



Модуль 2.

Современные авиационные системы кондиционирования воздуха

На этом уроке

1. Познакомимся с классификацией систем кондиционирования с отделением влаги на высоком давлении
2. Изучим особенности “петли” с двукратной регенерацией
3. Сравним особенности СКВ современных пассажирских самолетов

Тематическое содержание

Классификация систем кондиционирования с отделением влаги на высоком давлении	2
“Петли” с двукратной регенерацией	6
Сравнение СКВ пассажирских самолетов	10
Особенности СКВ фирмы Боинг	11
Особенности СКВ фирмы Аэробас	15
Особенности СКВ фирмы Туполева	18

Классификация систем кондиционирования 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 линии высокого давления (ВВД или ОВД). Перед тем как перейти к характеристикам конкретных схем СКВ с ОВД, необходимо выделить присущие этим схемам общие особенности.

Первая особенность - охлаждение воздуха перед турбохолодильником (ТХ) до температуры ниже точки росы. При этом можно отметить несколько способов охлаждения. Наибольшее распространение 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 ~ 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 сухой воздух.

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, исключающие 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. таблицу 1). В результате любую схему можно

описать как различные сочетания из этих четырех факторов. Это позволяет сравнить все примененные технические решения и выбрать приемлемую для конкретного технического задания схему СКВ.

Таблица 1

Классификация СКВ по способам высаждения влаги на линии высокого давления

Схема СКВ, номер патента	Способ охлаждения ВВД	Степень высаждения влаги до ТХ	Состоя ние 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	Частичн ое доиспаре ние	Подмес ВВД
С Двукратной регенерацией	Схема Кемпбелла №4198830	Воздухом из ТХ	Неполная	Полное доиспарение	Нет
	Схема Кинселла № 4352273	Частью воздуха из ТХ			Конденсатор с обводной линией и обогревом стенок

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

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 влагоотделителя высокого давления (ВОВД) также и традиционного влагоотделителя низкого давления (ВОНД). 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 совершенствуют метод ОВВД за счет подачи на вход ТХ воздуха, не содержащего 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 не полном высаждении влаги.

Изучение особенностей рассмотренного способа отделения влаги показало целый ряд достоинств в сравнении с высаждением влаги на линии низкого давления (ВВНД).

Во-первых, ВВВД позволяет добиваться более высокой степени осушки воздуха перед ТХ, что увеличивает 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 ее 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 ВВВД вместо ВВНД 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.

"Петли" с двукратной регенерацией

Общие свойства. Рассматриваемые здесь схемы СКВ являются логическим продолжением развития схем ОВВД: 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 типе - в регенераторе. Поэтому схемы данного типа можно охарактеризовать как системы высаживания 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, 1978г.). 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 предложено (рис. 1):

- 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 9, что позволяет кроме нагрева воздуха перед ТХ, осуществить дополнительное охлаждение воздуха перед конденсатором. Предложенный вариант обогрева регенератора является оптимальный, однако в патенте указывается, что его можно осуществить также другими способами.

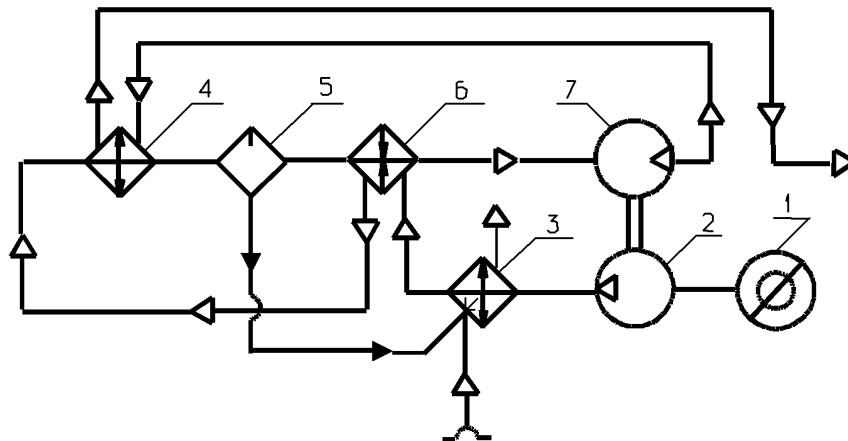


Рис. 1. Патент США № 4198830, 1978 г.:

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

В рассматриваемой схеме регенератор подобран таким образом, что температура за ТХ положительна ($\sim 4,5 \text{ }^\circ\text{C}$), в связи с чем в схеме отсутствуют противообледенительные средства. 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 $+2 \dots +5$ °С для предотвращения обмерзания агрегатов системы (клапанов, влагоотделителей). В результате температурный перепад воздуха в гермокабине $Dt_{ГК} = t_{ГК \text{ вх}} - t_{ГК \text{ вых}}$ составлял в пассажирских самолетах $+18 \dots +20$ °С 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 $-8 \dots -10$ °С, что позволяет увеличить $Dt_{ГК}$ до $+30 \dots +35$ °С и уменьшить потребный для охлаждения гермокабины расход воздуха на 40 %. Таким образом, за счет уменьшения температуры воздуха на выходе из СКВ можно значительно 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 предлагается (рис. 2):

- создать свободную 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.

