



## СКВ С ОТДЕЛЕНИЕМ ВЛАГИ НА ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ

### 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 приводит к тому, что в некотором "сечении" СКВ достигается состояние "точки росы", когда влага переходит из парообразного состояния в жидкое. Положение "точки росы" зависит от структуры СКВ, режима её работы, а также от параметров заборного воздуха. Наиболее часто встречаются следующие два случая. В простейших СКВ открытого типа (ВВР + ТХ) состояние "точки росы" достигается в проточной части турбохолодильника и часто называется конденсацией в линии низкого давления (КНД). В СКВ нового поколения типа "петля" (ВВР + ТХ + ВВР), а также в комбинированных СКВ состояние "точки росы" получается до ТХ в каналах теплообменника и по аналогии называется конденсацией в линии высокого давления (КВД). Необходимо также подчеркнуть, что в целом ряде случаев в СКВ могут присутствовать оба случая КНД и КВД одновременно. В частности, в комбинированных СКВ и "петлях" оставшийся после КВД водяной пар приводит к дополнительной конденсации влаги в ТХ 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 КНД. Если также учесть, что часть теплообменной поверхности 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.

**Проблемы охлаждения влажного воздуха при КНД.** Для технической реализации КНД в ТХ и последующего отделения сконденсировавшейся влаги необходимо решить следующие научно-технические проблемы:

- исследовать механизмы конденсации водяного пара в проточной части ТХ;
- изучить 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.



***Проблемы охлаждения влажного воздуха при КВД.*** Для технической реализации КВД до ТХ необходимо решить комплекс научно-технических проблем:

- исследовать особенности и механизмы конденсации водяного пара при высоком давлении воздуха в теплообменных каналах конденсатора (горячий тракт);
- спроектировать надёжные конструкции влагоотделителей, способные сепарировать 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 КВД;
- 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 КВД и КВД ставит множество специфических научно-технических проблем, связанных с особенностями теплообмена 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) организована в НЭТИ в середине 60-х годов по инициативе зав.кафедрой "Теоретические основы теплотехники" 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. На базе научного и педагогического коллектива ОНИЛОС была открыта в 1986 году специальность "Системы жизнеобеспечения и оборудования ЛА". Впоследствии в 1984 году была создана выпускающая кафедра "Механического оборудования ЛА" (МОЛА), которая с 1998 года переименована в кафедру "Техническая теплофизика" (ТТФ) Новосибирского государственного технического университета (НГТУ). На опыте развития и становления ОНИ-



ЛОС – МОЛА –ТТФ можно проследить несколько этапов возникновения и решения проблем работы СКВ на влажном воздухе.

**Первый этап (60-е – начало 70-х годов).** Первоначальный интерес к влажному воздуху возник при решении задачи воздушно–испарительного теплообменника для высотных полетов. На крейсерских эшелонах выше 10 км плотность воздуха более чем в 5 раз ниже наземной, что многократно снижает эффективность работы теплообменников СКВ. Практически одновременно появилась группа задач воздушно-испарительных охладителей для снятия пиковых тепловых нагрузок при работе в "горячей" атмосфере. При наземной работе СКВ в зонах жаркого климата 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 этого 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 м. При этом наблюдалось заполнение кабины самолета мелким туманом. Проблема была решена путем установки в систему специального влагоотделителя низкого давления (ВОНД), осуществляющего захват тумана и его удаления из системы кондиционирования. Внешне простая задача имела одну, но существенную проблему – мелкодисперсный туман практически не улавливался обычными инерционными уловителями. Постепенно, по мере усовершенствования конструкции ВОНД, удалось поднять эффективность отделения влаги с 30 до 60 %, а последние образцы позволяли достигать 95 % эффективности работы.

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), препятствующее нормальной работе летчиков. Проблема решалась путем разработки индивидуальных и кабинных увлажнителей.

**Третий этап (80-е годы).** Связан с переходом основных мировых фирм на СКВ нового поколения 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). Данная техническая задача потребовала решения следующих проблем: проведение экспериментального исследования работы подсистемы

"петля" на влажном воздухе; численное моделирование работы системы кондиционирования ТУ-204 для исследования её работоспособности на влажном воздухе; оптимизация конструкции конденсатора с целью предотвращения его обмерзания; разработка 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; испарению 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 по влажному воздуху связана с решением поисковых исследовательских задач: 1) разработка воздушно-испарительных систем охлаждения для самолетов малой авиации, вертолетов и автомобилей; 2) исследование работы и оптимизация первичного теплообменника СКВ; 3) оптимизация СКВ при работе на влажном воздухе.

