способ регулирования температуры приводит к неоправданному снижению холодопроизводительности системы в целом. Рассматриваемая схема предназначена для достижения максимально возможной холодопроизводительности системы при минимально возможном расходе воздуха и для обеспечения отделения влаги из воздуха, а также для улучшения вентиляции кабины и салонов.

В патенте (рис. 2.4) предполагается:

- использовать для продувки конденсатора 4abinный воздух, что обеспечивает требуемое понижение температуры и степень отделения влаги перед ТХ;

- эжектировать 4abinный воздух в линию за ТХ, что позволяет поддерживать нужную температуру воздуха за турбиной ~2°С при минимальном влиянии на холодопроизводительность системы в целом.

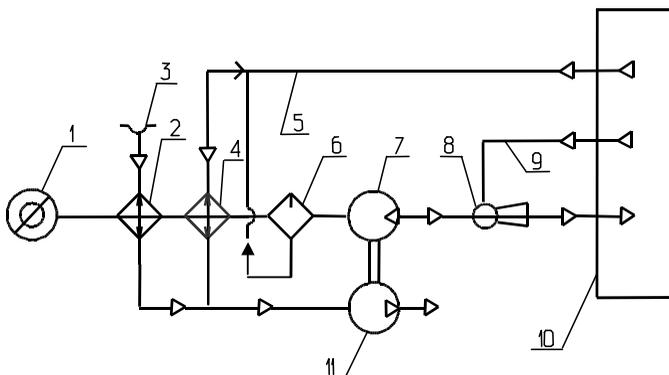


Рис 2.4. Патент США № 4334411, 1982 г.:

1 – отбор ВВД; 2 – предварительный теплообменник; 3 – заборник продувочного воздуха; 4 – конденсатор; 5 – линия продувочного воздуха конденсатора; 6 – влагоотделитель; 7 – турбина ТХ; 8 – эжектор; 9 – линия эжектируемого воздуха; 10 – гермокабина; 11 – вентилятор

Схема Ранненберга (патент США № 4374469, 1983 г.). В этом патенте предлагается СКВ типа «петля» с однократной регенерацией и

регулируемой холодопроизводительностью. Изменение холодопроизводительности системы поставлено в зависимость от режима работы двигателей самолета, от которого осуществляется отбор воздуха для СКВ.

Изменение режимов полета самолета приводит к существенному изменению режимов работы двигателя: например, на взлете через него проходит наибольшее количество воздуха, в то время как при посадке расход воздуха через двигатель минимальный. Столь сильное изменение режимов работы приводит к существенным изменениям расхода на выходе СКВ. Однако на выходе из системы необходимо поддерживать одинаковые параметры воздуха, что приводит к необходимости регулировать расход воздуха через СКВ без ущерба для холодопроизводительности.

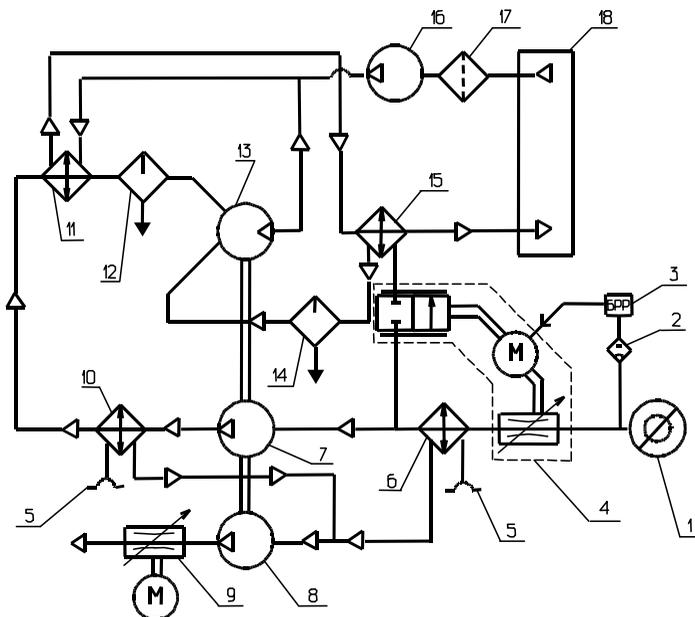


Рис. 2.5. Патент США № 4374469 1983 г.:

1 – отбор ВВД; 2 – датчик расходов; 3 – блок регулирования расходов; 4 – блок заслонок; 5 – воздухозаборник; 6 – первичный теплообменник; 7 – компрессор; 8 – вентилятор ТХ; 9 – заслонка регулирования расхода продувочного воздуха; 10 – вторичный теплообменник; 11 – основной конденсатор; 12 – влагоотделитель; 13 – турбина ТХ; 14 – влагоотделитель; 15 – вторичный конденсатор; 16 – вентилятор линии рециркуляции; 17 – фильтр; 18 – гермокабина

В описании патента изложены четыре ранее предложенных схемы СКВ, в которых для регулирования расхода через систему предлагается использовать:

- ТХ с регулируемым сопловыми аппаратами;
- ТХ с регулируемым сопловыми аппаратами и регулируемым углом поворота лопаток компрессора;
- подмес горячего воздуха на выход турбины;
- дополнительный турбонагреватель для увеличения давления на входе в турбину.

Предложенная в патенте схема (рис. 2.5) предназначена для создания улучшенной СКВ с изменяемым расходом и холодопроизводительностью при меньшем числе агрегатов и отличается от петли с однократной регенерацией:

- организацией подачи по обводной линии на второй вход турбины для увеличения холодопроизводительности системы на режимах с малым расходом воздуха через систему;
- регулированием расходов через обе линии с помощью блока заслонок 4 в зависимости от показаний датчика расхода 2.

С целью растапливания снега в воздухе, выбрасываемом из турбины ТХ, предложена линия рециркуляции кабина воздуха с вентилятором 16, служащей противообледенительной линией.

Как и во всех предыдущих патентах, в рассмотренной схеме воздух подается на вход в турбину без подогрева, т. е. с капельной влагой.

2.2. КОМБИНИРОВАННЫЕ СКВ

Общие свойства. Данные схемы отличаются отсутствием конденсатора, охлаждаемого холодным воздухом, выходящим из ТХ. Характерной чертой этих схем является подача на определенных режимах полета, чаще всего крейсерских, воздуха из кабины на вход компрессора ТХ, работающего по схеме с «наддувом». За счет невысокой температуры кабина воздуха на входе в компрессор температура воздуха на выходе из него оказывается значительно ниже ее значения при подаче воздуха от компрессора двигателя. При высокой эффективности основного теплообменника, стоящего за компрессором ТХ, это приводит к получению достаточно низких температур воздуха перед турбиной, способствующих частичному отделению влаги на линии высокого давления.

Указанная особенность, типичная для схем с ВОВД, позволила отнести нижеприведенные патенты к данному обзору. Кроме того, за счет смещения на входе в турбину воздуха, охлажденного в основном теплообменнике до температура «точки росы», с более нагретым воздухом, подаваемым по обводной линии на второй вход ТХ, в системах данной группы создаются условия для частичного испарения капельной влаги за ВОВД.

Схема Розенбуша (патент США № 4021215, 1977 г.). Патент является усовершенствованием СКВ, предложенной Ранненбергом в 1969 г. (патент США № 3428212). В этом патенте была предложена схема СКВ, которая, объединяя достоинства схемы с «наддувом» и простого типа, могла работать на воздухе высокого и низкого давления, однако была достаточно сложна. Поэтому появилась необходимость в создании единой системы комбинированного типа, состоящей из наименьшего числа элементов.

Предложенная схема позволяет работать как на высоком давлении отбора (~ 0,35 МПа), так и при его уменьшении до 0,175 МПа (при полете со снижением или работе двигателей на малом газе) без изменения холодопроизводительности.

Схема (рис. 2.6) предусматривает:

- использование турбины с двумя независимыми входами и создание дополнительной обводной линии δ воздуха высокого давления, используемой в режиме рециркуляции;
- подвод кабинного воздуха на выход компрессора ТХ;
- использование клапана ρ для изменения режимов работы СКВ;
- поддержание заданной температуры на выходе из системы с помощью блока заслонок ζ и клапана λ противообледенительной линии.

Схема Пьеррепонта (патент Англии № 1565981, 1980 г.). В данной комбинированной СКВ реализуется два варианта схем, соответствующих системе с «наддувом» и системе с рециркуляцией кабинного воздуха. Система использует идею частичного высаживания влаги на линии высокого давления без специального конденсатора за счет более глубокого охлаждения воздуха в теплообменнике за компрессором ТХ.

Основное назначение предложенной комбинированной СКВ – уменьшение отбора воздуха от двигателя самолета или вспомогательной силовой установки (ВСУ) за счет рециркуляции кабинного воздуха (кратность рециркуляции до 50 %).

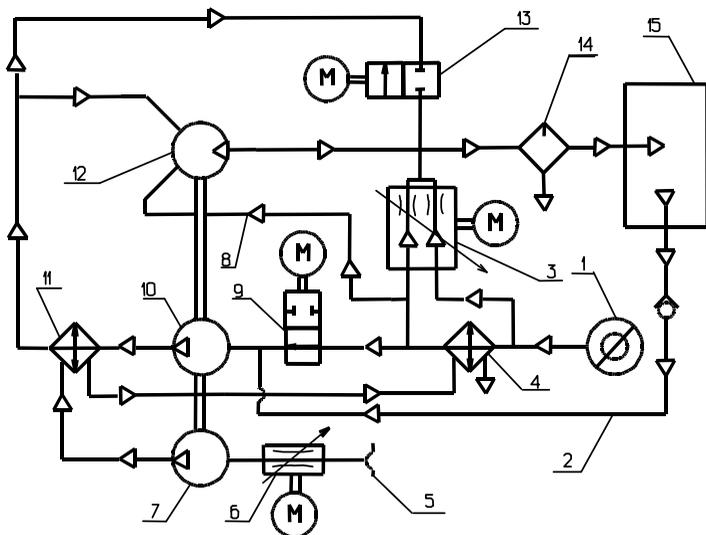


Рис. 2.6. Патент США № 4021215, 1977 г.:

1 – отбор ВВД; 2 – линия рециркуляции с обратным клапаном; 3 – блок заслонок перепуска; 4 – первичный теплообменник; 6 – регулятор расхода линии продувки; 7 – вентилятор ТХ; 8 – линия обвода компрессора; 9 – заслонка обводной линии; 10 – компрессор ТХ; 11 – вторичный теплообменник; 12 – турбина ТХ; 13 – заслонка противообледенительной линии; 14 – влагоотделитель; 15 – гермокабина

- В отличие от СКВ Розенбуша в схеме (рис. 2.7) предусмотрены:
- блок заслонок 6 и 8 для изменения режимов работы системы;
 - ВОВД 17 для частичного отделения влаги на линии высокого давления;
 - противообледенительная линия с клапаном 19, подводящая воздух из компрессора 9 на вход турбины 20 для поддержания температуры за ТХ выше точки замерзания.

Анализ схемы показывает, что высаживание влаги до ТХ происходит в основном на режиме с рециркуляцией, когда на вход компрессора 9 поступает воздух из гермокабины, имеющий значительно более низкую температуру, чем воздух, взятый от двигателя. При этом отделение влаги ВОВД производится лишь в той части воздуха, которая поступает на компрессор ТХ 9 по линии рециркуляции из гермокабины. За счет последующего смешения на входе в турбину 20 этого частично осушенного воздуха с более горячим воздухом, поступающим

по обводной линии 10, происходит испарение части капельной влаги, оставшейся за ВОВД 17.

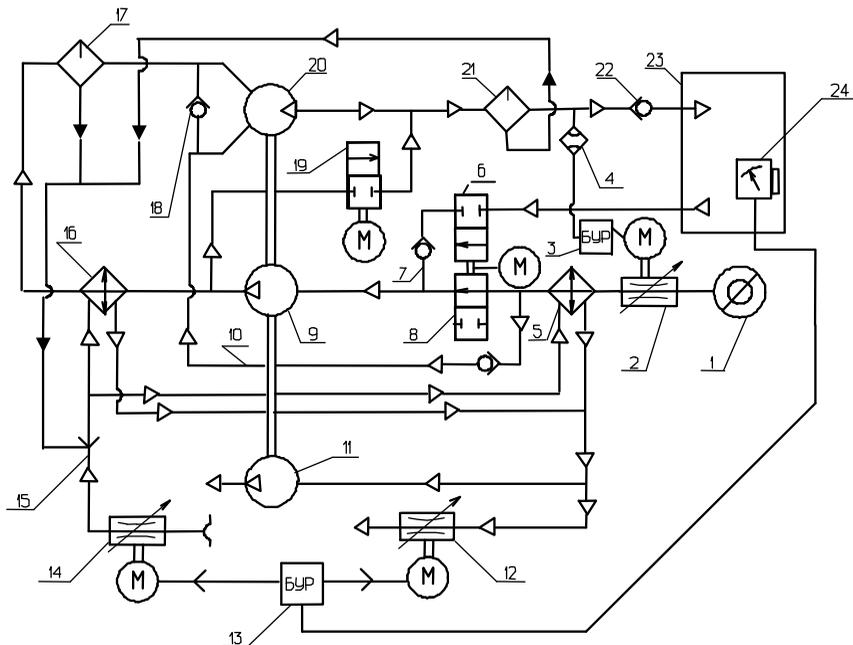


Рис. 2.7. Патент Англии № 1565981, 1980 г.:

1 – отбор ВВД; 2 – заслонка; 3 – блок управления расходом; 4 – датчик расхода; 5 – первичный ТО; 6 – кран линии рециркуляции; 7 – обратный клапан; 8 – кран основной линии; 9 – компрессор ТХ; 10 – линия перепуска; 11 – вентилятор ТХ; 12 – выходной регулятор расхода линии продувки; 13 – блок управления расходом линии продувки; 15 – впрыск влаги в линию продувки; 16 – вторичный ТО; 17 – влагоотделитель; 18 – обратный клапан; 19 – противообледенительная линия; 20 – турбина ТХ; 21 – влагоотделитель; 22 – обратный клапан; 23 – гермокабина; 24 – датчик температуры воздуха в гермокабине

2.3. «ПЕТЛИ» С ДВУКРАТНОЙ РЕГЕНЕРАЦИЕЙ

Общие свойства. Рассматриваемые здесь схемы СКВ являются логическим продолжением развития схем ВВД; для них характерно использование дополнительного теплообменника – регенератора для нагрева воздуха после ВОВД и испарения оставшейся капельной влаги.

Нагрев ВВД в регенераторе осуществляется более горячим воздухом высокого давления. В схемах, отнесенных к этому разделу, происходят два процесса передачи тепла из одной части системы в другую. В первом случае это происходит в конденсаторе, а во втором – в регенераторе. Поэтому схемы данного типа можно охарактеризовать как системы высаждения влаги на линии высокого давления с двукратной регенерацией тепла или, коротко, как «петли» с двукратной регенерацией.