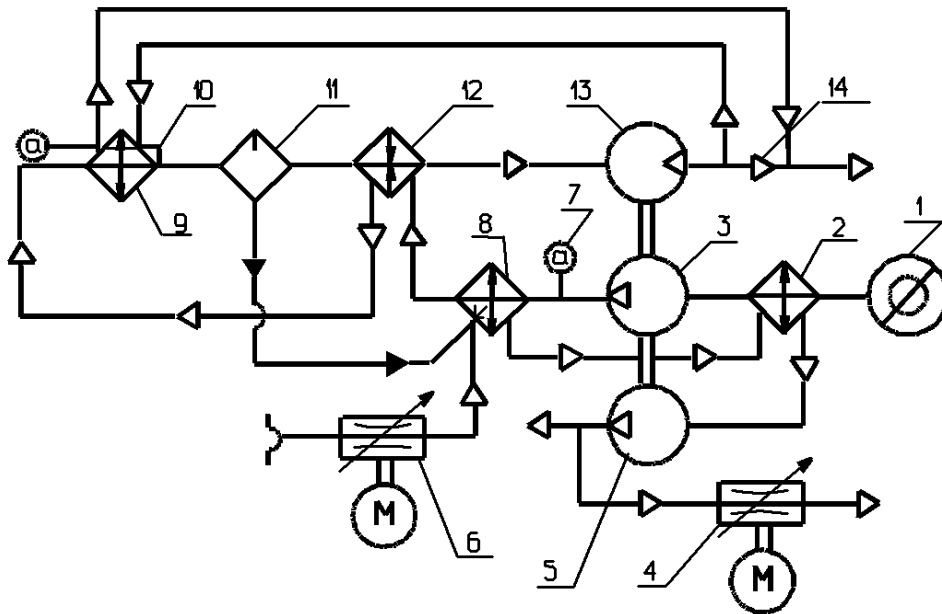


Рис. 2. Патент США № 4352273, 1982 г.:

1 - отбор; 2 - первичный теплообменник; 3 - компрессор ТХ; 4, 6 - управляющие поверхности 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 обводный канал конденсатора.

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 по тракту 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 относится ко второй половине 80-х.

Особенности СКВ фирмы Боинг

Схема СКВ самолета Боинг-757 (767). Настоящая схема является логическим развитием “петли” Кинселла и получена добавлением к ней рециркуляции каabinного воздуха. СКВ самолета Боинг-757 (767) имеет следующие особенности (рис. 3):

- 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;
- клапаны 3, 4 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 8 и выходную 9 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 10 для принудительной прокачки продувочного воздуха имеет обводной канал 5, позволяющий увеличить расход продувочного воздуха;
- конденсатор в противообледенительных целях имеет встроенный обводной канал 15, специальные обогревательные кромки, подмес горячего воздуха на вход теплообменника.

