



ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛООБМЕННИКА-КОНДЕНСАТОРА

1. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ТЕПЛООБМЕННИКА-КОНДЕНСАТОРА

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 забортного воздуха. Наиболее часто встречаются следующие два случая. В простейших СКВ открытого типа (ВВР + ТХ) состояние точки росы достигается в проточной части турбоохладителя 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 КНД и КВД ставит множество специфических научно-технических проблем, связанных с особенностями тепломассообмена в элементах СКВ при работе на влажном воздухе. Одной из актуальных задач реализации КВД и является теплообменник-конденсатор. Основная его проблема: на рабочем режиме с отрицательными температурами холодного воздуха он не должен обмерзать.

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 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. 1.1, *а, б*. По мере ускорения

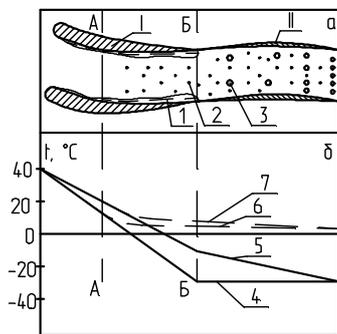


Рис. 1.1. Схема процесса конденсации в проточной части турбохолодильника: *а* – кинетика процесса, *б* – эпюры температур; *I* – сопловые лопатки, *II* – рабочие лопатки; *1* – плёнка жидкости, *2* – мелкодисперсный аэрозоль, *3* – крупнодисперсный аэрозоль; *4, 6* – активная турбина, *5, 7* – реактивная турбина

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–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 *6*, сечение *А – 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 *6*) снижается лишь незначительно. В реактивной турбине (линия *7*), где на сопловых лопатках отвод тепла осуществляется менее интенсивно, сечение точки росы (начала конденсации) *А – А* смещается далее по ходу потока. Кроме того, процесс конденсации водяного пара "сдвигается" 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. 1.1, 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 $B - B$), 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 °С и остаются в переохлаждённом жидком состоянии. Лишь при дальнейшем снижении температур наблюдается "постепенная" "кристаллизация" аэрозоля, "завершающаяся" при -40 °С. 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 °С, 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 происходят дополнительные процессы их "обледенения".



ЭЛЕМЕНТЫ ПОДСИСТЕМЫ КНД

Состав элементов и требования к ним. Подсистема для высаживания влаги в линии низкого давления состоит из ТХ, влагоотделителя низкого давления (ВОНД) и элементов автоматики для борьбы с обмерзанием.

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 высаживания 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. 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 А – А, 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 пленки 3. Из-за малого диаметра теплообменных каналов как ручейки, так и пленка могут смыкаться и создавать небольшие водяные пробки, двигаю-

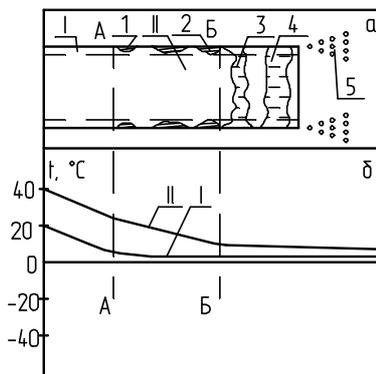


Рис. 1.2. Схема процесса конденсации в канале теплообменника: *а* – кинетика процесса, *б* – эпюры температур; *I* – пограничный слой, *II* – ядро потока; 1 – капля, 2 – одиночный ручеек, 3 – сплошная пленка, 4 – водяная пробка, 5 – капельная "завеса"

большого количества влаги могут формироваться "островки" или сплошные пленки 3. Из-за малого диаметра теплообменных каналов как ручейки, так и пленка могут смыкаться и создавать небольшие водяные пробки, двигаю-

щиеся со скоростью несущей среды. После достижения ручейком, пленкой или водяной пробкой среза канала происходит их разрушение: пробка разбивается на крупные капли, а ручейки 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. 1.3).

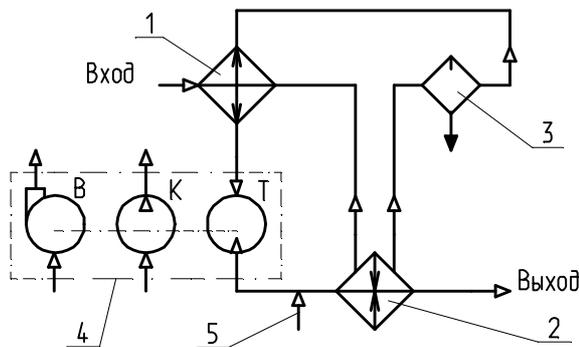


Рис. 1.3. Подсистема высаживания влаги на высоком давлении

продувочного воздуха первичного теплообменника. Осушенный ВВД поступает в регенератор 1, где подогревается "входящим" в подсистему свежим горячим воздухом. Далее осушенный и подогретый ВВД подаётся на турбину ТТХ 4.