В связи с неполным отделением влаги в схемах предусмотрены меры борьбы с обледенением конденсатора. Наиболее интересной и простой является идея, предложенная в схеме Кинселла, заключающаяся во введении обводной линии конденсатора, позволяющей последнему «самооттаиваться» без применения искусственных приемов и автоматики.

Схема Кэмпбелла (патент США № 4198830, 1978 г.). В патенте впервые предлагается конструкция СКВ типа «петля» с двукратной регенерацией и анализируются её преимущества в сравнении с существующими схемами однократной регенерацией. При работе СКВ с ВВД первого поколения обнаружено два обстоятельства, осложняющих работу системы. Во-первых, для получения высокой степени отделения влаги до турбины необходимы низкие температуры воздуха (+5...+20 °С), приводящие к образованию на выходе турбины достаточно низких отрицательных температур. Во-вторых, несмотря на существование высокоэффективных ВОВД, в потоке до турбины остается небольшое количество капельной влаги, что приводит к эрозии лопаток турбины и резкому возрастанию процесса снегообразования.

В связи с этим в вышеуказанном патенте (рис. 2.8) предложено:

– установить перед турбиной 7 теплообменник-регенератор 6 для подогрева воздуха, в котором происходит также доиспарение капельной влаги, оставшейся в потоке после влагоотделителя 5;

– использовать в качестве теплоносителя для горячей линии регенератора 6 воздух, выходящий из компрессора 2, что позволяет кроме нагрева воздуха перед ТХ, осуществить дополнительное охлаждение воздуха перед конденсатором.

Предложенный вариант обогрева регенератора является оптимальным, однако в патенте указывается, что его можно осуществить также другими способами. В рассматриваемой схеме регенератор подобран таким образом, что температура за ТХ положительна (~ 4,5 °С), в связи с чем в схеме отсутствуют противообледенительные средства.

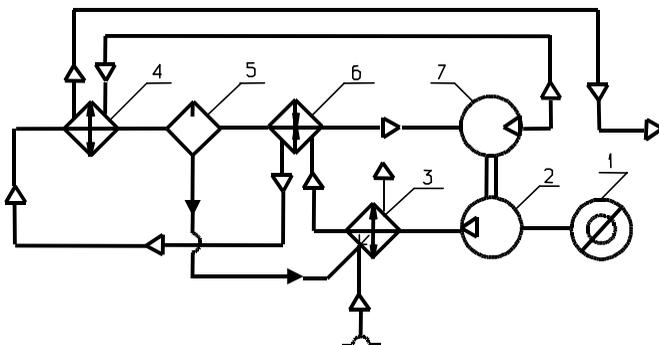


Рис. 2.8. Патент США № 4198830, 1978 г.:

1 – отбор ВВД; 2 – компрессор ТХ; 3 – основной теплообменник;
4 – конденсатор; 5 – влагоотделитель; 6 – регенератор; 7 – турбина ТХ

Таким образом, в схеме Кэмпбелла регенератор используется не столько для испарения влаги, сколько для нагрева воздуха до температур, при которых на выходе ТХ поддерживается положительная температура. Тем самым подогрев воздуха переносится с линии низкого давления на линию высокого давления, а также исключается образование льда и снега за ТХ.

Схема Кинселла (Патент США № 4352273, 1982 г.). Предлагаемая в патенте схема является усовершенствованием петли Кэмпбела с целью получения более экономичной СКВ в соответствии с жесткими требованиями к потреблению топлива самолетами. Все внесенные изменения носят чисто экономический характер и в основном не меняют существа схемы типа «петля» с двукратной регенерацией.

Известно, что в СКВ, работающих на влажных режимах, температура воздуха на выходе из системы должна поддерживаться около $+2...+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ для предотвращения обмерзания агрегатов системы (клапанов, влагоотделителей). В результате температурный перепад воздуха в гермокабине $\Delta t_{ГК} = t_{ГК\text{ вх}} - t_{ГК\text{ вых}}$ составлял в пассажирских самолетах $18...20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и потребный расход воздуха определялся этой величиной.

Главной идеей, заложенной в основу схемы Кинселла, является то, что снижение температуры воздуха на выходе из СКВ до $-8...-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ позволяет увеличить $\Delta t_{ГК}$ до $30...35\text{ }^{\circ}\text{C}$ и уменьшить потребный для охлаждения гермокабины расход воздуха на 40 %. Таким образом, за счет уменьшения температуры воздуха на выходе из СКВ можно зна-

чительно уменьшить долю воздуха, отбираемого от компрессора двигателя самолета.

Особое внимание в патенте обращено на разработку незамерзающей конструкции конденсатора для работы в таких условиях. В соответствии с этим в патенте (рис. 2.9) предлагается:

- создать обводную линию 14 по холодной линии конденсатора 9 для перепуска части охлажденного воздуха;
- использовать для обводной линии 14 центральную часть конденсатора 9, из которой убраны оребренные пакеты;
- обогреть передние кромки конденсатора 9, на которых возможно намерзание влаги, более горячим воздухом из точки 7, подаваемым по специальным каналам 10.

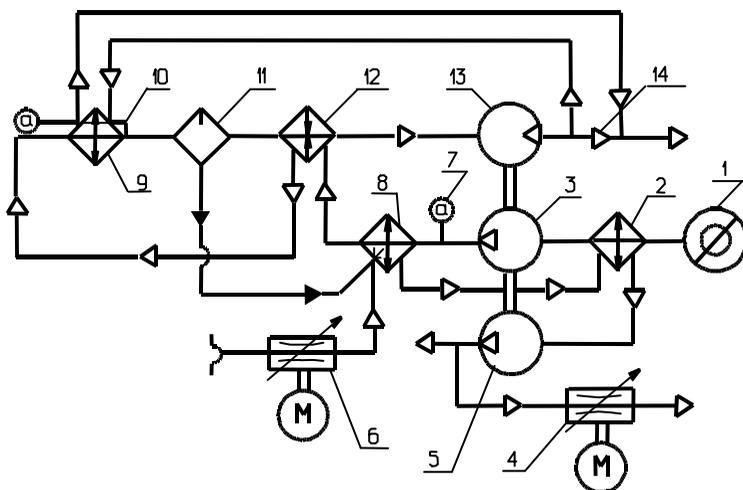


Рис. 2.9. Патент США 4352273, 1982 г.:

1 – отбор; 2 – первичный теплообменник; 3 – компрессор ТХ; 4, 6 – управляющие заслонки для регулирования продувочного воздуха; 5 – вентилятор ТХ; 7 – отбор воздуха на обогрев конденсатора; 8 – основной теплообменник; 9 – конденсатор; 10 – каналы обогрева конденсатора; 11 – влагоотделитель; 12 – регенератор; 13 – турбина ТХ; 14 – обводной канал конденсатора

Предлагаемая конструкция обводного канала исключает установку дополнительного трубопровода вокруг конденсатора, а сам канал имеет прямую форму без поворотов потока. Кроме того, за счет перераспределения воздуха на обводную линию при забивании конденсатора

снегом уменьшается количество воздуха, проходящего по оребренным каналам, что приводит к нагреву забитых льдом стенок и таянию намерзшей влаги.

Таким образом, в данной схеме основной целью регенератора является только доиспарение влаги в потоке воздуха перед ТХ, из чего необходимо исходить при выборе его размеров. Необходимо также отметить, что в рассматриваемом патенте вторично, как и в схеме Жилеса с эжектором, реализуется неполная регенерация тепла на линию низкого давления, для чего используется обводной канал конденсатора.

2.4. СРАВНЕНИЕ СКВ ПАССАЖИРСКИХ САМОЛЕТОВ

Борьба за дальнейшее совершенствование и повышение экономичности СКВ привела к появлению схем, в которых соединились достоинства, присущие комбинированным СКВ и петлям с двукратной регенерацией. Ниже описаны три варианта таких схем, полученных в разных странах: в США – на самолетах Боинг-757(767); ФРГ – Франция – на самолетах А-310, РФ (СССР) – на самолетах ТУ-204. По своей сути это описанная выше «петля» Кинселла, к которой добавлена рециркуляция кабинного воздуха, присущая комбинированным СКВ.

Общие свойства схем. Схемы имеют следующие общие черты:

- отделение влаги на линии высокого давления с использованием конденсатора (охлаждаемого воздухом из ТХ) и регенератора;
- применение 50 % рециркуляции кабинного воздуха;
- установка трехколесного турбохолодильника с газовыми опорами (подшипниками), используемого для дополнительного сжатия ВВД и принудительной продувки предварительного теплообменника;
- внедрение цифрового контроля и управления параметрами воздуха до тракта СКВ и в гермокабине с целью повышения экономичности СКВ за счет плавного регулирования холодопроизводительности.

Отличительные свойства схем: Отличаются схемы друг от друга по следующим признакам:

- выбору контрольных точек тракта СКВ в который регулируются параметры;
- выбору способа регулирования параметров, приводящего к применению различного сочетания обводных заслонок;
- средствам борьбы с обмерзанием турбохолодильника и конденсатора.

Особенности развития схем можно проследить и по хронологическому порядку времени их появления: первой была разработана схема Боинга-757 в начале 80-х годов, затем схема А-310 в середине 80-х, время появления схемы ТУ-204 откосится ко второй половине 80-х.

Схема СКВ самолета Боинг-757 (767). Настоящая схема является логическим развитием петли Кинселла и получена добавлением к ней рециркуляции кабинного воздуха. СКВ самолета Боинг-757 (767) (рис. 2.10) имеет следующие особенности:

- переключение в зависимости от высоты на низкую и высокую ступени отбора ВВД от компрессора двигателя;
- фиксированные параметры ВВД за узлом первичного охлаждения (не показан): температуру 193 °С, давление 0,31 МПа;

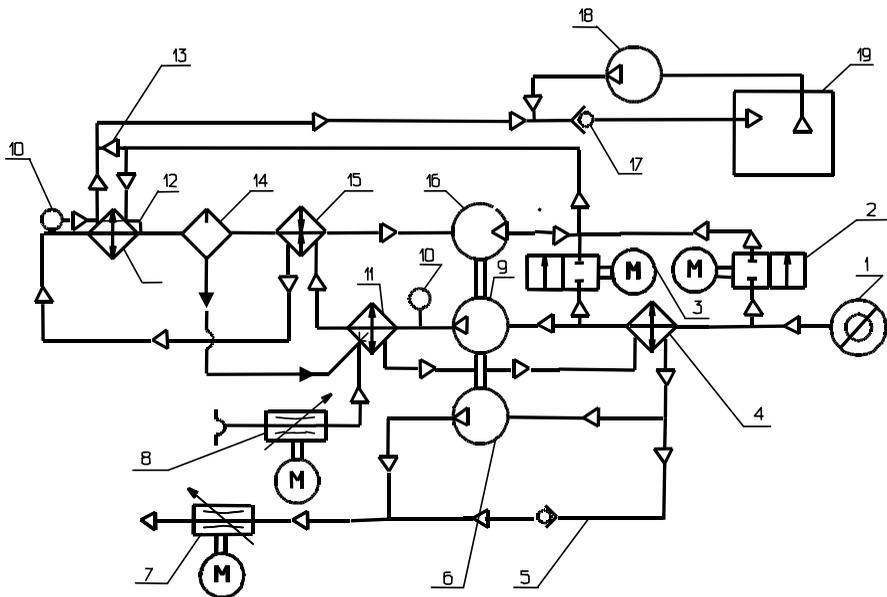


Рис. 2.10. СКВ самолета Боинг –757(767):

1 – отбор ВВД; 2 – клапан обводной линии; 3 – клапан регулирования температуры (КРТ); 4 – первичный теплообменник; 5 – обводная линия вентилятора; 6 – вентилятор TX; 7, 8 – заслонки для регулирования расхода продувочного воздуха; 9 – компрессор TX; 10 – отбор горячего воздуха для обогрева кромок конденсатора; 11 – основной теплообменник; 12 – каналы обогрева кромок конденсатора; 13 – обводной канал холодного тракта конденсатора; 14 – влагоотделитель; 15 – регенератор; 16 – турбина TX; 17 – обратный клапан ГК; 18 – вентилятор; 19 – ГК

– клапаны 2, 3 регулирования температуры, используемые для регулирования температуры за ТХ, подвода горячего воздуха в противообледенительных целях, а также для перепуска воздуха, минуя СКВ при полете на высоте;

– входную 7 и выходную 8 заслонки продувочного воздуха, регулирующие расход продувочного воздуха через теплообменники 4 и 11 в зависимости от температуры на выходе СКВ. На земле обе заслонки открыты, с подъемом на высоту постепенно перекрываются до полного закрытия. Вентилятор 6 для принудительной прокачки продувочного воздуха имеет обводной канал 5, позволяющий увеличить расход продувочного воздуха;

– конденсатор в противообледенительных целях имеет встроенный обводной канал 13, специальные обогревательные кромки, подмес горячего воздуха на вход теплообменника.

СКВ самолета Боинг-757 может работать в трех режимах.

1. Нормальный режим: заслонки продувочного воздуха 7, 8 открыты, клапан регулирования температуры (КРТ) 2 – закрыт, клапан 3 поддерживает на выходе СКВ температуру 4 °С.

2. Режим охлаждения: заслонки 7, 8 открыты, а КРТ 2, 3 закрыты, обеспечивая работу на максимальную холодопроизводительность. КРТ нормально закрыт и может только открываться для противообледенительных целей или защиты ТХ.

3. Режим обогрева: заслонки 7, 8 открыты, а КРТ 2, 3 открыты так, что охлаждение осуществляет только теплообменник.

Схема СКВ самолета А-310. За исключением противообледенительной системы для конденсатора, данная схема является почти полным повторением патента Кинселла (рис. 2.11).

Основными идеями схемы являются:

– поддержание температуры и давления за конденсатором на уровне 30 °С и 0,4 МПа для неполного отделения влаги с целью подачи в салон влажного воздуха;

– использование регенератора только для доиспарения капельной влаги на ВОВД, что позволяет получить небольшой по габаритам регенератор;

– в целях предотвращения обмерзания конденсатора поддержание температуры поверхности в любой ее точке выше нуля; создание линии подмеса горячего воздуха 3, срабатывающей при увеличении давления за ТХ, вызываемом обмерзанием фронта конденсатора.

Для этого предлагается (рис. 2.11):

– стабилизировать температуру за конденсатором с помощью автоматического регулирования расхода продувочного воздуха через первичный 6 и основной 12 теплообменники и подмеса горячего воздуха на выход ТХ с помощью клапана 5;

– управлять расходом в линии подмеса горячего воздуха 3 с помощью пневмоклапана 2, отслеживающего изменение давления за ТХ.