## 1.2. ВЫСАЖДЕНИЕ ВЛАГИ В ЛИНИИ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

### КОНДЕНСАЦИЯ НА НИЗКОМ ДАВЛЕНИИ

**Недостатки КНД.** 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

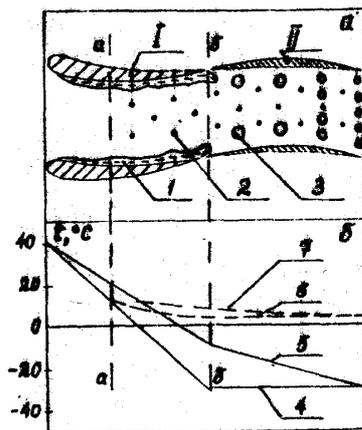


Рис. 1. Схема процесса конденсации в проточной части турбохолодильника: *a* – кинетика процесса, *б* – эпюры температур; *I* – сопловые лопатки, *II* – рабочие лопатки; *1* – плёнка жидкости, *2* – мелкодисперсный аэрозоль, *3* – крупнодисперсный аэрозоль; *4, б* – активная турбина, *5, 7* – реактивная турбина

на последней ступени охлаждения СКВ (в турбохолодильнике) заметную часть времени полёта происходит конденсация на низком давлении. 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 ухудшается видимость (туман непрозрачный), наблюдается увлажнение остекления и поверхностей. Этот недостаток наиболее виден на примере противоракетного маневра самолета: при



его резком пикировании кабина начинает наполняться туманом;

– при забросе тумана в отсеки с радиоэлектронным оборудованием может произойти выход его из строя;

– при поступлении тумана в подкостюмное пространство ввиду переувлажнения ухудшаются условия работы летчика.

**Механизмы КНД.** Особенности конденсации водяного пара в проточной части ТХ можно проследить на схеме рис. 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 получается только на срезе рабочих лопаток.

**Сечение "точки росы".** В случае подачи влажного воздуха на ТХ картина резко меняется. 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.

**Гомогенная конденсация.** В связи с тем, что максимальная скорость потока газа приходится на ядро потока, там же располагается и минимальная температура газа. Одновременный отвод тепла по всему сечению потока приводит к тому, что в проточной части ТХ возникает явление *гомогенной* конденсации: каплеобразование протекает в ядре потока на частицах пыли, взвешенных в нём. В результате образуются аэрозольные частицы (рис. 5.1, цифра 2) диаметром 0,5...1,5 мкм. Причем дальнейшего роста диаметра частиц по мере охлаждения не происходит – вся избыточная влага расходуется на образование новых частиц и увеличение их концентрации.

**Аэродинамическое дробление (диспергирование).** Если на входе в турбину присутствует сконденсировавшаяся влага, она образует жидкую пленку или ручейки *I*, 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 диаметров 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 теплообмена 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 жидком состоянии. Лишь при дальнейшем снижении температур наблюдается "постепенная" "кристаллизация" аэрозоля, "завершающаяся" при  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Однако наибольшие трансформации претерпевает механизм 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" жидкого состояния в сравнении с аэрозольным незначителен. При этом происходит качественный скачок: ТХ из "генератора тумана" превращается в "генератор снега". 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. Если за ТХ стоит конденсатор, его входной фронт забивается снегом, если там элементы 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".

#### ЭЛЕМЕНТЫ ПОДСИСТЕМЫ КНД

**Состав элементов и требования к ним.** Подсистема для высаждения влаги в линии низкого давления состоит из ТХ, влагоотделителя низкого давления (ВОНД) и элементов автоматики для борьбы с обмерзанием. К подсистеме предъявляются следующие требования:

- общетехнические ограничения 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 с КНД 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. Температуру за турбиной регулируют 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 происходят 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 ВОНД необходимо предусматривать незамерзающие перепускные клапаны, сбрасывающие воздух мимо коагулятора при повышении давления 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 необходим источник энергии: подкачивающий насос или воздух высокого давления.

### 1.3. ВЫСАЖДЕНИЕ ВЛАГИ В ЛИНИИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

#### КОНДЕНСАЦИЯ 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 негативные 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.

**Механизмы 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.

**Гетерогенная конденсация.** Особенности конденсации водяного пара в каналах теплообменника можно проследить на рис. 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.