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 2, в котором происходит повышение температуры ВНД и испарение капель аэрозоля. За конденсатором на выходе из подсистемы высаживания получается ВНД с рабочей температурой $-8\dots-10$ °С с частично или даже полностью испарённым аэрозолем.

Физической основой работы подсистемы является использование "холода" ВНД (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 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 $+5\dots+10$ °С. Именно эти значения определяют предельные возможности осушки воздуха данным методом. В частности, при величине абсолютного давления в подсистеме до ТХ на уровне $P_{ВВД} = 4$ 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 высаживания достаточно высокая.

Снижение температуры в ТХ. По сравнению с обычной схемой СКВ наличие подсистемы высаживания 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.

1.4. СХЕМА И ПРИНЦИП РАБОТЫ КОНДЕНСАТОРА

Конструктивная схема конденсатора показана на рис. 1.4, а, б. Конденсатор обычно изготавливается в виде перекрестно-точного пластинчаторебристого компактного теплообменника. Такой теплообменник получается следующим образом: между двумя пластинами 1 с толщиной 0,8...1 мм располагается гофрированная поверхность 2, полученная прессованием из дюралевой "фольги" толщиной 0,1...0,15 мм. После пайки по специальной технологии они совместно образуют оребренную пластину, в которой газ может двигаться вдоль гофра по параллельным каналам. Эквивалентный диаметр единичного канала зависит от расстояния между пластинами и типа гофрированной поверхности и обычно находится в диапазоне 1...5 мм. Края 4 оребренной пластины запаиваются, чтобы препятствовать выходу из него воздуха.

Далее оребренные пластины горячего 3 и холодного 5 воздуха, чередуясь между собой, собираются в теплообменную секцию 6, которая с помощью пайки соединяется в неразъемную конструкцию. За счет поперечного расположения горячих 3 и холодных 5 пластин получают два независимых тракта для прохода горячего и холодного воздуха. Для подвода и отвода воздуха к теплообменной секции к ней привариваются крышки 7 и патрубки 8.

В силу того, что по холодному тракту движется воздух низкого давления, а по горячему тракту – воздух высокого давления, оребренные пластины

3 и 5 образованы из разных гофров. В частности, поскольку расходы горячего и холодного газов равны, а плотность горячего газа в несколько раз выше, горячие оребренные пластины имеют меньшее живое сечение (меньший эквивалентный диаметр). Этим добиваются создания по горячему тракту такой же скорости газа, как и у холодного воздуха, чтобы иметь близкие коэффициенты теплоотдачи с обеих сторон.

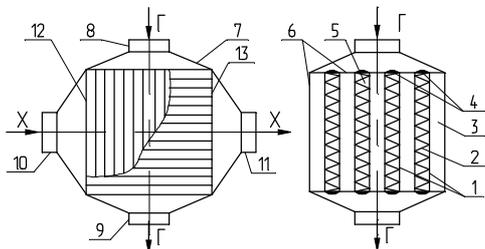


Рис 1.4. Конструктивная схема конденсатора: *а* – схема движения теплоносителя, *б* – разрез поперёк холодного теплоносителя. 1 – пластина, 2 – гофрированное оребрение, 3 – оребренные пластины для горячего воздуха, 4 – герметичные вставки, 5 – оребренные пластины для холодного воздуха, 6 – теплообменная секция, 7 – сварная крышка, 8, 9 – патрубки входа и выхода горячего воздуха, 10, 11 – патрубки входа и выхода холодного воздуха, 12, 13 – холодный и горячий входной фронт теплообменной секции

Работа конденсатора происходит следующим образом. Холодный воздух из ТХ подается на патрубок 10 и с помощью крышки разводится по всему холодному фронту 12. Обтекая кромки оребренных пластин 3, холодный воздух со взвешенным в нем туманом устремляется по каналам оребренных пластин 5. Двигаясь по ним, холодный воздух забирает тепло от стенок (пластины и гофров), нагревается и выбрасывается в патрубок отвода 11 холодного воздуха. Горячий воздух высокого давления поступает на патрубок 8 и разводится крышкой 7 по горячему фронту 13.

Проходя по межреберным каналам горячей пластины 3, он вступает в теплообмен со стенками каналов. В частности, имея более высокую температуру, он отдает тепло стенкам (пластинам и ребрам), охлаждается и отводится из теплообменника по патрубку 9. Образующийся в горячих каналах конденсат выносится несущим потоком в крышку и патрубок 9, где наблюдаются многократные процессы соударения капель между собой и со стенками. Последнее приводит к укрупнению капель и образованию на выходе патрубка 9 многочисленных ручейков, выносимых скоростным напором в трубопровод за теплообменником.

2. ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В КОНДЕНСАТОРЕ

2. ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В КОНДЕНСАТОРЕ

2.1. ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР В КОНДЕНСАТОРЕ

Интенсивность процессов тепломассообмена в горячем и холодном трактах в значительной степени определяется температурой теплообменной поверхности, разделяющей теплоносители. Например, если её значение окажется выше точки росы, процесс конденсации на данном участке каналов будет отсутствовать. Поэтому, прежде чем перейти к описанию тепломассообменных процессов, целесообразно рассмотреть, как изменяются поля темпе-

ратур горячего, холодного теплоносителей и теплообменной поверхности в

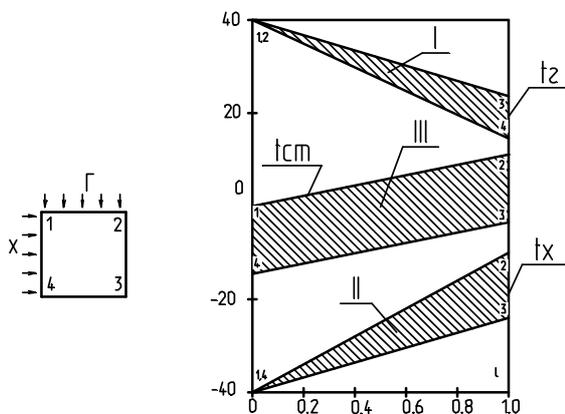


Рис.2.1. Схема полей температур в конденсаторе: *a* – координатная сетка, *б* – поля температур. *I* – температура горячего теплоносителя, *II* – температура холодного теплоносителя, *III* – температура пластины; 1-4 – номера углов пластины в координатной сетке

часть горячего теплоносителя,двигающаяся от точки 1 к точке 4, поступает в теплообменник первой и все время охлаждается свежими порциями холодного воздуха, имеющими самую минимальную температуру. В свою очередь, часть горячего теплоносителя,двигающаяся от точки 2 к точке 3, поступает в КПРТ последней и охлаждается уже подогретым холодным воздухом. В итоге на выходе теплообменника горячий теплоноситель имеет разную температуру: в сечении 3 – превышающую среднее значение, а в сечении 4 – меньшую, чем среднее значение.

Холодный теплоноситель. На входе холодного фронта (сечение 1-4) температура воздуха одинакова и минимальна во всем конденсаторе. По мере движения теплоносителя его температура растет. Наиболее прогреваются слои воздуха по горячему фронту теплообменника (сечение 1-2), так как они участвуют в теплообмене с самым горячим воздухом. Слабее всего нагреваются слои воздуха по выходному сечению горячего воздуха (сечение 4-3), так как их обогревает уже "отработавший" горячий теплоноситель. В выходном сечении холодный теплоноситель имеет разную температуру, в частности, в направлении к точке 3 – ниже средней, к точке 2 – выше средней.

Теплообменная поверхность (пластина). Температура пластины зависит от температур теплоносителей, а также от соотношения их термических сопротивлений (или интенсивности теплоотдачи) в соответствующем сечении поверхности. Например, в точке 2, где температуры обоих теплоносителей самые большие, температура пластины максимальна. И, наоборот, в

конденсаторе (рис. 2.1, б). Для удобства восприятия на рис. 5.2.1, *a* изображена схема подведения теплоносителей и введена нумерация углов теплообменной пластины, так что линия 1-2 является горячим фронтом теплообменника, а линия 1-4 – холодным фронтом.

Горячий теплоноситель.

На входе в теплообменник (линия 1-2) температура горячего воздуха одинакова. По мере движения теплоносителя его температура падает, причем в сечении 1-4 охлаждение максимально, а в сечении 2-3 – минимально. Неравномерность охлаждения температуры объясняется следующим:



точке 4 температура пластины минимальна, так как в этом месте оба теплоносителя имеют самую низкую температуру. Таким образом, максимальный градиент температуры наблюдается по диагонали пластины 2 - 4. Самая горячая точка пластины 2 расположена по горячему фронту теплообменника на выходе холодного тракта, а холодная точка пластины 4 – по холодному фронту на выходе горячего тракта.

Остальные сечения пластины имеют промежуточные значения температур между максимальной и минимальной, причем значение температуры связано линейным образом с координатой пластины. Местоположение среднего значения температуры находится в геометрическом центре пластины. Температурами, близкими к средней, обладают точки, расположенные по диагонали пластины 1-3 (линия минимального градиента температур). "Горячая" половина пластины находится выше этой диагонали и ограничена линией горячего фронта 1-2 и выходными сечениями по холодному тракту 2-3. "Холодная" половина пластины располагается ниже диагонали 1-3 и ограничена сечениями холодного фронта 1-4 и выхода горячего тракта 4-3.