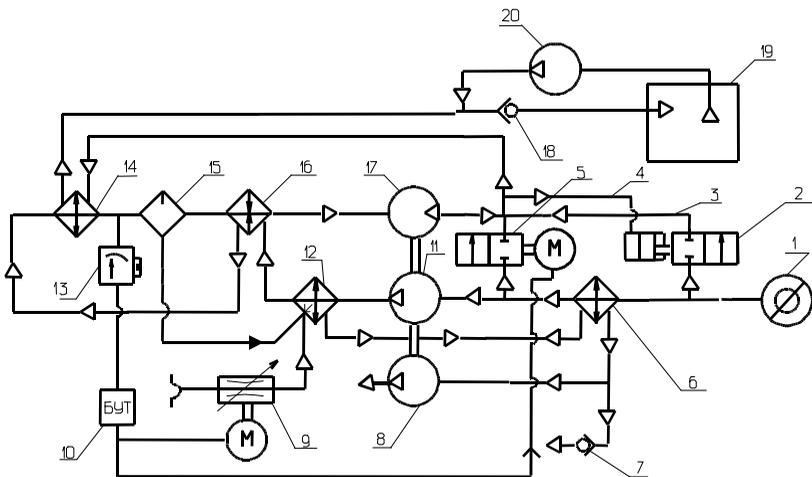


Рис. 2.11. СКВ Самолета А-310:

1 – отбор ВВД; 2 – клапан противообледенительной линии; 3 – противообледенительная линия; 4 – линия управления; 5 – клапан регулирования температуры; 6 – первичный теплообменник; 7 – обратный клапан; 8 – вентилятор ТХ; 9 – заслонка продувочной линии; 10 – блок управления температурой; 11 – компрессор ТХ; 12 – основной теплообменник; 13 – датчик температуры; 14 – конденсатор; 15 – влагоотделитель; 16 – регенератор; 17 – турбина ТХ; 18 – обратный клапан ГК; 19 – гермокабина; 20 – вентилятор линии рециркуляции

В схеме предложено использовать на выходе из СКВ обратный клапан 18 незамерзающей конструкции, подвижные части которого не находятся в потоке воздуха.

Схема СКВ самолета ТУ-204. Наиболее близка настоящая схема к СКВ самолета Боинг-757. Отличительными признаками схемы (рис. 2.12) являются:

– фиксированные параметры ВВД за узлом первичного охлаждения: температура 200 °С, давление 0.35 МПа;

– клапан 3 используется для регулирования температуры за ТХ, а также для поддержания заданного расхода в широком диапазоне давлений;

– входная заслонка продувочного воздуха 10 предназначена для поддержания температуры на входе в компрессор ТХ на уровне, не превышающем 160 °С;

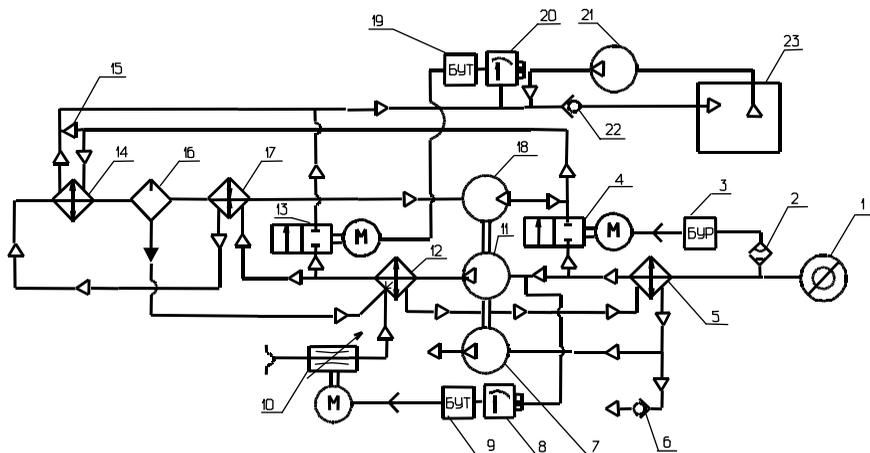


Рис. 2.12. СКВ самолета ТУ-204:

1 – отбор ВВД; 2 – датчик расхода; 3 – блок управления расходом; 4 – клапан обводной линии; 5 – первичный теплообменник; 6 – обратный клапан; 7 – вентилятор ТХ; 8 – датчик температуры; 9 – блок управления температурой; 10 – заслонка линии продувочного воздуха; 11 – компрессор ТХ; 12 – основной теплообменник; 13 – заслонка линии регулирования температуры; 14 – конденсатор; 15 – обводной канал конденсатора; 16 – влагоотделитель; 17 – регенератор; 18 – турбина ТХ; 19 – блок управление температурой; 20 – датчик температуры; 21 – вентилятор линии рециркуляции; 22 – обратный клапан ГК; 23 – ГК

– клапан 13 предназначен для регулирования температуры на выходе из СКВ в широком диапазоне температур: $-20...+60$ °С с помощью горячего воздуха, забираемого за вторичным теплообменником;

– борьба с обледенением конденсатора осуществляется с помощью обводного канала 15 и подмеса горячего воздуха на вход конденсатора через клапан 4.

ВЫВОДЫ

В последнее время получили широкое распространение СКВ с высаждением и отделением влаги на линии высокого давления. Настоящий обзор показал, что, несмотря на многообразие способов и методов ВВД, можно выделить всего четыре признака, характеризующих системы этого типа. К ним относятся:

- способ охлаждения воздуха высокого давления;
- степень отделения влаги (степень осушки воздуха);
- фазовое состояние влаги перед ТХ;
- противообледенительные средства системы.

На основании анализа патентов США и Великобритании по выделенным признакам среди всех рассмотренных схем СКВ можно отметить три основные группы использованных способов ОВД.

К первой относятся *«петли» с однократной регенерацией*. Достоинством этих схем являются простота и небольшие гидравлические потери на линии высокого давления. К недостаткам относятся необходимость в дополнительном подогреве воздуха на выходе системы и усложнение работы при неполном отделении влаги. Такие схемы целесообразно применять при полном отделении влаги, так как при этом исчезает необходимость в разработке противообледенительных мероприятий для ТХ.

Вторую группу образуют *комбинированные СКВ*. Указанные схемы позволяют экономно расходовать воздух СКВ за счет его повторного использования. К недостаткам относится использование кроме ОВД также и традиционного ВОИД. Эти схемы наиболее эффективны при больших расходах в СКВ и при создании принудительной вентиляции кабины, а также при небольших степенях отделения влаги.

В третью группу объединены *«петли» с двукратной регенерацией*. Эти схемы усовершенствуют метод ОВД за счет подачи на вход ТХ воздуха, не содержавшего капельной влаги, а также его подогрева на линии высокого давления. Недостатком являются более высокие гидравлические потери на линии высокого давления по сравнению с СКВ первой группы. Наиболее эффективно применение схем при полном высаждении влаги.

Изучение особенностей рассмотренного способа отделения влаги показало целый ряд достоинств в сравнении с высаждением влаги на линии низкого давления (ВВД). *Во-первых*, ВВД позволяет добиваться более высокой степени осушки воздуха перед ТХ, что увеличи-

ваит надежность и ресурс системы в целом. **Во-вторых**, этот способ позволяет в ряде случаев отказаться от ВОНД и получать на выходе из СКВ отрицательные температуры при работе на влажном воздухе. Это приводит к уменьшению общего потребного расхода в СКВ и делает её более экономичной. **В-третьих**, в схемах, использующих ОВВД, теплообменники получаются более компактными, чем в случае организации охлаждения воздуха на линии низкого давления.

Таким образом, при работе СКВ на влажном воздухе наиболее предпочтительным является использование ВВД вместо ВОНД ввиду его большей эффективности, а также простоты и надежности. Наиболее совершенными из схем ОВВД являются «петли» с двукратной регенерацией. Однако выбор конкретной схемы зависит от технического задания и накладываемых ограничений, поэтому руководствоваться качественными оценками, сделанными в обзоре, недостаточно. Точная оценка требует сравнительных расчетов всех или нескольких схем.

3. СКВ САМОЛЁТА ТУ-204 (ТУ-214, ТУ-334)

3.1. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА СКВ ТУ-204

Система кондиционирования воздуха самолета Ту-204 разработана НПО «Наука» и впервые в отечественной гражданской авиации реализует отделение влаги на высоком давлении («петля»). Второй отличительной чертой служит универсальный блочный характер: изготавливается в виде моноблока СКВ, устанавливаемого на семействе самолётов ТУ-204, ТУ-214, ТУ-334. Принципиальная схема состоит (рис. 3.1) из трёх функциональных узлов: *подсистемы отбора ВВД, блока установки охлаждения* (петлевого типа), *подсистемы распределения и регулирования подачи воздуха в салоны*. На самолётах ТУ-204, ТУ-214 установлены две идентичные СКВ (по одной на двигатель) и поэтому первые два узла дублированы. На самолёте ТУ-334 имеется одна линия СКВ.

Узел отбора ВВД от двигателя. Отбор воздуха от компрессора маршевого двигателя и стабилизация его параметров по давлению и температуре осуществляются подсистемой отбора и предварительной подготовки воздуха, расположенной непосредственно на внешней поверхности двигателя (рис. 3.2).

Основная ступень отбора. На всех основных режимах полета воздух отбирается от фланца 7-й ступени компрессора высокого давления. В корпусе фланца встроены *обратный клапан* грибового типа, предотвращающий перетекание воздуха в двигатель через 7-ю ступень при отборе от последней 13-й ступени. Далее воздух поступает на нормально открытый *пневматический регулятор 2* избыточного давления, поддерживающий за собой давление 320 кПа. Этим же регулятором производится штатное включение и выключение отбора воздуха.

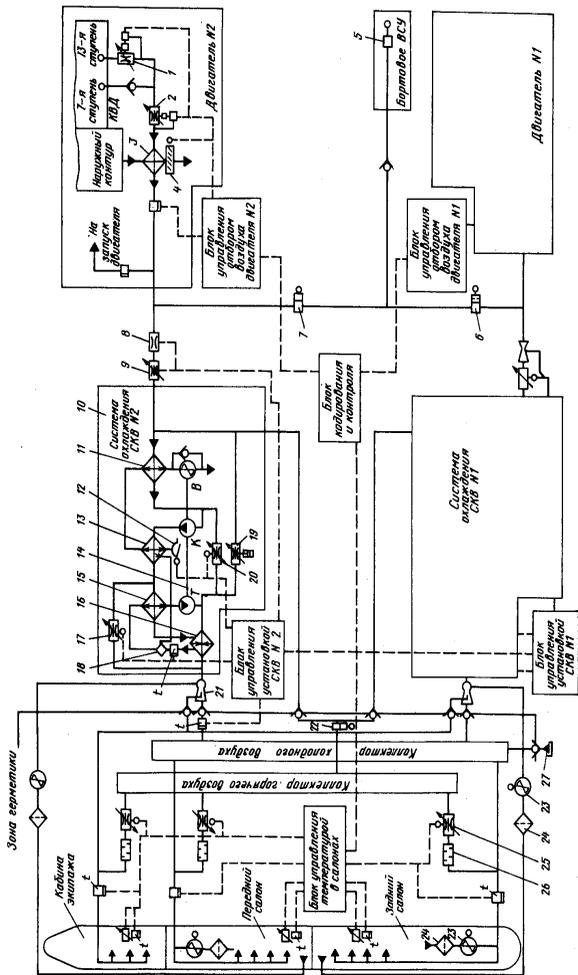


Рис. 3.1. Принципиальная схема системы кондиционирования воздуха самолета Ту-204:

1, 2 – регуляторы избыточного давления; 3 – предварительный ВВТ; 4 – жалюзийная заслонка; 5 – заслонка включения отбора воздуха от ВСУ; 6, 7 – краны кольцевания; 8 – датчик расхода воздуха; 9 – регулятор расхода; 10 – блок охлаждения; 11 – первичный ВВТ; 12 – регулируемый воздухооборудник; 13 – вторичный ВВТ; 14 – трехколесный турбохолодильник (т – турбина, к – компрессор, в – вентилятор); 15 – перегреватель; 16 – конденсатор; 17, 19, 20, 25 – регулируемые заслонки; 18 – шелевой влагоотделитель; 21 – эжектор-смеситель; 22 – кран подачи горячего воздуха; 23 – рециркуляционные вентиляторы; 24 – двухступенчатые фильтры; 26 – глушители шума; 27 – штуцер подключения наземного кондиционера

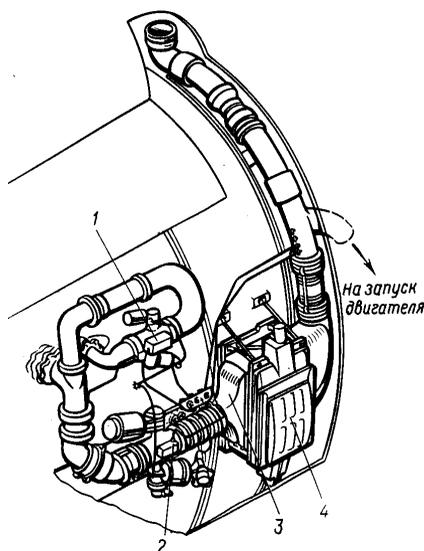


Рис. 3.2. Схема монтажа системы отбора и предварительной подготовки воздуха:

1, 2 – регуляторы избыточного давления; 3 – предварительный (ПТО); 4 – жалюзийная заслонка

Вспомогательная ступень отбора. На малых режимах работы двигателя (при планировании самолета) отбор производится от 13-й ступени компрессора. При этом воздух забирается через пневматический регулятор избыточного давления 1 (нормально закрытый), поддерживающий за собой давление 280 кПа, и далее поступает по трубопроводу с шаровыми соединениями к выходному регулятору 2. Оба регулятора избыточного давления имеют аварийные пневматические силовые приводы, перекрывающие отбор воздуха при отказах регуляторов или повышении температуры на выходе систем отбора за теплообменником 3 выше 250 °С.

Двухступенчатый отбор позволяет обеспечить стабильную подачу воздуха в салоны на всех этапах полета, в том числе при снижении на малом газе.

Система предварительного охлаждения. Предварительное охлаждение воздуха до температуры 200 °С осуществляется в теплообменнике 3, установленном в окне обечайки внешнего контура двигателя. Продувка этого предварительного (первичного) теплообменника СКВ производится воздухом вентиляторного контура, забираемого от первых ступеней вентилятора двигателя самолета. Регулирование температуры воздуха производится с помощью жалюзийной заслонки 4, установленной на выходе теплообменника.