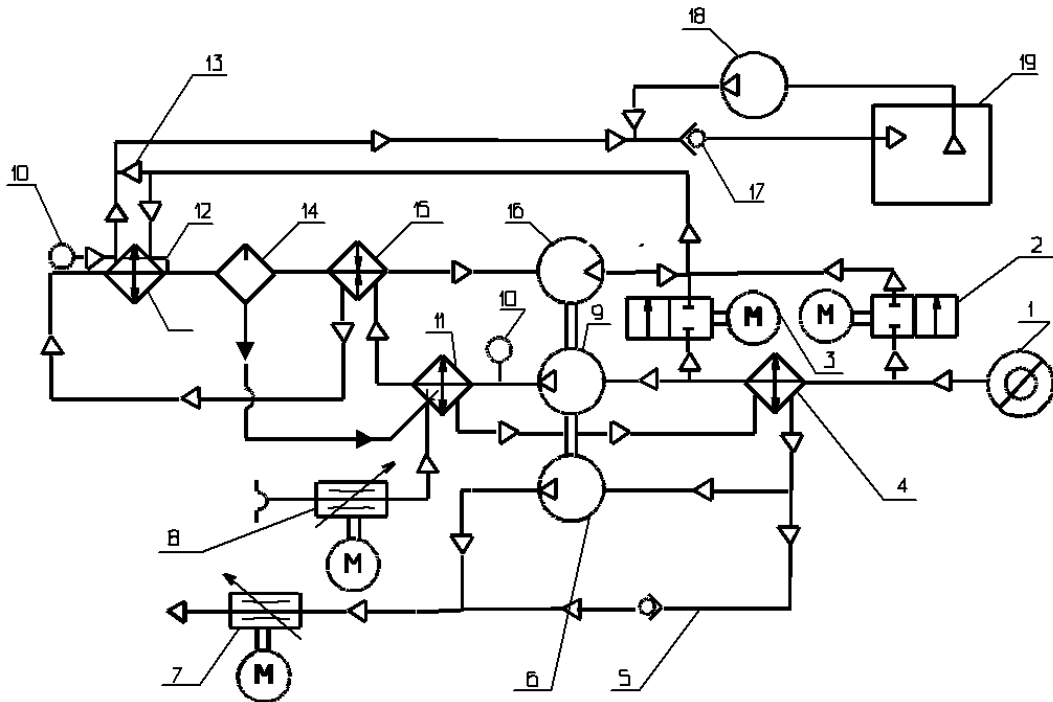


Рис. 3. СКВ самолета Боинг - 757 (767):

1 - отбор ВВД; 2 - клапан обводной линии; 3 - клапан регулирования температуры (КРТ); 4 - первичный теплообменник; 5 - обводная линия вентилятора; 6 - вентилятор ТХ; 7, 8 - заслонки для регулирования расхода продувочного воздуха; 9 - компрессор ТХ; 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; 17 - обратный клапан гермокабины (ГК); 18 - нагреватель; 19 - ГК

СКВ самолета Боинг-757 может работать в трех режимах:

1. Нормальный режим: заслонки продувочного воздуха 8, 9 открыты, клапан регулирования температуры (КРТ) 3 – закрыт, клапан 4 поддерживает на выходе СКВ температуру 4 °С.

2. Холодный режим: заслонки 8, 9 открыты, а КРТ 3, 4 закрыты обеспечивая работу на максимальную холодопроизводительность. КРТ нормально закрыт и может только открываться для противообледенительных целей или защиты ТХ.

3. Теплый режим: заслонки 8, 9 открыты, а КРТ 3, 4 открыты так, что охлаждение осуществляет только теплообменник.

Принципиальная схема работы СКВ самолетов семейства Боинг. На рис. 4 представлена схема особенностей компоновки и работы СКВ фирмы Боинг. В частности, показано наличие двух одинаковых узлов охлаждения (РАСК 1 и 2), привязанных к каждому двигателю самолета. Узел охлаждения состоит из: узла предварительного охлаждения (УПО, первичный и основной теплообменники), турбоохладительной установки (ТХУ), конденсаторного блока (конденсатор, регенератор, влагоотделитель), системы воздухопроводов для продувки УПО и смешения с рециркулируемым воздухом из кабины самолета.