Влияние на поле температур пластины термических сопротивлений теплоносителей носит следующий характер. Если термические сопротивления (интенсивность теплоотдачи) одинаковы, то температура пластины располагается посередине между температурами теплоносителей. Если же у одного теплоносителя термическое сопротивление больше (интенсивность теплоотдачи ниже), то температура пластины смещается в сторону другого теплоносителя.

Описанная выше структура полей температур теплоносителей соответствует случаю однофазной конвекции, когда оба теплоносителя не имеют влаги. При наличии влаги и тепломассообмена хотя бы в одном тракте равномерный характер изменения полей температур нарушается. Качественная картина полей температур остается такой же.

2.2. КОНДЕНСАЦИЯ ВЛАГИ В ГОРЯЧЕМ ТРАКТЕ

Механизм конденсации подробно описан выше и соответствует случаю конденсации на высоком давлении. В настоящем разделе будут описаны две особенности конденсации влаги. Одна непосредственно связана с полями температур в теплообменнике, образующими несколько характерных зон тепломассообмена. Вторая связана с влиянием давления сжатого воздуха на состояние точки росы.

Зоны конденсации влаги. В зависимости от значения температуры пластины и теплоносителя по сравнению с точкой росы можно выделить следующие зоны тепломассообмена (рис. 2.2). В самой "горячей" части пластины может существовать участок I, где температура поверхности выше точки росы и конденсация отсутствует. Далее по ходу горячего теплоносителя следует участок II, где температура пластины ниже точки росы, а в ядре тепло-

носителя выше её. Масса пара, содержащегося в пристенном пограничном слое, недостаточна для образования капелек, и пластина остается сухой. На участке *III* температура в ядре теплоносителя становится ниже точки росы. Массы пара достаточно для образования на пластине капель жидкости (капельная конденсация), но процесс малоинтенсивный. На участке *IV* температура в ядре потока существенно ниже точки росы: на поверхности образуются ручейки, пленки (или водяные пробки). Участок *V* отличается от предыдущего тем, что температура пластины ниже нуля градусов, и при длительной работе теплообменника здесь может образоваться лед. При замерзании живого сечения оребренных каналов прекращается поступление в них горячего теплоносителя.

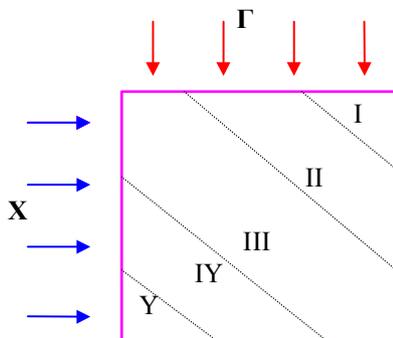


Рис. 2.2. Зоны конденсации влаги в конденсаторе: *I* – сухой участок, *II* – участок переувлажнения: точка росы достигнута, но конденсации нет, *III* – капельная конденсация, *IV* – ручейковая и пленочная конденсация, *V* – зона обмерзания

В зависимости от режима работы теплообменника возможно наличие тех либо иных вариантов зон конденсации на пластине. Оптимальный случай, когда наибольшая часть поверхности работает в зоне капельной (*III*) и ручейковой конденсации (*IV*). Если завысить температуру, пластина будет работать в "сухих" областях *I* и *II*, где конденсация отсутствует. И, наоборот, если занижить рабочие температуры, пластина "уйдет" в наихудшую *V* область работы, когда возможно замерзание влаги в горячем тракте.

Особенности конденсации

влаги на высоком давлении. До настоящего момента процесс конденсации описывался через термин точка росы, т.е. момента перехода пара в жидкость, когда относительная влажность составляет 100 %. Значение температуры, при которой достигается это состояние, зависит от количества влаги, а также от давления воздуха (рис. 2.3). Влияние влаги на температуру точки росы носит крайне нелинейный (экспоненциальный) характер: при линейном уменьшении количества влаги точка росы с возрастающей скоростью устремляется в область отрицательной температуры. В диапазоне влагосодержаний 5...20 г/кг с.в. точка росы изменяется для атмосферного давления в диапазоне 0...25 °С соответственно.

Влияние давления имеет в целом линейный характер. Минимальное значение температур точек росы наблюдается при атмосферном давлении (0,1 МПа). Увеличение давления сопровождается пропорциональным ростом температур точек росы. В диапазоне влагосодержания 5...20 г/кг с.в. состояние точки росы смещается при давлении 0,2 МПа в область 10...35 °С, а при

давлении 0,4 МПа до значений температур 20...55 °С. Из последнего примера вытекает два преимущества конденсации на высоком давлении по сравнению с конденсацией на низком давлении. Во-первых, температурное: для получения процесса конденсации на высоком давлении требуются и большие температуры воздуха. Во-вторых, влажностное: при одинаковом диапазоне температур воздуха на высоком давлении получается более глубокая "осушка", поскольку количество влаги, находящейся в паровом состоянии, резко сокращается.