Основной узел охлаждения. Установки охлаждения 10 (рис. 3.1) выполнены в виде моноблоков (рис. 3.3) и осуществляют дальнейшее охлаждение воздуха. Они обеспечивают подачу в расчёте на одного пассажира 15 кг/ч исходного «свежего» воздуха от двигателя самолета. Отличительными чертами установок являются использование трехко-

лесной турбохолодильной машины и схемы отделения влаги в линии высокого давления, позволившие поднять на 50 % холодопроизводительность СКВ в целом по сравнению с традиционными схемами.

Контур первичного охлаждения (здесь и далее обозначения см. рис. 3.1). Воздух через регулятор расхода 9 подается на первичный теплообменник 11 и охлаждается в нем до температуры 150° С, затем поступает в компрессор 14к, служащий основным тормозом турбохолодильной машины. Нагретый в компрессоре 14к воздух охлаждается в основном (вторичном) противоточном теплообменнике 13. Поток охлаждающего воздуха через первичный и вторичный теплообменники на стоянке создается вентилятором 14в трехколесной машины, а в полете – скоростным напором.

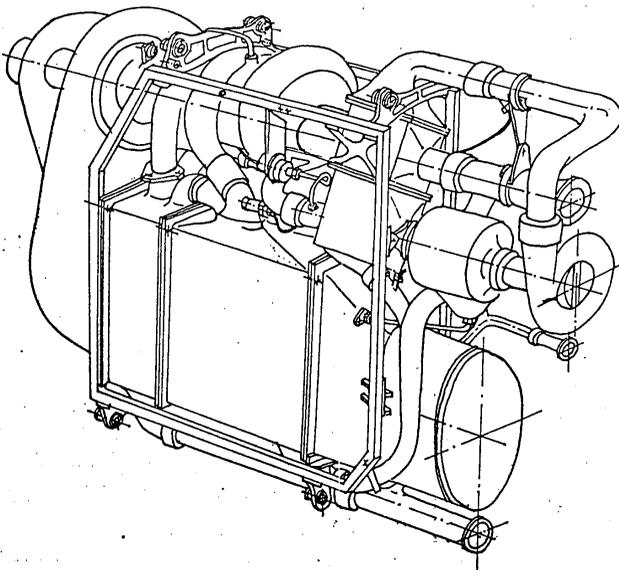


Рис. 3.3. Общий вид моноблока узла охлаждения СКВ Ту-204

Контур отделения влаги на высоком давлении («петля»). Охлажденный в теплообменнике 13 воздух подается в контур отделения влаги, включающий конденсатор 16, влагоотделитель 18, перегреватель (регенератор) 15 и турбохолодильник 14. В конденсаторе 16 воздух высокого давления охлаждается воздухом, поступающим с выхода турбины 14т. Конденсирующаяся при этом влага отделяется из ВВД в

щелевом влагоотделителе 18. В перегревателе 15 производится подогрев ВВД и испарение влаги, оставшейся в потоке после влагоотделителя 18. Подогрев регенератора 15 осуществляется воздухом с более высокой температурой, выходящим из теплообменника 13. Отделившаяся влага впрыскивается в охлаждающий воздух перед теплообменником 13.

Окончательное охлаждение воздуха происходит при его расширении на турбине 14г. Мощность турбины отводится компрессором и вентилятором в соотношении 4:1. Вал турбохолодильной машины вращается в газовых опорах с частотой до 40 000 об/мин.

Система автоматического регулирования параметров. Поддержание заданной температуры на входе в компрессор 14к обеспечивается изменением расхода охлаждающего воздуха через теплообменники установки охлаждения с помощью регулируемого воздухозаборника 12.

Регулирование температуры воздуха на выходе из установки осуществляется перепуском горячего воздуха со входа в компрессор или из-за первичного теплообменника 11 на выход с помощью перепусковых заслонок 17 и 20.

Противообледенительная система конденсатора. Пневматический перепускной клапан 19 обеспечивает подачу горячего воздуха на вход конденсатора 16 при повышении его гидравлического сопротивления в случае замерзания влаги на входном фронте и трубках конденсатора.

Узел рециркуляции кабинного воздуха. Предназначен для «вторичного использования» (рециркуляции) части очищенного кабинного воздуха из расчёта 15 кг/ч кабинного воздуха на одного пассажира. Величина суммарного расхода 30 кг/ч выбрана из условия выполнения требований по поддержанию необходимого газового состава воздуха в салонах. Непосредственно на выходе из установок охлаждения расположены узлы эжектора-смесителя 21 для смешения рециркуляционного воздуха со «свежим» воздухом, выходящим из установки и имеющем температуру $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Смешение потоков обеспечивает повышение температуры смеси до $+2..+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ в режиме максимального охлаждения на земле. По центральному трубопроводу свежий воздух подается в кабину экипажа. Рециркуляционный воздух забирается из салонов вентиляторами 23, проходит через двухступенчатые фильтры 24 и подается к эжектору-смесителю 21. Соотношение расходов свежего и рецир-

куляционного воздуха – 1:1, и общая подача воздуха в кабину составляет 30 кг/ч на одного пассажира.

Подсистема распределения и регулирования подачи воздуха в салоны. С выхода эжекторов-смесителей 21 поток поступает в коллектор холодного воздуха, а из него подается к распределительным коробам переднего и заднего салонов. Регулирование температуры, осуществляемое отдельно для кабины экипажа, переднего и заднего салонов, производится подмешиванием к холодному потоку горячего воздуха из специального коллектора с помощью заслонок 25 с управляемым электроприводом.

3.2. КОНСТРУКЦИЯ ОСНОВНОГО УЗЛА ОХЛАЖДЕНИЯ СКВ

1. Общие сведения. Установка охлаждения воздуха (УОВ) Ту-204 (далее по тексту – установка) предназначена для создания необходимых параметров воздуха (по температуре и влажности), подаваемого в герметическую кабину объекта. Установка выполнена в виде единого блока, входит в систему кондиционирования воздуха самолёта Ту-204 и самостоятельного применения не имеет. На самолёте имеются две установки охлаждения, размещённые в негерметичном отсеке. В случае выхода из строя одного из входящих в блок агрегатов установка целиком снимается с самолёта и заменяется другой. Установка нормально функционирует при эксплуатации в условиях как сухого, так и влажного тропического климата.

2. Основные технические данные. *Рабочее тело* – воздух, отбираемый от компрессоров двигателей и прошедший предварительную обработку в подсистеме отбора и предварительного охлаждения. *Охлаждающая среда* – атмосферный воздух, подаваемый в установку от заборника скоростного напора. *Основные расчётные режимы установки:* 1 – наземный, 2 – основной крейсерский, 3 – крейсерский. Параметры установки на основных расчётных режимах представлены в табл. 3.1.

Максимальные параметры рабочего воздуха на входе в установку: давление 390 кПа ($3,97 \text{ кг/см}^2$), температура 473 К (200 °С), расход 0,889 кг/с (3200 кг/ч). *Предельные параметры* рабочего воздуха на входе в установку при отказах изделий системы подготовки воздуха: давление 685 кПа (7 кг/см^2), температура 523 К (250 °С). После работы или отказа на этом режиме допускается замена установки.

Таблица 3.1

Наименование параметра	Режимы		
	1	2	3
Абсолютное давление торможения рабочего воздуха на входе в установку, кПа (кгс/см ²)	325±4,9 (3,31±0.05)	247, 5±4, 9 (2,52±0,05)	186,2±4,9 (1,9±0,05)
Температура рабочего воздуха на входе в установку, К (°С)	473±10 (200±10)	453±10 (180±10)	453±10 (180±10)
Расход рабочего воздуха на выходе из установки, кг/с (кг/ч)	0,695±0,028 (2500±100)	0, 695±0,028 (2500±100)	0,9±0,028 (3200±100)
Абсолютное давление рабочего воздуха на выходе из установки, кПа (кгс/см)	106,5±0,98 (1,086±0,01)	85±0,98 (0,867±0,01)	85±0,98 (0,867±0,01)
Температура рабочего воздуха на выходе из установки, °С:			
– при полностью закрытых обводных заслонках 8 (рис. 4) и 25, не более	минус 8	–	–
– при полностью закрытой обводной заслонке 25, не более	–	8	20
– при открытой заслонке 25, не менее	–	80	80

Максимальное давление рабочего воздуха на выходе из установки (при отказе системы автоматического регулирования температуры и запорно-регулирующего устройства – не выше 150 кПа (1,5 кгс/см²)).

Суммарная утечка воздуха из установки, определяемая в нерабочем состоянии при избыточном давлении воздуха 49 кПа (0,5 кгс/см²) и температуре (20±10) °С – не более 0,015 кг/с.

Максимальное время непрерывной работы установки на объекте 9 ч.

Масса установки не более 107,5 кг.

3. Конструкция установки охлаждения. Конструкция установки состоит из трёх основных узлов: *предварительного охлаждения, отделения влаги на высоком давлении и силового каркаса* (рис. 3.4). **Узел предварительного охлаждения:** патрубок входной 33, теплообменники воздушно-воздушные (далее по тексту – теплообменники) 14 и 13 при помощи фланцевых соединений скреплены между собой болтами. Над теплообменниками 13 и 14 расположен турбохолодильник 22.

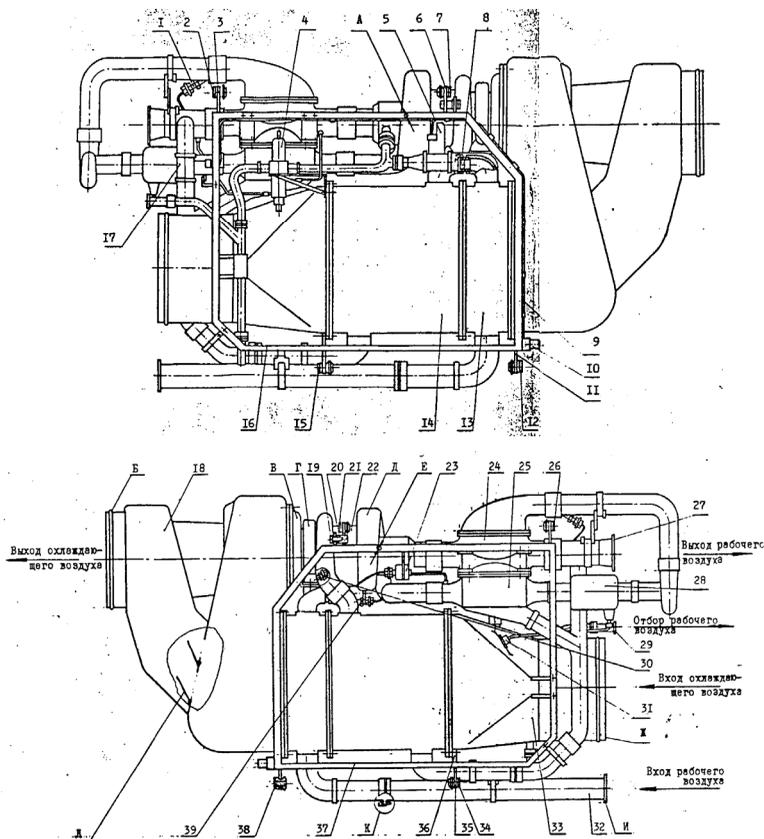


Рис. 3.4. Монтажная схема СКВ Ту-204:

1 – датчик температуры двухканальный; 2 – втулка; 3 – кронштейн; 4 – устройство перепускное; 5 – заслонка запорно-регулирующая; 6 – кронштейн; 7 – втулка; 8 – клапан обратный; 9 – электроджгут; 10 – вилка; 11 – кронштейн; 12 – втулка; 13 – теплообменник воздушно-воздушный; 14 – теплообменник воздушно-воздушный; 15 – втулка; 16 – правая рама; 17 – заслонка запорно-регулирующая; 18 – коллектор; 19 – болт; 20 – фиксатор; 21 – втулка; 22 – турбоохладитель; 23 – измерительный комплекс давления; 24 – теплообменник воздушно-воздушный; 25 – теплообменник воздушно-воздушный; 26 – втулка; 27 – фланец; 28 – влагоотделитель щелевой; 29 – фланец; 30 – датчик температуры двухканальный; 31 – ороситель; 32 – входной тройник; 33 – патрубок входной; 34 – втулка; 35 – ушко; 36 – планка; 37 – левая рама; 38 – втулка; 39 – датчик температуры двухканальный; А – отверстие для такелажного приспособления; Б – фланец; В – вентилятор; Г – компрессор; Д – турбина; Е – отверстие для такелажного приспособления; Ж – фланец; И – фланец; К – соединение трубопроводов; Л – заслонка

Коллектор 18 с помощью фланцевых соединений, стянутых болтами, крепится одновременно к фланцу теплообменника 13 через правую 16 и левую 37 рамы и к фланцу вентилятора В турбохолодильника 22. В коллекторе 18 установлена заслонка Л.

Узел отделения влаги на высоком давлении. Из верхней крышки теплообменника 13 выходят три патрубка. Одним патрубком теплообменник 13 при помощи регулируемого дистанционными прокладками фланцевого соединения с резиновым уплотнением стянут шпильками с входным патрубком компрессора Г турбохолодильника 22. Выходной патрубок компрессора Г соединен гибким патрубком с входным патрубком теплообменника 14. Вторым патрубком теплообменник 13 связан с теплообменником 14. В этой линии во входном патрубке теплообменника 14 установлен клапан обратный 8. Последний используется для перепуска части воздуха минуя компрессор Г турбохолодильника 22 с целью регулирования температуры на выходе установки. Третьим патрубком через заслонку запорно-регулирующую (далее по тексту – заслонку) 5, патрубок и тройник теплообменник 13 соединён с выходным патрубком турбины Д турбохолодильника 22. Патрубок и заслонка 5 служат для отбора горячего воздуха на противообледенительные нужды теплообменника-конденсатора.

Теплообменник 24 при помощи фланцевых соединений стянут болтами с расположенным ниже него теплообменником 25 и расположенной выше него крышкой, а с помощью гибких патрубков – с выходом из турбины Д и с выходным тройником. Теплообменник 25 при помощи фланцевых соединений стянут хомутами с влагоотделителем щелевым 28 и тройником, соединяющимся через заслонку 17 с выходным тройником, а через колено и патрубок – с выходным патрубком теплообменника 14. Крышка гибкими патрубками через колено соединена с улиткой, а улитка при помощи фланцевого соединения стянута хомутом с влагоотделителем щелевым 28.

К входному патрубку теплообменника 13 через патрубок подсоединен входной тройник 32, от которого отходят тройник и колено, соединенные с устройством перепускным 4. Последнее через тройник соединено с входом в турбину Д. Внутренняя камера устройства перепускного 4 соединена с входным патрубком теплообменника 24 и выходным тройником.

Ороситель 31 закреплен с помощью винтов на патрубке входном 33 и соединен трубопроводом с влагоотделителем щелевым 28.