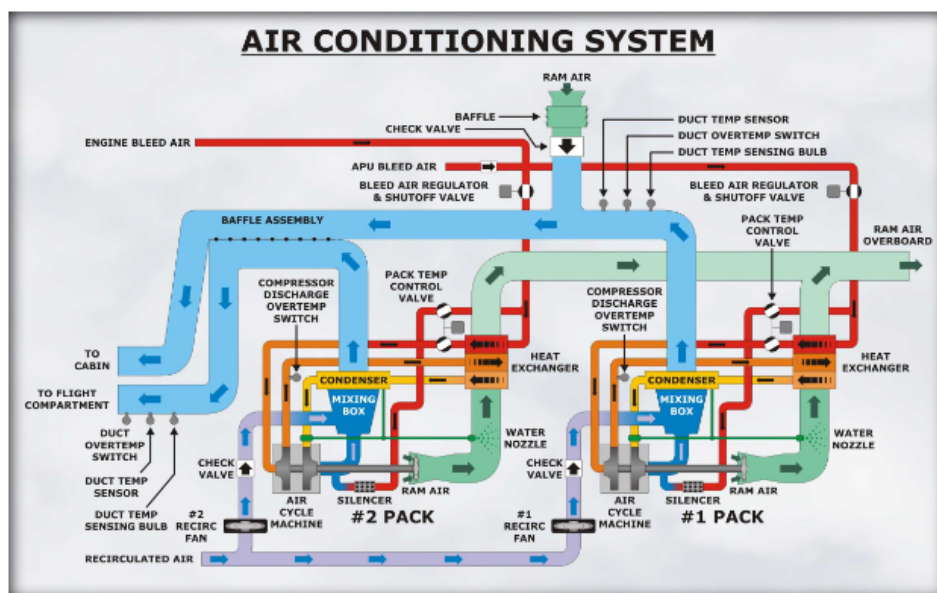


Рис. 4. Принципиальная схема работы СКВ самолетов семейства Boeing

Особенности СКВ фирмы Аэробас

Схема СКВ самолета А-310. За исключением противообледенительной системы для конденсатора, данная схема является почти полным повторением патента Кинселла (рис. 4). 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:

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

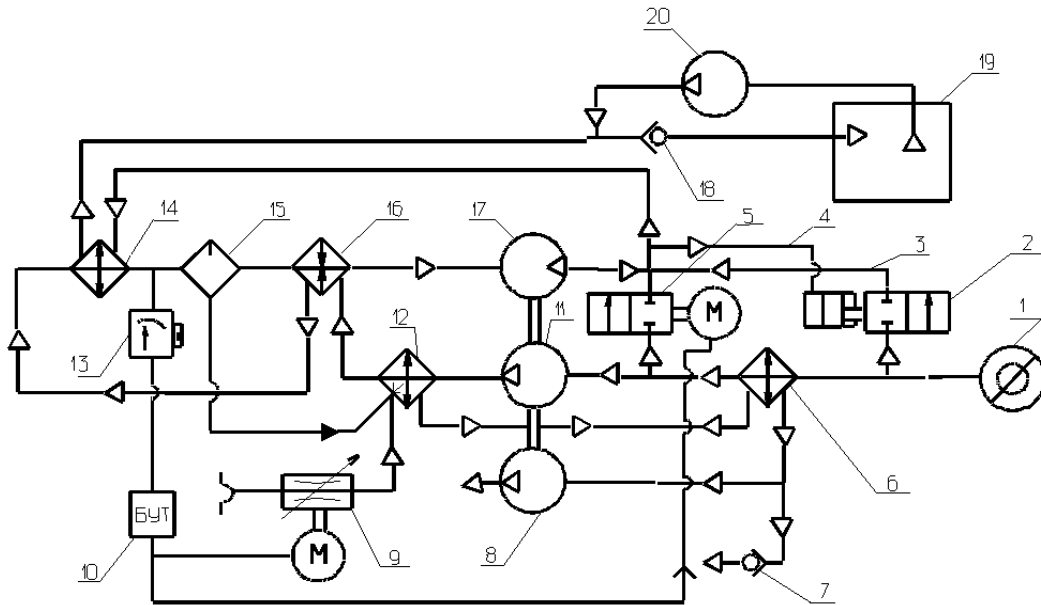


Рис. 5. СКВ самолета А - 310:

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; 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; 19 - гермокабина (ГК); 20 - нагреватель линии рециркуляции

Принципиальная схема работы СКВ самолетов семейства Аэробас. На рис. 6 представлена схема особенностей компоновки и работы СКВ фирмы Аэробас на примере самолета Суперджет-100. В частности, показано распределение сжатого воздуха от двигателя самолета через узел охлаждения до входа в кабину самолета. Узел охлаждения состоит из: УПО (первичный и основной теплообменники), турбохолодильной установки (ТХУ), конденсаторного блока (конденсатор, регенератор, влагоотделитель), системы воздухопроводов для продувки УПО и смешения с рециркулируемым воздухом из кабины самолета. Отличительная черта схемы – установка двухходового основного теплообменника УПО, а также верхнее расположение УПО и нижнее расположение ТХУ в конструкции моноблока узла охлаждения.



Рис. 6. Принципиальная схема работы СКВ самолетов семейства Аэробас

Особенности СКВ фирмы Туполева

Схема СКВ самолета ТУ-204. Наиболее близка настоящая схема к СКВ самолета Боинг-757. Отличительными признаками схемы являются (рис. 7) :

- 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.
- 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 20 и подмеса горячего воздуха на вход конденсатора через клапан 3.

Принципиальная схема работы СКВ самолетов семейства Туполев. На рис. 8 представлена схема особенностей компоновки и работы СКВ фирмы Туполев. В частности, показано распределение сжатого воздуха через узел охлаждения до входа в кабину самолета. Узел охлаждения состоит из: УПО (первичный и основной теплообменники), турбохолодильной установки (ТХУ), конденсаторного блока (конденсатор, регенератор, влагоотделитель), системы воздухопроводов для продувки УПО и смешения с рециркулируемым воздухом из кабины самолета. Отличительная черта схемы – установка одноходового основного теплообменника УПО, а также нижнее расположение УПО и верхнее расположение ТХУ в конструкции моноблока узла охлаждения.