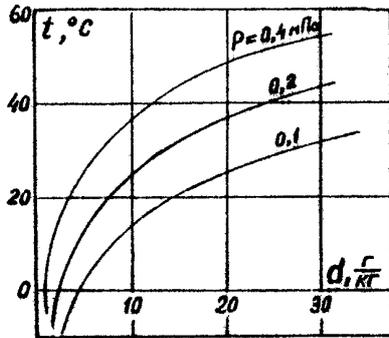


Рис. 2.3. Влияние давления и влагосодержания воздуха на температуру точки росы

Для этого желательно, чтобы температура горячего воздуха на входе в теплообменник была как можно ближе к состоянию точки росы, а температура пластины – как можно ниже этого состояния. В этом случае процесс конденсации начинается с первых сечений горячих каналов и охватывает всю поверхность пластины.

Диаграмма 2.3 позволяет при заданном давлении сжатого воздуха подобрать наиболее оптимальные температуры в конденсаторе. Для этого желательно, чтобы температура горячего воздуха на входе в теплообменник была как можно ближе к состоянию точки росы, а температура пластины – как можно ниже этого состояния. В этом случае процесс конденсации начинается с первых сечений горячих каналов и охватывает всю поверхность пластины.

В этом случае процесс конденсации начинается с первых сечений горячих каналов и охватывает всю поверхность пластины.

2.3. ИСПАРЕНИЕ ТУМАНА В ХОЛОДНОМ ТРАКТЕ

Наличие трехфазного потока "воздух – водяной аэрозоль – ледяные частицы" на входе холодного тракта существенно изменяет процессы теплообмена в теплоносителе по сравнению с сухим воздухом. При этом усложняется механизм теплообмена, а также образуются несколько характерных участков тепломассообмена.

Механизм испарения тумана. Упрощенная схема процесса испарения частиц изображена на рис. 2.4. Полидисперсный аэрозоль 0,5...15 мкм равномерно распределен по сечению канала и ввиду незначительности инерционных сил на стенки канала не оседает. Поперечное сечение канала условно можно разделить на две части: в пристенном пограничном слое 1 масса частиц мала, а температура самая высокая; в ядре потока 2 сконцентрирована основная масса частиц и температура в потоке самая низкая. В каком бы сечении ни находилась частица, испарение жидкости с ее поверхности происходит до тех пор, пока температура окружающего ее воздуха не повысится до значения точки росы. После перехода состояния точки росы испарение прекращается, так как частицы исчезают. Всё тепло уходит на нагрев воздуха.

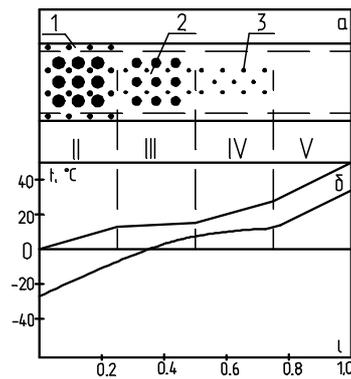


Рис. 2.4. Схема испарения тумана в канале теплообменника: *a* – кинетика процесса, *б* – эпюра температур. *II* – участок с "мокрым" пограничным слоем, *III* – участок с "высыхающим" пограничным слоем, *IV* – участок с "высыхающим" ядром потока, *V* – сухой участок. *1* – пограничный слой, *2* – ядро потока, *3* – частицы тумана

ламинарным подслоем (III): температуры на стенке и в ламинарном подслое становятся выше точки росы. Ввиду небольшой толщины подслоя и малой массы частиц протяженность участка небольшая.

Участок с "высыхающим" ядром (IV): температура точки росы перемещается в турбулентное ядро пограничного слоя. Протяженность зоны значительно больше предыдущей. Поток теплоносителя представляет собой "мокрое" ядро (со взвешенным туманом) потока, скользящее в "сухом" кольцевом слое воздуха.

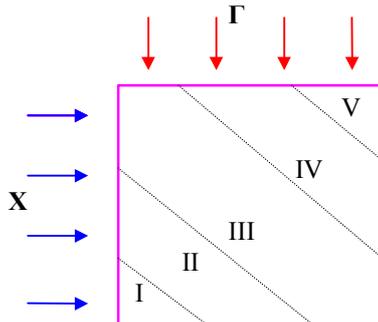


Рис.2.5. Зоны испарения тумана в конденсаторе: *I* – участок обмерзания, *II* – участок с "мокрым" пограничным слоем, *III* – участок с "высыхающим" пограничным слоем, *IV* – участок с "высыхающим" ядром потока, *V* – сухой участок

температур пластины приводит к следующей общей картине тепломассооб-

В зависимости от сочетания температур в слоях *1* и *2* по сравнению с температурой точки росы возможны следующие участки тепломассообмена.