Силовой каркас. Установка смонтирована на правой 16 и левой 37 рамах, жестко соединенных между собой кронштейнами 3, 6, 11 и планкой 36 с двумя ушками 35. В кронштейны и ушки вставлены восемь резиновых амортизаторов со стальными втулками. На левом борту для монтажа используются втулки 21, 26, 34 и 38, а на правом – втулки 2, 7, 12 и 15. В рамах имеются два отверстия А и Е для таке-лажного приспособления.

Патрубок входной 33 с помощью планок, теплообменник 13 с помощью фланца болтами крепятся непосредственно к рамам 16 и 37. Турбохолодильник 22 закреплен на кронштейне 6 через амортизаторы в ушках турбохолодильника при помощи болтов 19 и фиксаторов 20, позволяющих выбрать зазор между ушками турбохолодильника 22 и кронштейном 6.

Теплообменник 24 подвешен к рамам 16 и 37 с помощью двух кронштейнов, заслонки 5 и 17 закреплены на рамах с помощью кронштейнов. Устройство перепускное 4 закреплено при помощи кронштейна на фланце патрубка входного 33. Влаagoотделитель щелевой 28 закреплен на правой раме 16 с помощью кронштейна и ложементов.

Монтаж трубопроводов. Для монтажа трубопроводов использованы соединения К. Соединения представляют собой пары стянутых накидных гаек, внутри которых могут перемещаться в продольном и угловом направлениях законцовки труб с уплотняющими резиновыми кольцами. Элементы трубопроводов, имеющие с обоих концов компенсирующие перекосы и температурные деформации соединения трубопроводов К, закреплены на рамах 16 и 37 хомутами или с помощью кронштейнов и ложементов. На самолёте установка подсоединяется к трубопроводам системы фланцами Б и Ж при помощи гибких патрубков и фланцами 27, 29 и с помощью хомутов.

Измерительный комплекс давления (ИКД) 23 подсоединен трубопроводом к выходному патрубку теплообменника 25 и с помощью кронштейна закреплен на левой раме 37. Датчики температуры двухканальные (далее по тексту – датчики температуры 1, 30 и 39 по два ввернуты в штуцеры во входном патрубке теплообменника 14, в колене за теплообменником 24 и во входном патрубке компрессора Г.

Провода от всех розеток, подключенных к вилкам ИКД 23, датчиков температуры 1, 30 и 39 и заслонок 5 и 17, соединены в один электрожгут 9, закрепленный на правой раме 16 при помощи хомутиков винта-

ми, и распаяны в одном электрическом соединителе-вилке 10, закрепленной с помощью скобы на кронштейне 11. Металлизация установки производится в специально, отведенном месте на кронштейне 11.

3.3. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ОСНОВНОГО УЗЛА ОХЛАЖДЕНИЯ

Принципиальная схема установки представлена на рис. 3.5.

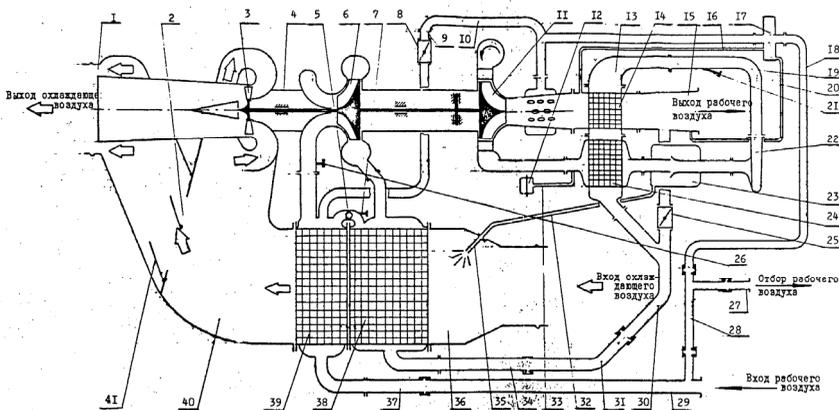


Рис. 3.5. Принципиальная схема блока охлаждения СКВ Ту-204:

1 – кольцевая щель; 2 – окно; 3 – вентилятор; 4 – турбохолодильник; 5 – клапан обратный; 6 – компрессор; 7 – датчик температуры двухканальный; 8 – заслонка запорно-регулирующая; 9 – патрубок; 10 – тройник; 11 – турбина; 12 – измерительный комплекс давления; 13 – крышка; 14 – теплообменник воздушно-воздушный; 15 – выходной тройник; 16 – трубопровод; 17 – устройство перепускное; 18 – колено; 19 – колено; 20 – трубопровод; 21 – датчик температуры двухканальный; 22 – улитка; 23 – влагоотделитель щелевой; 24 – теплообменник воздушно-воздушный; 25 – заслонка запорно-регулирующая; 26 – датчик температуры двухканальный; 27 – патрубок; 28 – тройник; 29 – входной тройник; 30 – тройник; 31 – колено; 32 – трубопровод; 33 – трубопровод; 34 – патрубок; 35 – ороситель; 36 – патрубок входной; 37 – патрубок; 38 – теплообменник воздушно-воздушный; 39 – теплообменник воздушно-воздушный; 40 – коллектор; 41 – заслонка

Узел предварительного охлаждения. Рабочий воздух, отобранный от компрессоров двигателей и прошедший предварительную обработку в подсистеме отбора и предварительного охлаждения, по входному

тройнику 29 и патрубку 37 поступает в теплообменник 39, откуда подается на вход в компрессор 6. Сжатый в компрессоре воздух поступает в теплообменник 38. В теплообменниках 38 и 39 рабочий воздух охлаждается заборным воздухом, поступающим из автономного воздухозаборника 36.

Контур отделения влаги на высоком давлении («петля»). После теплообменника 38 рабочий воздух по патрубку 34, колену 31 и тройнику 30 проходит для осушки по петле подготовки воздуха перед турбиной 11: направляется в теплообменник 24, где его температура понижается, а затем – в теплообменник-конденсатор 14, в котором рабочий воздух охлаждается ниже точки росы выходящим из турбины 11 холодным потоком. Пройдя крышку 13, воздушный поток подается по колену 19 в служащую предварительной ступенью влагоотделителя улитку 22 и поступает во влагоотделитель щелевой 23, где из него выпадает влага. Пройдя продувочный контур теплообменника-регенератора 24, рабочий воздух поступает для дальнейшего охлаждения на рабочее колесо турбины 11. Выходящий из турбины воздух с отрицательной температурой направляется в продувочный тракт теплообменника-конденсатора 14, где подогревается до рабочей температуры – 10 °С. Далее воздух выходит из установки охлаждения и направляется на эжектор-смеситель СКВ Ту-204.

Блок управления параметрами установки. Положения заслонок 8 и 25 (степень открытия) регулируются по поступающим в блок управления сигналам с измерительного комплекса давления 12, соединенного трубопроводом 33 с входом в турбину 11, и с датчиков температуры двухканальных 7, 26 и 21, установленных соответственно на входе в основной теплообменник 38, после предварительного теплообменника 39 (на входе в компрессор 6) и в колене 19 за теплообменником-конденсатором 14.

Продувочный тракт установки охлаждения. Охлаждающий воздух, поступающий в воздухозаборник из атмосферы, прокачивается вентилятором 3 турбохолодильника 4 последовательно через патрубок входной 36, продувочные контуры основного и предварительного теплообменников 38 и 39 и коллектор 40. В коллекторе 40 при высоком скоростном напоре поток охлаждающего воздуха может проходить, минуя вентилятор 3, через окно 2, которое открывается с помощью заслонки 41, и кольцевую щель 1, создавая дополнительный подсос в

выходном патрубке вентилятора 3, после чего выбрасывается в атмосферу.

Сконденсировавшаяся в процессе охлаждения воздуха влага удаляется из влагоотделителя щелевого 23 по трубопроводу 32 и с помощью оросителя 35, встроенного в патрубок входной 36, впрыскивается на вход в продувочный контур основного теплообменника 38 для повышения эффективности охлаждения рабочего потока воздуха.

3.4. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ТУРБОХОЛОДИЛЬНИКА СКВ ТУ-204

Назначение ТХ. Турбохолодильник представляет собой устройство, в котором происходит газодинамическое расширение потока с целью снижения его температуры. Выделяемая при этом энергия газа с помощью специального устройства (тормоза) преобразуется в механическую работу. На самолёте ТУ-204 применён так называемый трёхколёсный турбохолодильник, когда на валу ротора располагаются три газодинамических устройства: причём, к одной турбине подключены два тормоза – вентилятор и компрессор.

Устройство ТХ. Конструктивно турбохолодильник образован из пяти основных узлов (рис. 3.6): турбины 10 – для расширения и охлаждения газа, тормозного устройства (состоящего из компрессора 6 и вентилятора 3) – для передачи высвобождённой энергии вспомогательной среде, вала 8 – для передачи энергии от турбины к тормозу, корпуса 4 – для крепления узлов, размещения подшипников и системы смазки ТХ.

Турбина ТХ. Состоит из трёх элементов: входной улитки 9 для подвода воздуха высокого давления, колеса турбины 10 и выхлопного патрубка 11 для вывода охлаждённого воздуха низкого давления (в холодный тракт конденсатора).

Компрессор ТХ. Включает в себя следующие элементы: входную улитку 5 для подвода предварительно охлаждённого воздуха повышенного давления, колесо компрессора 6 и выходную улитку 7 для вывода воздуха высокого давления. Компрессор включён в основную линию СКВ и используется для дополнительного частичного повышения давления воздуха в системе.

Вентилятор ТХ. Имеет в составе аналогичные элементы: входную улитку 2 для подвода охлаждающего воздуха из продувочного тракта

теплообменников СКВ, колесо вентилятора 3 и выхлопной патрубок 1 для сброса отработанного воздуха в атмосферу. Вентилятор подключён к продувочному тракту теплообменника и используется для прокачки через него теплоносителя.

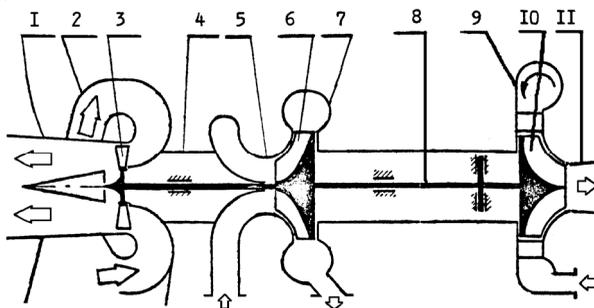


Рис 3.6. Принципиальная схема трёхколёсного турбоохладителя СКВ ТУ-204:

1 – выхлопной патрубок вентилятора; 2 – входная улитка вентилятора; 3 – вентилятор; 4 – корпус турбоохладителя; 5 – входная улитка компрессора; 6 – компрессор; 7 – выходная улитка компрессора; 8 – ротор турбоохладителя; 9 – входная улитка турбины; 10 – турбина; 11 – выхлопной патрубок турбины

Принцип действия ТХ. Принцип действия охлаждающей турбины. Внутренняя энергия газа преобразуется в соплах улитки 9 в кинетическую энергию движения высокоскоростной струи. За счет аэродинамического воздействия струи на рабочее колесо 10 происходит преобразование кинетической энергии газа во вращательное движение вала 8. Затраченная при этом работа с помощью вала передается на тормозное устройство. В результате этого из выхлопного патрубка 11 турбины выходит газ, внутренняя энергия которого уменьшается на величину произведенной работы, т. е. с более низкой температурой и давлением.

Принцип действия компрессора. Жестко закрепленное на валу 8 рабочее колесо 6 осуществляет: во-первых, захват газа в улитке 5 посредством аэродинамического воздействия своих профилированных лопаток; во вторых, сжатие и разгон воздуха. При этом происходит преобразование механической работы вращения в потенциальную и кинетическую энергию газа. В спрямляющем аппарате и улитке 7 про-

изводится торможение потока, сопровождающееся преобразованием кинетической энергии в дополнительную потенциальную энергию давления потока. В результате этого из улитки 7 выходит газ, внутренняя энергия которого увеличена на величину совершенной над ним работы, то есть с более высокой температурой и давлением.

Принцип действия вентилятора. Закрепленное на валу 8 рабочие колесо вентилятора 3 осуществляет захват газа в патрубке 2 и проталкивание его в выхлопной патрубков 1. При этом происходит преобразование части механической работы вращения в кинетическую энергию газа. В патрубке 1 производится частичное торможение потока, сопровождающееся незначительным повышением потенциальной энергии потока. В результате этого из патрубка 1 выходит высокоскоростной поток продувочного заборного воздуха, сбрасываемого далее в атмосферу.

Основные особенности трехколёсного ТХ. Данный тип турбохолодильника имеет следующие характерные особенности. Во-первых, он обладает большей экономичностью, так как позволяет осуществлять более полное и рациональное использования выделяемой в турбине мощности, чем классический двухколёсный турбохолодильник. На рабочем режиме на компрессор отводится около 75 % мощности турбины, а на вентилятор – 25 %. Во-вторых, он даёт возможность устойчивой работы в широком диапазоне угловых скоростей вращения ротора (т. е. различных давлениях воздуха на входе в турбину). Это вызвано тем, что вентилятор эффективен на больших оборотах вала, а компрессор – на малых. Поэтому в случае падения оборотов турбины большую долю тормозной нагрузки несёт компрессор, а в случае повышения оборотов турбины происходит перераспределение тормозного момента на колесо вентилятора. В-третьих, в турбохолодильнике применены подшипники на газовых опорах, повышающие эксплуатационную надёжность и упрощающие обслуживание элементов системы кондиционирования в целом.

4. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ СКВ САМОЛЁТА ТУ-204 НА ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ

4.1. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СКВ ТУ-204

Натурное испытание на стендах СКВ Ту-204 является достаточно трудоёмкой, дорогостоящей процедурой, требующей значительных временных затрат. В связи с этим в 80-х годах в ОНИЛОС НЭТИ был разработан алгоритм и модель расчета СКВ Ту-204, воссоздающая основные особенности работы СКВ на основании паспортных характеристик отдельных агрегатов. При этом за основу был взят графоаналитический метод расчета, доработанный для системы кондиционирования с отделением влаги на высоком давлении. Ниже представлены основная идея разработанного пакета программ и некоторые результаты проведенных первичных исследований особенностей работы СКВ Ту-204. В результате исследований при этом исследовались распределения температур и давлений в схеме на различных высотах полета; для условий «горячей» и «холодной» атмосферы; при различной влажности забортного воздуха; различных режимах работы СКВ, определяемых элементами автоматики.