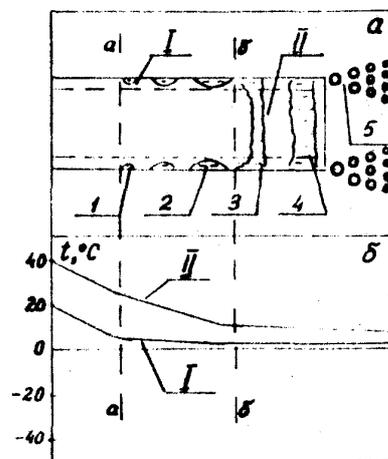


Рис. 2. Схема процесса конденсации в канале теплообменника: *a* – кинетика процесса, *б* – эпюры температур; *I* – пограничный слой, *II* – ядро потока; 1 – капля, 2 – одиночный ручеек, 3 – сплошная пленка, 4 – водяная пробка, 5 – капельная "завеса"

В результате в некотором сечении *a*, где температура потока достигла значения "точки росы", на стенке образуются 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 сбиваются в отдельные ручейки 2. В случае глубокого охлаждения (температура ядра потока существенно ниже "точки росы") и наличия большого количества влаги могут формироваться "островки" или сплошные плёнки 3. Из-за малого диаметра теплообменных каналов как ручейки, так и пленка могут смыкаться и создавать небольшие водяные пробки,двигающиеся со скоростью несущей среды. После достижения ручейком, пленкой или водяной пробкой среза канала происходит их разрушение: пробка разбивается на крупные капли, а ру-

– 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.

чейки и пленка срываются 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 местах "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.

### ЭЛЕМЕНТЫ ПОДСИСТЕМЫ КВД

**Состав элементов.** Подсистема для высаживания влаги на высоком давлении состоит 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. 3).

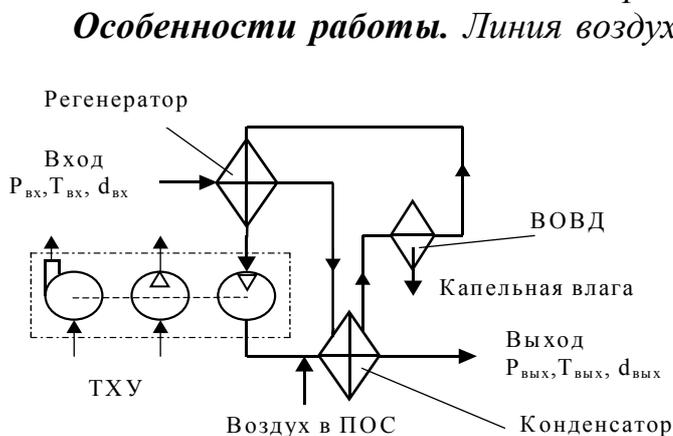


Рис. 3. Подсистема высаживания влаги на высоком давлении

ВВД поступает в регенератор, где подогревается "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. Далее двухфазный поток поступает в холодный тракт конденсатора, в котором происходит повышение температуры ВВД и испарение капель аэрозоля. За конденсатором на выходе из подсистемы высаждения получается ВВД с рабочей температурой  $-8\dots-10$  °С с частично или даже полностью испарённым аэрозолем.

Физической основой работы подсистемы является использование "холода" ВВД (за турбиной ТХ) для его охлаждения ВВД (до турбины ТХ) до температуры ниже "точки росы". Для реализации этого процесса и применяется 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.

**Свойства подсистемы высаждения 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  $+5\dots+10$  °С. Именно эти значения определяют предельные возможности осушки воздуха данным методом. В частности, при величине абсолютного давления в подсистеме до ТХ на уровне  $P_{\text{ВВД}} = 4$  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  $d_{\text{вх}} = 30$  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  $70\dots100$  °С до уровня  $5\dots40$  °С. Как следствие происходит существенное снижение температуры на выходе турбины ТХ в область отрицательных температур. В случае влажного воздуха она может составлять  $-28\dots-30$  °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 г 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. Основную опасность представляет обмерзание фронта теплообменника, что приводит к повышению давления за турбиной и выходу системы на нерасчётные режимы работы. Для предотвращения этого 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 выше нуля и произвести "оттаивание" теплообменной поверхности. Такая система называется противообледенительной (ПОС) и служит в качестве аварийной, так как в штатных режимах работы обмерзание не должно происходить.