Участок с "мокрым" пограничным слоем (II): температуры в ядре, пограничном слое и на стенке канала меньше точки росы. Практически все подводимое тепло расходуется на испарение влаги и лишь незначительная часть идет на нагрев воздуха. Испарение интенсивнее протекает в пограничном слое, где количество частиц и их величина уменьшаются быстрее, чем в ядре.

Участок с "высыхающим"

Участок однофазного течения (V): после того как температура точки росы достигнет осевого сечения, в потоке не останется ни одной капли и вся влага перейдет в парообразное состояние. Подводимое к теплоносителю тепло расходуется только на нагрев газа.

Зоны испарения тумана. Наложение описанных выше участков тепломассообмена в одиночном канале на поле температур пластины приводит к следующей общей картине тепломассооб-



мена в теплообменнике (рис. 5.2.5). В самом "холодном" углу пластины может существовать зона обмерзания *I*, где температура пластины отрицательна. Любая влага, выпавшая на стенку каналов, не может быть расплавлена и, следовательно, может забить и перекрыть живое сечение каналов. На участке пластины, где температура пластины выше нуля градусов, но ниже точки росы образуется зона испарения с "мокрым" пограничным слоем *II*. Далее по мере высыхания пристенных слоев следуют зона *III* с "высыхающим" ламинарным подслоем, зона *IV* с "высыхающим" ядром потока и зона *V* однофазного течения. Зоны тепломассообмена сменяются по диагонали пластины, так что зона однофазного течения *V* приходится на самый "горячий" угол пластины.

При проектировании конденсатора желательно получать такое поле температуры пластины, чтобы зоны *II-IV* охватывали максимальную поверхность пластины. Это связано с тем, что интенсивный тепломассообмен в холодном тракте благоприятно сказывается на протекании конденсации в горячем тракте, так как в этом случае получается более "холодная" пластина, чем при однофазном холодном теплоносителе.

2.4. ОБМЕРЗАНИЕ ВХОДНЫХ КРОМОК В ХОЛОДНОМ ТРАКТЕ

При неблагоприятном стечении обстоятельств конденсатор может попасть в область неустойчивых режимов работы, когда расход и давление холодного теплоносителя начинают "скакать". Это сопровождается следующими неблагоприятными последствиями. Во-первых, пропорционально изменению расхода холодного теплоносителя начинают "плавать" температуры на выходе теплообменника. Во-вторых, резкое увеличение давления в холодном тракте приводит к "подпиранию" турбохолодильника, когда перепад давления на нем, а следовательно, и холодопроизводительность также резко падают. Это приводит к неустойчивой работе системы кондиционирования в целом, когда расход и температуры в ней начинают колебаться, ухудшая комфортные условия в вентилируемых отсеках самолета.

Причиной неустойчивой работы конденсатора являются два одновременно возникающих процесса. С одной стороны, при наличии жидкой влаги до ТХ на холодный фронт теплообменника выбрасывается большое количество снежно-ледяной "шуги" с большим поперечным сечением частиц. С другой стороны, при неблагоприятном режиме или неудачной конструкции теплообменника значительная часть фронтальных кромок пластины имеет отрицательную температуру (зона *I* на рис. 5.2.5 велика). В результате крупные частицы снежно-ледяной "шуги" забивают живое сечение оребренных каналов, а расплавиться не могут и образуют устойчивую пробку, препятствующую движению холодного теплоносителя. Это приводит к резкому возрастанию гидравлического сопротивления холодного тракта и увеличению давления на его входе.

Последнее обстоятельство приводит к временному падению расхода холодного теплоносителя и росту его температуры. Ввиду большой массы конденсатора начинает плавно повышаться температура пластины, пока не поднимется выше нуля градусов. Снежная масса "подплавляется" и выносится через орребренные каналы в виде маленьких пробочек. Освобождение живого сечения восстанавливает работу ТХ, и начинается плавное снижение температуры пластины. Процесс повторяется, так как забивание фронта снегом происходит практически мгновенно, а разогрев пластины – существенно более длительный процесс.