1. Расчётная схема. Расчетная схема СКВ приведена на рис. 4.1. Расчетная схема составлена на основе принципиальной схемы. В неё внесены основные магистрали и агрегаты, а также важнейшие линии перепуска рабочего воздуха. Для определённого упрощения в схеме исключены вспомогательные магистрали и линии аварийных перепусков. Полученная в итоге расчетная схема является основой для разработки алгоритма расчёта и на ней целесообразнее всего моделировать основные расчетные режимы работы системы кондиционирования воздуха.

Предварительное охлаждение воздуха, отбираемого от компрессора двигателя, происходит в первичном (I) и основном (II) теплообмен-

никах за счет продувки их атмосферным воздухом. Подсистема высадки влаги состоит из теплообменника-регенератора (III) и теплообменника-конденсатора (IV), соединенных с турбиной турбохолодильной установки (ТХУ) по схеме «петля». Сконденсированная влага выделяется из потока влагоотделителем (V) и впрыскивается в поток продувочного воздуха основного ВВР. Вентилятор (VI) осуществляет рециркуляцию кабинного воздуха.

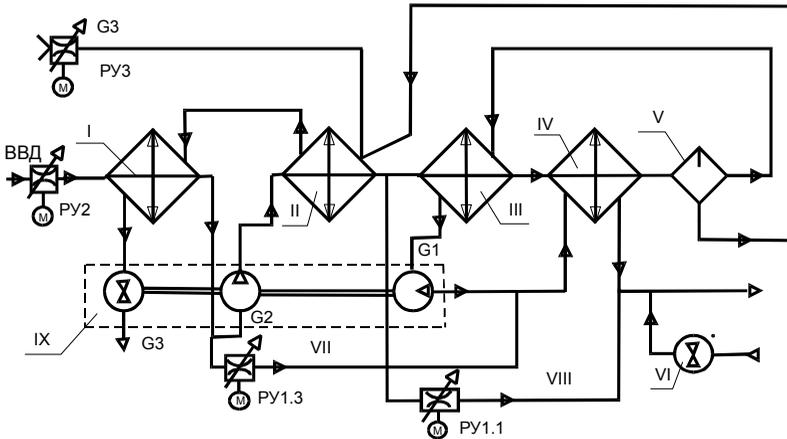


Рис. 4.1. Расчетная схема СКВ Ту-204:

I – первичный ВВР, *II* – основной ВВР, *III* – регенератор, *IV* – конденсатор, *V* – влагоотделитель, *VI* – вентилятор, *VII*, *VIII* – линии перепуска воздуха, *IX* – турбохолодильная установка

Отличительными признаками схемы являются:

- фиксированные параметры воздуха за первичным ВВР: температура 200 °С, давление 0.35 МПа;
- регулятор расхода РУ 1.3 используется для регулирования температуры за ТХУ путем перепуска горячего воздуха по линии (VII), а также для поддержания заданного расхода в широком диапазоне давлений;
- регулятор расхода РУ 1.1 предназначен для регулирования температуры на выходе из СКВ в широком диапазоне температур путем перепуска воздуха по линии (VIII).

2. Моделирование агрегатов СКВ. Математическая модель агрегатов СКВ включает в себя систему уравнений баланса энергии, мате-

риального баланса теплоносителей (энтальпии теплоносителей, влаго-содержания, процессов фазовых переходов), баланса гидравлических напоров. Системы уравнений составлены для расчёта следующих агрегатов СКВ: теплообменников, элементов турбохолодильника (турбины, компрессора, вентилятора), регулирующих заслонок, узлов смешения теплоносителей.

Гидравлический и тепловой расчет каждого элемента системы кондиционирования проводился по паспортным характеристикам серийных агрегатов. В качестве паспортных характеристик использовались следующие зависимости: коэффициентов теплопередачи для однозаходных перекрестно-точных теплообменников; КПД (эффективности) основного теплообменника; тепловых и гидравлических характеристик (степень повышения давления и температуры воздуха) элементов турбохолодильника (турбины, компрессора, вентилятора); гидравлических характеристик заслонок; теплофизических свойств влажного воздуха и др.

Данные паспортные характеристики преобразовывались по специальному алгоритму в «графические» зависимости для всего диапазона режимных параметров соответствующего агрегата. Графическая информация получалась по методу аппроксимации функций степенными полиномами с определением коэффициентов по «узлам» Чебышева. Как показали расчеты, лучшее соответствие исходным функциям достигалось при значении узлов $N = 8$, когда абсолютная погрешность аппроксимации не превышала 1,5 %. Реальные значения характеристик агрегатов определялись по «графическим» зависимостям при текущих значениях режимных параметров агрегатов (давлении, температуре, расходе и т. п.)

3. Моделирование работы системы. В качестве объекта моделирования использовалась схема «петля» с двукратной регенерацией, изображённая на рис. 4.1. В качестве моделируемых элементов использовались: первичный теплообменник – I, основной теплообменник – II, теплообменник-регенератор – III, теплообменник-конденсатор – IV, влагоотделитель – V, вентилятор – VI, элементы трехколесного турбохолодильника – IX (турбина, компрессор, вентилятор), управляющие заслонки – VII, VIII. При получении расчётной модели в схеме были выделены узловые точки – сечения между агрегатами СКВ. Они служили для связывания алгоритма расчёта: выходные параметры теплоносителей за предыдущим агрегатом являлись входными данными для тепло-гидравлического расчёта следующего агрегата.

Для расчётной схемы была составлена дополнительная система уравнений (условий) баланса, описывающая характерные особенности работы СКВ либо её отдельных агрегатов. Схема рассчитывалась путем ряда последовательных приближений до получения требуемой точности по нескольким характерным параметрам, относящимся к балансам мощности: на турбохолодильнике, конденсаторе, регенераторе и первичном теплообменнике.

Принятые допущения: при расчете не учитывается изменение температуры в трубопроводах и во влагоотделителях; режимы работы турбины, вентилятора и компрессора в расчетных условиях считаются согласованными.

Основные исходные данные берутся из паспортных данных агрегатов, дополнительными данными являются: давления, влагосодержания и температуры воздуха на входах в основную P_1, d_a, T_1 и продувочную линию P_2, d_a, T_2 ; давление и влагосодержание на выходе из основной P_{12}, d_{12} и продувочной линии P_9 . Модель расчета позволяет определять значения температур и давления воздуха после каждого элемента схемы.

Математическая модель ориентирована на расчет стационарных режимов работы и содержит несколько сот уравнений и соотношений. Непосредственное решение таких систем обычными итерационными методами затруднено, поэтому выстраивается в определенной последовательности цепочка соотношений, чтобы предыдущие результаты обеспечивали возможность получения следующих. Это резко понижает размерность задачи и позволяет воспользоваться одним из наиболее эффективных и устойчивых итерационных методов – модифицированным методом Зейделя.

4. Методика исследований. Численные исследования проведены для различных высот полета; условий «горячей» и «холодной» атмосферы; при различной влажности заборного воздуха; различных режимах работы СКВ, определяемых элементами автоматики.

Расчеты выполнялись по следующей схеме. Параметры воздуха на входе в основной узел охлаждения были зафиксированы и оставались неизменными. Например, один из режимов работы СКВ соответствовал случаю: $P = 2,37$ атм, $T_1 = 200$ °С, $G = 0,62$ кг/с. В процессе расчетов изменялись влагосодержание d_0 и температура T_{VZ} заборного воздуха. Для этого вся область режимов была разбита на серии по тем-

пературе забортного воздуха в диапазоне $T_{VZ} = -60 \dots +40 \text{ }^\circ\text{C}$. Для каждой температуры влагосодержание задавалось с помощью относительной влажности ϕ в диапазоне от 0 до 100 % с шагом 10 %.

Для получения полной картины влияния d_0 и T_{VZ} на параметры по тракту расчеты выполнялись в два этапа. На первом этапе определялась максимальная холодопроизводительность СКВ. При этом все обводные заслонки были перекрыты, и воздух проходил через компрессор и турбину турбохолодильника полностью. Указанные данные позволили определить теоретическую область работоспособности СКВ и оценить влияние каждого из исследуемых параметров.

На втором этапе задавалась температура на выходе из СКВ, равная $T_{10} = -5 \text{ }^\circ\text{C}$ и $-15 \text{ }^\circ\text{C}$. При этом программа подбирала расходы воздуха через обводные заслонки и линии подмеса, которые бы обеспечивали указанный режим работы для различных параметров окружающего забортного воздуха. Полученные при этом данные позволили оценить работоспособность СКВ на близких к эксплуатационным режимам работы.

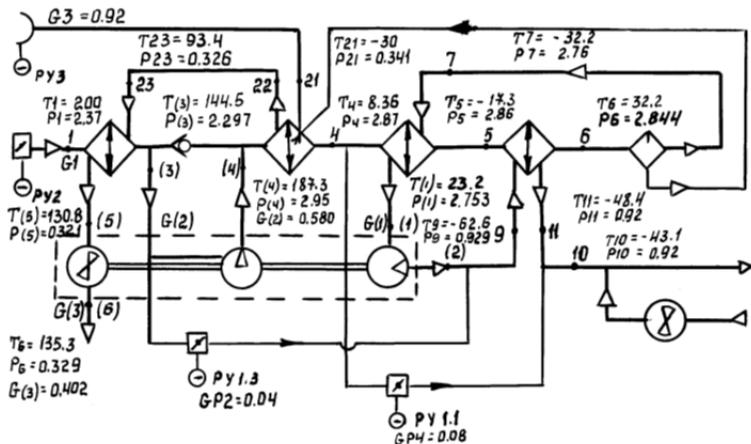


Рис. 4.2. Влияние параметров окружающей среды на рабочие температуры СКВ:

$$H = 11000 \text{ м, } G_{\text{СКВ}} = 0,62 \text{ кг/с; } T_1 = 200 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Типичное распределение температур по тракту СКВ для крейсерской высоты полета представлено на рис. 4.2.

4.2. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ СКВ ТУ-204 НА ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ

Выполненные численные исследования позволили получить значения параметров теплоносителя в наиболее значимых (реперных) сечениях СКВ: на входе компрессора ТХ, на выходе турбины ТХ – входе конденсатора, на входе влагоотделителя, на выходе СКВ. Ниже для иллюстрации приведены изменения температуры в двух из этих точек в исследованном диапазоне параметров заборного воздуха.

Сечение на входе компрессор ТХ (рис. 4.3, а, 4.4, а). Оличительная особенность данного сечения состоит в обеспечении работоспособности компрессора ТХ. В частности, температура в данной точке не должна превышать $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Из приведённой диаграммы видно, что увеличение температуры T_1 в узле отбора с 200 до $225\text{ }^{\circ}\text{C}$ заметно влияет на температуру воздуха T_3 перед компрессором ТХ. Однако температура окружающего заборного воздуха T_{VZ} оказывает наибольшее влияние на температуру T_3 . В условиях «горячей» атмосферы при $T_{VZ} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ величина температуры T_3 приближается к пороговому значению $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

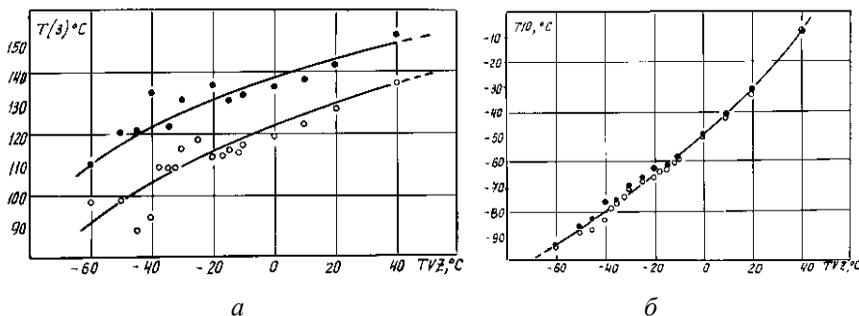


Рис. 4.3. Влияние параметров окружающей среды на рабочие температуры СКВ:

а – температура воздуха перед компрессором турбохолодильника; *б* – температура воздуха на выходе СКВ; $H = 100\text{ м}$; $G_{\text{СКВ}} = 0,5685\text{ кг/с}$; \circ – $T_1 = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$; \bullet – $T_1 = 225\text{ }^{\circ}\text{C}$

Сечение на выходе подсистемы охлаждения СКВ (рис. 4.3, б, 4.4, б). Величина температуры воздуха T_{10} в данном сечении является главным контролируемым рабочим параметром СКВ, так как опреде-

ляет эффективность работы всей подсистемы охлаждения и влияет на выходную температуру СКВ, получаемую далее за счет смешения с рециркулируемым кабинным воздухом. Нормальное рабочее значение температуры в данном сечении должно составлять -10°C .

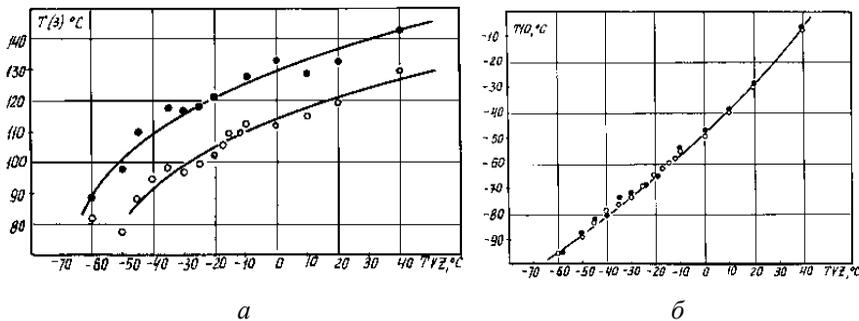


Рис. 4.4. Влияние параметров окружающей среды на рабочие температуры СКВ:

a – температура воздуха перед компрессором турбохолодильника; *б* – температура воздуха на выходе СКВ; $H = 100$ м; $G_{\text{СКВ}} = 0,62$ кг/с; \circ – $T_1 = 200^{\circ}\text{C}$; \bullet – $T_1 = 225^{\circ}\text{C}$

Из приведённой диаграммы видно, что увеличение температуры T_1 в узле отбора с 200 до 225 $^{\circ}\text{C}$ не влияет на температуру воздуха T_{10} на выходе подсистемы охлаждения. Наоборот, температура окружающего заборного воздуха T_{VZ} оказывает определяющее влияние на температуру T_{10} . В условиях «горячей» атмосферы при $T_{VZ} = 40^{\circ}\text{C}$ величина температуры T_{10} приближается к нормальному значению -10°C . При более низких температурах заборного воздуха достигаются значения T_{10} меньшие, чем нормальные. Это свидетельствует о запасе холодопроизводительности подсистемы охлаждения при данном агрегатном наборе СКВ. Подбор расходов через обводные регулирующие заслонки показал, что элементы автоматики могут обеспечить расчётную нормальную температуру на выходе узла охлаждения во всём диапазоне температур заборного воздуха.