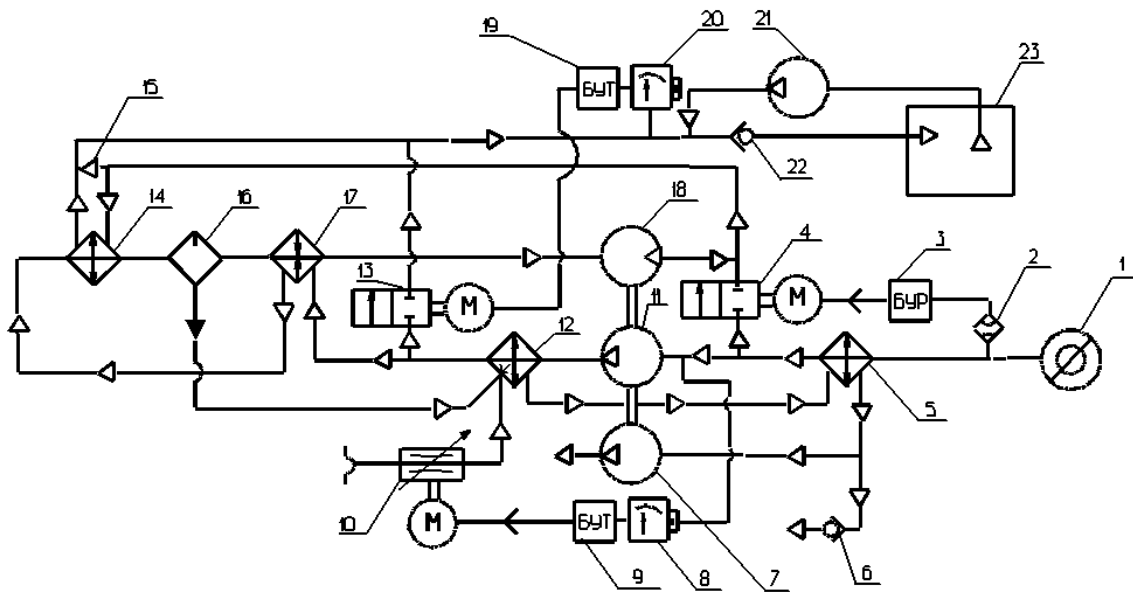


Рис. 7. СКВ самолета Ту - 204:

1 - отбор ВВД; 2 - датчик расхода; 3 - блок управления расходом; 4 - клапан обводной линии; 5 - первичный теплообменник; 6 - обратный клапан; 7 - вентилятор; 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 управления температурой; 20 - датчик температуры; 21 - нагреватель линии рециркуляции; 22 - обратный клапан гермокабины (ГК); 23 - ГК

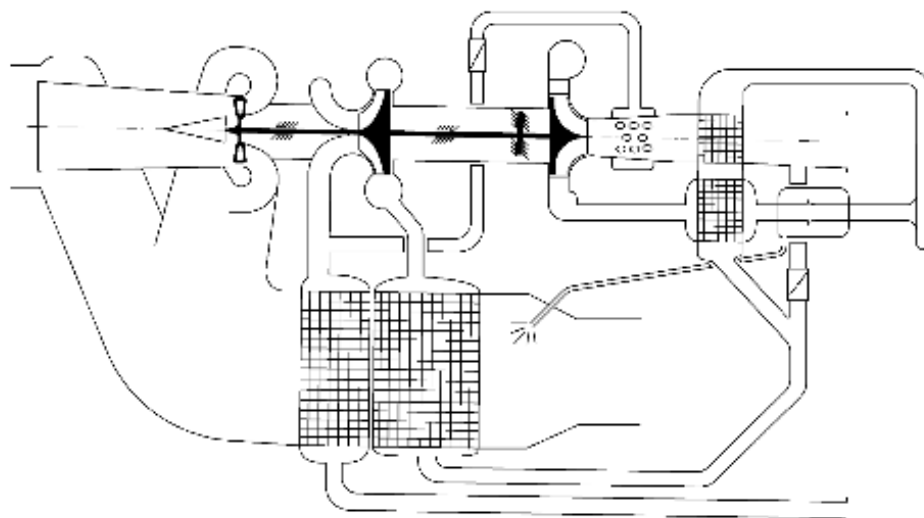


Рис. 8. Принципиальная схема работы СКВ самолетов семейства Туpoleв