2.5. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕННИКА-КОНДЕНСАТОРА СКВ

НАЗНАЧЕНИЕ И ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ КОНДЕНСАТОРА

Назначение конденсатора. Теплообменником-конденсатором называется теплообменник в СКВ типа "петля",

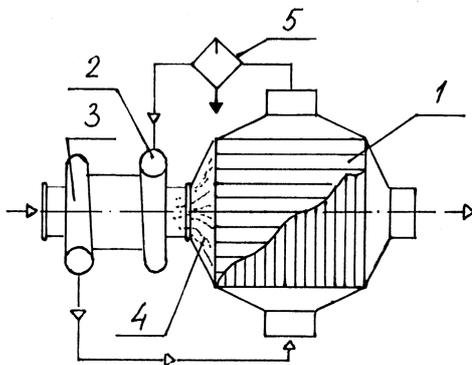


Рис. 2.6. Схема соединения турбохолодильника и теплообменника-конденсатора: 1 – компактный теплообменник, 2 – турбина турбохолодильника, 3 – компрессор турбохолодильника, 4 – аэрозольный туман, 5 – влагоотделитель

устанавливаемый на выходе турбины турбохолодильника. Используется в системе кондиционирования самолета Ту-204 при охлаждении сжатого воздуха (с целью конденсации и последующего удаления из него воды) за счет холодного воздуха с отрицательной температурой, выходящего из турбины. Схема установки и работы конденсатора показана на рис. 2.6.

Особенности работы. После дополнительного сжатия воздуха в компрессоре 3 и охлаждения в ВВТ сжатый воздух подается в горячий тракт конденсатора 1. В результате отвода от него тепла при переходе точки росы происходит капельная конденсация влаги на стенках каналов.

Образующиеся капли выносятся из конденсатора и частично улавливаются влагоотделителем 5. Далее сжатый воздух поступает на турбину 2 турбохолодильника для его охлаждения за счет газодинамического расширения. В проточной части турбины происходят процессы гомогенной конденсации паров воды, а также дробления лопатками турбины капельной влаги, не уловленной влагоотделителем 5. В итоге на выходе турбины образуется аэрозольный туман с диаметрами капель 0,1...15 мкм. При попадании этого тумана в холодный тракт конденсатора 1 происходит практически адиабатное испарение аэрозоля по мере увеличения температуры воздуха. Наличие водного аэрозоля резко увеличивает охлаждающую способность холодного воздуха. Рабочие параметры теплоносителей представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Параметры теплоносителей конденсатора

Параметр	Теплоносители	
	горячий	холодный
Температура	40...60 °С	– 60... – 30 °С
Давление	200...400 кПа	100...120 кПа
Расход	0.5...1.0 кг/с	0.5...1.0 кг/с
Влажность	0...50 г/кг с.в.	0...10 г/кг с.в.

Обмерзание конденсатора. Основная эксплуатационная проблема конденсатора состоит в том, что охлаждающий теплоноситель должен иметь на рабочем режиме отрицательную температуру. В этом случае картина тепломассообмена резко усложняется: во-первых, в воздухе за турбиной наряду с переохлажденным аэрозолем появляются взвешенные частицы снега и льда; во-вторых, начинают происходить нестационарные процессы обледенения-плавления льда на входных кромках теплообменной секции; в-третьих, в горячем тракте возникают условия для замерзания сконденсировавшейся влаги. Недостатки, связанные с обмерзанием, существенно усложняются при отсутствии влагоотделителя 5: в итоге турбина превращается в "генератор" снежной шуги, забивающей выхлопной патрубок турбины и вход теплообменника. При этом происходит перекрытие живого сечения конденсатора и уменьшение расхода воздуха через турбину. Таким образом, при проектировании конденсатора необходимо предусмотреть противообледенительные меры, препятствующие обледенению в горячем тракте и намерзанию снега на передние кромки теплообменной секции в холодном тракте.

ПРОТИВООБЛЕДЕНИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ КОНДЕНСАТОРА

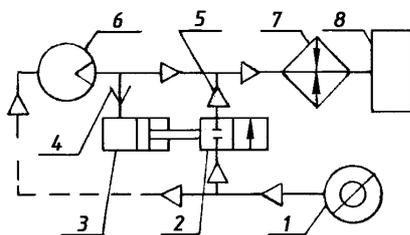


Рис. 2.7. Противообледенительная система конденсатора в СКВ А-310: 1 – отбор ВВД от двигателя, 2 – запорный клапан, 3 – цилиндр пневматического управления, 4 – сигнальная линия давления, 5 – противообледенительная линия подмеса горячего воздуха, 6 – турбоохладитель, 7 – конденсатор, 8 – гермокабина

Конденсатор А-310. Простейшим способом борьбы с обмерзанием является подача на холодный фронт конденсатора горячего воздуха с заведомо положительной температурой. В этом случае "подплавление" и разрушение ледяной пробки начинается до того, как температура пластины поднимется выше нуля градусов. Наиболее удачным примером использования такого приема может служить

противообледенительная система СКВ самолета А-310 (рис. 2.7), применяемая для ликвидации отказа системы из-за обмерзания конденсатора.