Влияние влажности на подсистему охлаждения СКВ (рис. 4.5). Величина температуры воздуха T_{10} существенным образом зависит от влажности ϕ атмосферного воздуха. В частности, рост ϕ от 0 до 100 %

в условиях «горячей» атмосферы $T_{VZ} > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ резко увеличивает температуру T_{10} . В случае жаркого и влажного климата ($T_{VZ} \approx 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\varphi \approx \approx 100\%$) температура на выходе узла охлаждения T_{10} может подняться выше $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ вместо нормальных $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, влажность воздуха оказывает существенное влияние на холодопроизводительность СКВ.

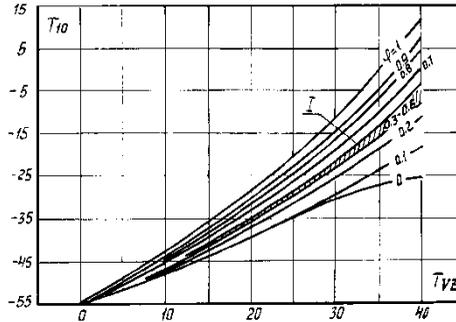


Рис. 4.5. Влияние влажности окружающей среды на выходную температуру узла охлаждения СКВ:

$$H = 100 \text{ м, } G_{\text{СКВ}} = 0,62 \text{ кг/с}$$

ВЫВОДЫ

В результате первичных исследований установлено, что при работе на влажном воздухе происходит резкое изменение теплофизических параметров воздуха по тракту СКВ, вызванное протеканием теплообменных процессов в турбине и теплообменнике – конденсаторе. В частности, это приводит к изменению эффективности работы СКВ в целом. Полученные результаты позволили установить вклад в работу системы каждого ее элемента, а также выявить уязвимые элементы схемы. Наиболее тяжелые условия работы наблюдаются в турбине (за счет протекания процессов конденсации, снего- и льдообразования), а также в теплообменнике-конденсаторе (за счет обледенения в холодном тракте). Сравнение численных данных с известными свидетельствами о хорошей степени достоверности разработанной модели.

Разработанная модель расчета, пакет программ и полученные результаты представляют интерес для специалистов, занимающихся про-

ектированием и оптимизацией систем кондиционирования воздуха для самолетов.

Работа выполнена при финансовой поддержке в форме гранта Министерства образования Российской Федерации по направлению «Фундаментальные исследования в области технических наук» (шифр гранта Т00–1.2–260) и проекта № А0050 Федеральной целевой программы «Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бородкин А. А., Копчиков И. А., Лапин В. П. и др.* Инженерное проектирование авиационных систем кондиционирования воздуха: Консп. лекций, ч. 1. – М.: МЭИ (Техн. ун-т), 1996.
2. *Быков Л. Т., Ивлентиев В. С., Кузнецов В. И.* Высотное оборудование пассажирских самолетов. – М.: Машиностроение, 1972.
3. *Воронин Г. И.* Системы кондиционирования воздуха на летательных аппаратах. – М.: Машиностроение, 1973.
4. *Воронин Г. И.* Конструирование машин и агрегатов систем кондиционирования. – М.: Машиностроение, 1973.
5. *Единые нормы* летной годности гражданских самолетов стран – членов СЭВ. – М.: Межведомственная комиссия по нормам летной годности гражданских самолетов и вертолетов СССР, 1985.
6. *Руководство* по технической эксплуатации самолёта Ту-204.
7. *Системы оборудования* летательных аппаратов / Под ред. А. М. Матвеевко и В. И. Бекасова. – М.: Машиностроение, 1995.
8. *Спарин В. А.* Тепловой расчёт СКВ летательных аппаратов: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1995.
9. *Спарин В. А.* Тепловое проектирование кабин самолетов: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000.
10. *Шустров Ю. М., Булаевский М. И.* Авиационные системы кондиционирования воздуха. – М.: Машиностроение, 1978.
11. *Шустров Ю. М.* Особенности авиационных систем кондиционирования воздуха с петлевой схемой влагоотделения // *Авиационная промышленность*, 1995. – № 5–6. – М. 37–43.
12. *Чичиндаев А. В.* СКВ с отделением влаги на высоком давлении / Новосибир. эл. техн. ин-т (Метод. указания). – Новосибирск, 1990. – 30 с.
13. *Чичиндаев А. В.* Оптимизация конструкции первичного теплообменника / Новосибир. гос. техн. универ-т (Метод. указания). – Новосибирск, 2001. – 54 с.
14. *Чичиндаев А. В.* Пластинчато-ребристые теплообменники / Новосибир. гос. техн. универ-т (Метод. указания). – Новосибирск, 1994. – 141 с.
15. *Чичиндаев А. В.* Расчет агрегатов СКВ на влажном воздухе / Новосибир. гос. техн. универ-т (Метод. указания). – Новосибирск, 1994. – 39 с.

16. *Чичиндаев А. В.* Расчет и проектирование конденсатора СКВ / Новосиб. электротехн. ин-т (Метод. указания). – Новосибирск, 1991. – 87 с.
- 17 *Djachenko Yu. V., Chichindaev A. V.* Features Of Air Conditioning Systems With Separation Of A Moisture On High Pressure // KORUS 2000: Proc. of the 4th Korea-Russia- Intern. Symp. on Science and Technology. – Ulsan, Korea: UU, 2000. – Vol. 3. Machine Parts and Materials Processing. – P. 196–200.
18. *Djachenko Yu. V., Chichindaev A. V.* Numerical Modeling And Research Of Work For Air Conditioning Systems // KORUS 2001: Proc. of the 5th Korea-Russia- Intern. Symp. on Science and Technology. – Tomsk, Russia: TSU, 2001. – P. 18–21.

Приложение

ПАКЕТ ПРОГРАММ ПО РАСЧЁТУ СКВ

В Приложении описаны особенности прикладного пакета программ для выполнения проверочного расчета СКВ, разработанного в современной программной среде Delphi-4.5. Пакет программ и адаптация методики комплексной оптимизации к среде Delphi-4.5 разработаны студентом специальности 131100 Мишениным А. С. в 2000...2001 годах. Работа базируется на результатах многолетних численных исследований по данным вопросам. Материалы работы получены при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 1997–2000 годы» («Интеграция», проект № А0050).

1. ВВЕДЕНИЕ И ОБРАБОТКА МАССИВОВ ДАННЫХ

Данная программа заключается в расчете систем кондиционирования воздуха с использованием визуализации, с заложенными математическими моделями агрегатов. Программа использует последовательность и алгоритм расчета, вводимый графически. Для реализации данной задачи ввод данных параметров в расчетную часть программы задавался следующим образом.

1.1. ОБЩИЙ МАССИВ ВСЕХ ДАННЫХ

	Vx_1	Vx_2	Vyx_1	Vyx_2	Vyx_1^i	Vyx_2^i	ε_1	ε_2	L
G									
T									
D									
P									
Y									
Y_1									
Y_2									
Y_3									
Y_4									
Y_5									

Где $G, T, D, P, Y \dots Y_5$ – физические характеристики агрегатов, причем G, T, D, P – параметры, которые используются всеми агрегатами, а $Y \dots Y_5$ – параметры, которые используются конкретными агрегатами. Vx_1, Vx_2 – входные данные по первому и второму каналу. Vyx_1, Vyx_2 – выходные значения по первому и второму каналу в первой итерации. Vyx_1^i, Vyx_2^i – выходные значения по первому и второму каналу после второй и последующих итераций. $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – необходимая точность в разности итераций. $L = (1 \dots n)$ – порядковый номер агрегата и последовательность расчета.

Каждому агрегату присвоен свой порядковый номер:

1 – Istochnic V, 2 – Istochnic H, 3 – Teploobmennic, 4- Kompresor, 5 – Turboholodilnik, 6 – Smesitel, 7 – Smesitel VI, 8 – Vlagootdelitel, 9 – Vihod V, 10 – Vihod H

1.2. МАССИВ ДАННЫХ ТЕПЛООБМЕННИКА

	Vx_1	Vx_2	Vyx_1	Vyx_2	Vyx_1^i	Vyx_2^i	ε_1	ε_2	L
G	→	→	→	→	*	*	*	*	*
T	→	→	?	?	*	*	*	*	
D	→	→	→	→	*	*	*	*	
P	→	→	→	→	*	*	*	*	
K₀									
F									
K									
ε									
Q									

Рис. III. Массив данных теплообменника

При расчете теплообменника задаются входные значения по первому и второму каналу, также задаются параметры самого теплообменника. При расчете изменяется температура на выходе по первому и второму каналу. Остальные значения после расчета передаются на выходные каналы без изменения.

1.3. МАССИВ ДАННЫХ КОМПРЕССОРА

	Vx_1	Vx_2	Vyx_1	Vyx_2	Vyx_1^i	Vyx_2^i	ε_1	ε_2	L
G	→	→	→	→	*	*	*	*	*
T			?	?	*	*	*	*	
D	→	→	→	→	*	*	*	*	
P			?	?	*	*	*	*	
η									
P_k									
ΔP									

Рис. П2. Массив данных компрессора

При расчете компрессора задаются входные значения по первому и второму каналу, также задаются параметры самого компрессора. При расчете изменяется температура и давление на выходе по первому и второму каналу. Остальные значения после расчета передаются на выходные каналы без изменения.

1.4. МАССИВ ДАННЫХ ДЕЛИТЕЛЯ ПОТОКА

	Vx_1	Vx_2	Vyx_1	Vyx_2	Vyx_1^i	Vyx_2^i	ε_1	ε_2	L
G			?	?	*	*	*	*	*
T	→	→	→	→	*	*	*	*	
D	→	→	→	→	*	*	*	*	
P	→	→	→	→	*	*	*	*	
η									

Рис. П3. Массив данных делителя потока

Остальные агрегаты и элементы задаются аналогичными массивами данных.

2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ИНТЕРФЕЙС ПРОГРАММЫ

Программа реализована в среде визуального программирования Delphi 5 и работает под управлением операционной системы Windows 9x, что позволило в полной мере использовать графический интерфейс и сделать программу наглядной.

2.1. ОСНОВНОЕ ОКНО ПРОГРАММЫ

При запуске программы на рабочем столе отображается основное окно программы (рис. П 4).

Наборное поле – представляет собой область, разбитую на квадратные ячейки размером $(45 \times 45$ точек) каждая и имеющую общий размер (8×12) ячеек.

При нажатии правой кнопкой мышки на область наборного поля выпадает меню выбора вида наборного поля.

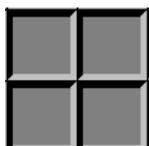


Рис. П4. Основное окно программы

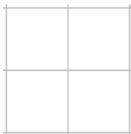
Щелчком левой кнопкой мышки выбираем вид наборного поля, которое заполняется выбранным видом.

- Бумажный лист
- Конструктор
- Пирамидки
- Сетка

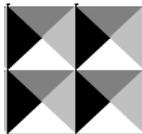
Виды наборного поля:



Конструктор



Сетка



Пирамидки



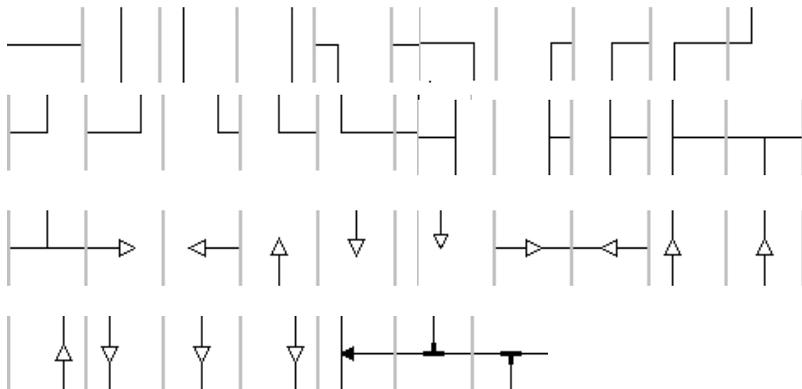
Бумажный лист

Вертикальная и горизонтальная полосы прокрутки – вертикальная состоит из основных агрегатов и элементов проектируемых систем. Горизонтальная состоит из вспомогательных и соединительных элементов. Каждый элемент имеет размер (45×45 точек), что позволяет ему заполнить любую ячейку наборного поля.

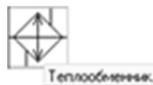
Агрегаты и элементы вертикальной полосы прокрутки:



Агрегаты и элементы горизонтальной полосы прокрутки:



При наведении мышки на любой агрегат или элемент, находящийся в полосах прокрутки и задержании мышки, на этом элементе всплывает подсказка о названии данного элемента



При нажатии мышкой на любой агрегат или элемент, находящийся в полосах прокрутки, данный элемент загорается зеленым цветом, тем самым отражая, что в данный момент он является активным.



И при последующем щелчке мышки на наборном поле заполняет ячейку наборного поля, на которой производился щелчок.

2.2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАБОТЫ С ПРОГРАММОЙ

Функциональные кнопки – это кнопки, которые обеспечивают поэтапное проведение расчета. Можно выделить три этапа расчета.

Набор схемы

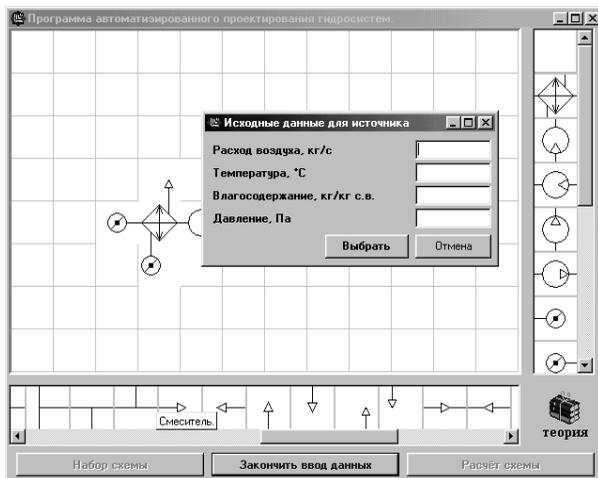
Надо отметить, что при запуске программы активной является только одна кнопка «Набор схемы». После нажатия на кнопку «Набор схемы» она меняется на кнопку «Закончить набор».

Закончить набор

На этом этапе выбирается вид наборного поля и составляется расчетная схема. После того как схема составлена, нажимается кнопка «Закончить набор».

На этом первый этап заканчивается.

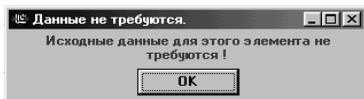
При нажатии на кнопку «Закончить набор» она перестает быть активной и загорается кнопка «Ввод исходных данных». Символизирующее нажатие второго этапа. После нажатия на кнопку «Ввод исходных данных», она меняется на кнопку «Закончить ввод данных».



На этом этапе мы видим на рабочем поле набранную и завершенную схему. Ввод данных осуществляется с помощью правой кнопки мышки, при нажатии которой на данном элементе всплывает окно ввода данных.

Ввод данных должен осуществляться последовательно один элемент за другим – это связано с последовательностью расчета.

Поля ввода данных заполняются все, после ввода данных нажимается кнопка «Выбрать». Затем производится ввод данных во всех последующих элементах схемы.



Любая схема заканчивается элементом выход, при вводе данных на этом элементе всплывает окно на котором нужно отметить Ок, это связано с последовательностью расчета.

После ввода всех данных нажимаем кнопку «Закончить ввод данных», и она перестает быть активной. На этом второй этап заканчивается.



Активизируется кнопка «Расчет схемы» и начинается третий этап.

Третий этап можно назвать автоматическим и сводится он к просмотру результатов расчета схемы.



Нажатием правой кнопки мыши на кнопку «Расчет схемы», она заменяется на кнопку «Расчет закончен».



Просмотр результатов расчета осуществляется передвижением мышки на наборном поле по схеме. При наведении мышки на один из элементов схемы всплывает окно вывода результатов.

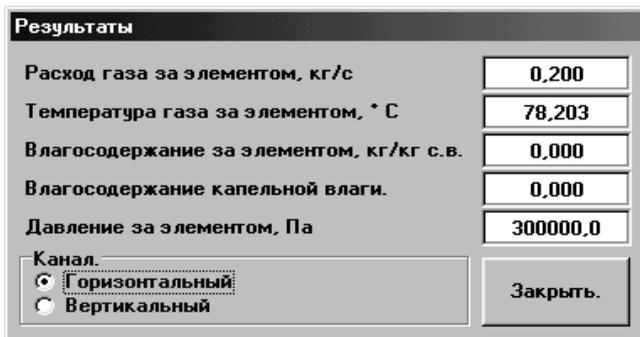


Рис. П5. Всплывающее окно результатов расчета

Значения параметров меняются и отображаются в любой точки схемы непосредственно за элементом, выходные параметры текущего элемента являются входными в последующий.

Схема может состоять из вертикальных и горизонтальных каналов. Для просмотра результатов по вертикальному каналу необходимо переключить канал с помощью левой кнопки мышки на окна результатов.

Работа с программой будет завершена после нажатия на кнопку «Расчет закончен».

2.3. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА И ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

Влияние КПД ТХ. Проведем расчет данной схемы.

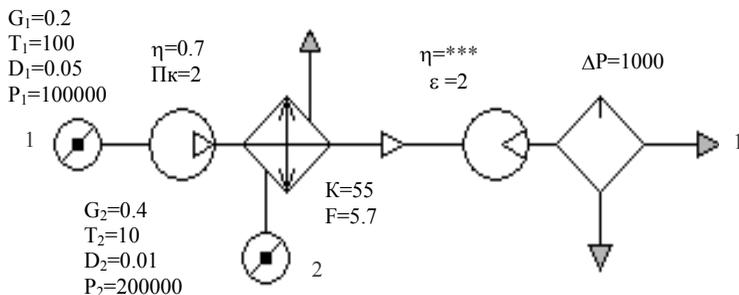


Рис. Пб. Расчетная схема СКВ

В расчете принимаем фиксированные значения параметров по первому и второму каналу. Будем изменять КПД турбохолодильника.

	$G_{\text{вых1}}$	$T_{\text{вых1}}$	$D_{\text{п вых1}}$	$D_{\text{к вых1}}$	$P_{\text{вых1}}$	$D_{\text{к вых2}}$	
$\eta_{\text{тх}}=0,65$	0,200	23,490	0,05	0,01	65666,7	0,021	
$\eta_{\text{тх}}=0,70$	0,200	22,960	0,05	0,01	65666,7	0,022	
$\eta_{\text{тх}}=0,75$	0,200	22,062	0,05	0,01	65666,7	0,023	
$\eta_{\text{тх}}=0,80$	0,200	21,131	0,05	0,01	65666,7	0,025	
$\eta_{\text{тх}}=0,85$	0,200	20,169	0,05	0,01	65666,7	0,026	

Построим зависимость температуры на выходе по первому каналу от КПД.

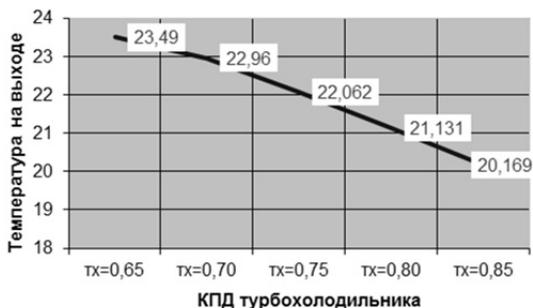


Рис. П7. Пример графической информации программы

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АГРЕГАТОВ СКВ

3.1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОБМЕННИКОГО АППАРАТА

Расчетная схема теплообменника показана на рис. П8. В схеме принято: t_{11}, t_{12} – температуры горячего (охлаждаемого) воздуха на входе и на выходе из теплообменника; t_{21}, t_{22} – температуры холодного (охлаждающего) воздуха на входе и на выходе из теплообменника; G_1, G_2 – расходы горячего и холодного воздуха.

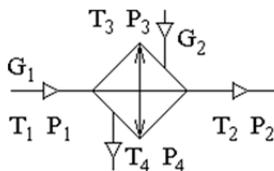


Рис. П8. Расчетная схема теплообменного аппарата

Водяные эквиваленты горячего W_1 и холодного W_2 воздуха:

$$W_1 = c_{p1}G_1, W_2 = c_{p2}G_2,$$

где c_{p1}, c_{p2} – изобарные теплоемкости горячего и холодного воздуха.

Число единиц переноса теплоты в теплообменнике

$$N = KF / W_{\text{MIN}},$$

где K, F – коэффициент теплопередачи и поверхность теплообменника, отнесенные к одной из его сторон (при поверочном расчете существующих теплообменников берутся из паспортных данных); W_{MIN} – наименьшая из величин W_1, W_2 .

Влияние расхода продувочного воздуха на коэффициент теплопередачи теплообменника учитывается приближенной зависимостью

$$K = (0.667G_1 / G_2)^n K_0,$$

где K_0 – исходное значение теплопередачи; $n = 0,88$, если $G_2 < 1.5 G_1$; $n = 0,38$, если $G_2 \geq 1.5 G_1$.

Тепловая эффективность однократно перекрестно-точного теплообменника

$$\varepsilon = 1 - \exp(-DW_{\text{MAX}} / W_{\text{MIN}}),$$

где $D = 1 - \exp(-NW_{\text{MAX}} / W_{\text{MIN}})$, W_{MAX} – наибольшая из величин W_1 и W_2 .

Тепловой поток, отводимый теплообменником,

$$Q = \varepsilon W_{\text{MIN}}(t_{11} - t_{21}).$$

Температура горячего и холодного воздуха на выходе из теплообменника

$$t_{12} = t_{11} - Q / W_1, \quad t_{22} = t_{21} + Q / W_2.$$

3.2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПРЕССОРА

Если ввести следующие обозначения: P_1, T_1, P_2, T_2 – давление и температура воздуха соответственно на входе и на выходе из компрессора (рис. П9), то температура воздуха за компрессором может быть рассчитана по формуле:

$$T_2 = T_1 \left[1 + (\pi_k^{0.286} - 1) / \eta_k \right],$$

где η_k – КПД компрессора; π_k – степень сжатия компрессора.

Давление воздуха за компрессором:

$$P_2 = \pi_k P_1,$$

Перепад давления на компрессоре:

$$\Delta P_k = P_2 - P_1,$$

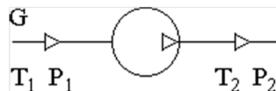


Рис. П9. Расчетная схема компрессора

3.3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБОХОЛОДИЛЬНИКА

Расчетная схема турбины турбохолодильника показана на рис. П10. В схеме принято: P_1, T_1, D_1, G – соответственно давление, температура, влаго-содержание и расход воздуха на входе в турбину; $P_2, T_2, T_{2\text{вл}}, D, D_k$ – давление, температура сухого и влажного воздуха, влагосодержание на выходе из турбины.

Температура сухого воздуха ($D_1 = 0$) на выходе из турбины турбохолодильника:

$$T_2 = T_1 \left[1 - \eta_k (1 - \varepsilon_{\text{тх}}^{-0,286}) \right],$$

где η_k – КПД турбины (находится по паспортным данным); $\varepsilon_{\text{тх}} = P_1 / P_2$ – степень расширения воздуха в турбине.

Температура влажного воздуха ($D_1 > 0$) за турбиной $T_{2\text{вл}}$ определяется из решения уравнения теплового баланса влажного воздуха за турбиной:

$$r(D_1 - D_{2H}) = c_p(T_{2\text{вл}} - T_2), \quad (1)$$

где изобарная теплоемкость c_p может быть взята для сухого воздуха; влаго-содержание насыщенного воздуха за турбиной:

$$D_{2H} = 0.622P_H / (P_2 - P_H),$$

Давление насыщения водяных паров находится из таблиц для влажного воздуха при $t_{2\text{вл}}$ или рассчитывается по эмпирической формуле

$$P_H = 0.0061 \cdot 10^4, \text{ бар},$$

где

$$A = 7,5t_{2\text{в}} / (237,3 + t_{2\text{в}}) \quad \text{при } t_{2\text{в}} \geq 0^\circ \text{C},$$

$$A = 9,02t_{2\text{в}} / (253 + t_{2\text{в}}) \quad \text{при } t_{2\text{в}} \geq 0^\circ \text{C},$$

Уравнение теплового баланса влажного воздуха нелинейно относительно температуры $T_{2\text{вл}}$ и может быть решено одним из численных методов.

Капельная влажность находится из уравнения

$$D_k = D_{\text{п}} - D_{2H},$$

Холодопроизводительность турбохолодильника на сухом и влажном воздухе

$$Q = c_p G(T_1 - T_2),$$

$$Q_{\text{вл}} = c_p G(T_1 - T_{2\text{вл}}).$$

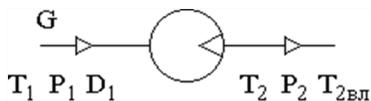


Рис. П10. Расчетная схема турбины турбохолодильника

3.4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СМЕСИТЕЛЯ ПОТОКА

Введём обозначение $T_1, D_1, G_1, T_2, D, G_2, D$ – температура, влагосодержание и расход соответственно первого и второго смешиваемых потоков (рис. П11); T_3, D_3, G_3 – температура, влагосодержание и расход смешанного потока воздуха на выходе из смесителя. Также в одном из потоков может быть капельная влага D_K .

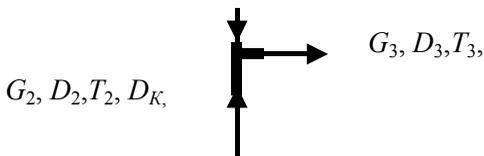


Рис. П11. Смеситель потока

Определение параметров смешанного потока:

Общий расход воздуха после смешивания двух потоков:

$$G_3 = G_1 + G_2.$$

Температура воздуха после смешивания двух потоков:

$$T_3 = G_2 D_K r + c_p G_2 T_2 + c_p G_1 T_1 / (G_1 + G_2).$$

Влагосодержание воздуха после смешивания двух потоков:

$$D_3 = G_1 D_1 + G_2 (D_2 + D_K) / G_3.$$

3.5. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛАГООТДЕЛИТЕЛЯ

Расчетная схема влагоотделителя показана на рис. П12.

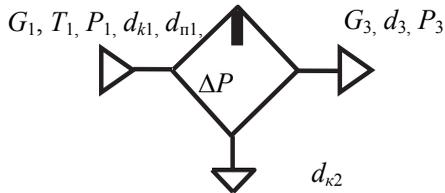


Рис. П12. Расчетная схема влагоотделителя

В схеме принято: $G_1, T_1, P_1, d_{k1}, d_{п1}$ – расход, температура, давление, капельное и паровое влагосодержание на входе во влагоотделитель; G_3, d_3, P_3 – расход, влагосодержание, давление на выходе из влагоотделителя по сухому каналу; $d_{к2}$ – капельное влагосодержание по второму каналу.

Давление за влагоотделителем: $P_2 = P_1 - \Delta P$.

Капельная влага равна: $d_{к2} = \eta \cdot d_{к1}$, где $\eta = 0,96$ – КПД влагоотделителя.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Особенности тепломассообмена влажного воздуха в СКВ.....	5
1.1. Основные проблемы охлаждения влажного воздуха в СКВ.....	5
1.2. Высаждение влаги в линии низкого давления	10
1.3. Высаждение влаги в линии высокого давления	14
1.4. Основные агрегаты подсистемы высаждения влаги	19
2. Классификация СКВ с отделением влаги на высоком давлении.....	23
2.1. «Петли» с однократной регенерацией	25
2.2. Комбинированные СКВ.....	32
2.3. «Петли» с двукратной регенерацией.....	35
2.4. Сравнение СКВ пассажирских самолетов	39
3. СКВ Самолёта Ту-204 (Ту-214, ТУ-334)	46
3.1. Принципиальная схема.....	46
3.2. Конструкция основного узла охлаждения СКВ	51
3.3. Особенности работы основного узла охлаждения.....	56
3.4. Особенности работы турбохолодильника СКВ Ту-204.....	58
4. Особенности работы СКВ самолёта Ту-204 на влажном воздухе	61
4.1. Численное моделирование СКВ ТУ-204.....	61
4.2. Особенности работы СКВ ТУ-204 на влажном воздухе	66
Литература.....	70
Приложение. Пакет программ по расчёту СКВ	72
1. Введение и обработка массивов данных.....	72
1.1. Общий массив всех данных	72

1.2. Массив данных теплообменника	73
1.3. Массив данных компрессора	74
1.4. Массив данных делителя потока	74
2. Основные принципы и интерфейс программы.....	74
2.1. Основное окно программы.....	75
2.2. Последовательность работы с программой	77
2.3. Примеры расчета и оценки результатов	79
3. Математическое моделирование агрегатов СКВ	80
3.1. Математическое моделирование теплообменного аппарата.....	80
3.2. Математическое моделирование компрессора.....	81
3.3. Математическое моделирование турбохолодильника.....	82
3.4. Математическое моделирование смесителя потока	83
3.5. Математическое моделирование влагоотделителя	84

**Юрий Васильевич Дьяченко
Александр Васильевич Чичиндаев**

**ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ
КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ НА ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ**

Учебное пособие

2-е издание

Редактор *И.Л. Кескевич*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *Л.Н. Ветчакова*
Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*
Компьютерная верстка *Л.А. Веселовская*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 30.03.2017. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 80 экз.
Уч.-изд. л. 5,11. Печ. л. 5,5. Изд. № 70. Заказ № 531. Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20