В противообледенительную линию горячего воздуха 5 устанавливается запорный клапан 2 с цилиндром 3 пневматического управления. При возрастании давления за ТХ оно передается по сигнальной линии 4 в поршневое пространство пневмопривода. Последний открывает клапан 2 и держит его открытым до тех пор, пока давление за ТХ не упадет до исходного нормального состояния. Достоинства схемы заключаются в максимальной простоте и высокой надежности.

Конденсатор Андерсона (патент США № 1246963). В отличие от предыдущего конденсатора (без вмешательства в его конструкцию) суть это-

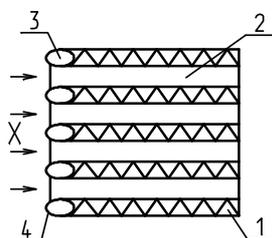


Рис. 2.8. Противообледенительная система конденсатора Андерсона: 1 – горячий пакет, 2 – холодный пакет, 3 – подогревающая трубка – "тепловой нож", 4 – скругление трубки

го и следующего варианта как раз состоит в конструктивном изменении теплообменника. В частности, в варианте Андерсона предлагается обогревать непосредственно входные кромки пластин по холодному тракту (рис. 2.8). При поддержании температуры на них выше нуля градусов поверхность 4 горячего пакета 1 работает как бы в режиме "теплого ножа": выпадающая на нее снежная масса сразу же подплавляется и уносится в каналы холодного тракта. Тем самым предотвращаются отложение

снега на входном фронте и все негативные последствия. Обогревать входные кромки предлагается по принципу воздушно-тепловой противообледенительной системы (ПОС). Для этого в края горячих оребренных пакетов впаивают трубки 3, к которым подводят небольшое количество горячего воздуха, забираемого выше по тракту СКВ. Достоинства ПОС по сравнению с простым подмесом очевидны: это более экономичная и надежная защита от обледенения. Во-первых, она требует меньшего количества горячего газа. Во-вторых, ПОС работает постоянно, в то время как подмес включается эпизодически. В-третьих, и это не менее важно, основная часть пластины остается при низкой температуре, которая к тому же постоянна во времени. Эти условия обеспечивают высокую интенсивность процесса конденсации

Конденсатор Кинселла (патент США № 4352273). Исследования, выполненные при разработке СКВ для самолетов Боинг-757 (767), позволили усовершенствовать дальше ПОС конденсатора (рис. 2.9). В частности, было установлено, что при снижении температуры на выходе СКВ до уровня $-8...-10$ °С (для повышения экономичности) целесообразно примерно треть количества холодного воздуха пропускать мимо конденсатора. Для этой цели предложено разделить теплообменную секцию на две части: верхнюю 1 и

нижнюю II, а между ними создать встроенный в конденсатор обводной канал III. Кроме снижения температуры, это привело к созданию "самооттаивающейся" конструкции конденсатора.

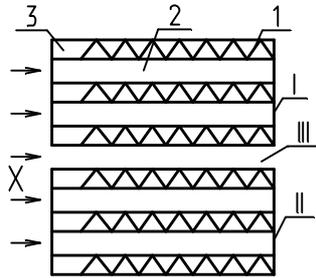


Рис. 2.9. Противообледенительная система конденсатора в СКВ Боинг-757: I, II – верхняя и нижняя теплообменные секции, III – встроенный обводной канал; 1 – горячий пакет, 2 – холодный пакет, 3 – каналы для подогрева входных кромок

Работа обводного канала. Введение канала III приводит к двойному эффекту. С одной стороны, растёт температура ребренных пластин, так как через них проходит меньше холодного воздуха. С другой стороны, в случае забивания снегом части холодного фронта включается механизм "самооттаивания": избыток холодного воздуха устремляется в обводной канал III, а перекрытые ребренные каналы из-за отсутствия в них холодного теплоносителя ускоренно разогреваются. После "подплавления" и сброса снега движение теплоносителя

через отключенные ребренные каналы восстанавливается. Исследование такого конденсатора продемонстрировало высокую устойчивость его работы: колебание температуры холодного воздуха за конденсатором не превышает 2...3 °С, а колебание давления практически отсутствует.

Работа обогревающих трубок в ПОС. Дополнительно установлено, что в широком диапазоне режимов работы конденсатора можно обходиться без подвода к обогревающим трубкам 3 горячего воздуха. В связи с этим предложено упростить их конструкцию до предела; для этого достаточно сократить на несколько гофров горячую ребренную поверхность. Уменьшения гидравлического сопротивления достаточно для увеличения расхода горячего теплоносителя через входные кромки 3 и соответствующего подогрева.

3. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ХОЛОДНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ТЕПЛОПЕРЕДАЧУ И ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР В КОНДЕНСАТОРЕ

Цель исследования и характеристика получаемых результатов. Основной целью численного эксперимента было получение качественного и количественного представления о влиянии на теплообмен в теплообменнике процессов, протекающих в двухфазном дисперсном потоке холодного теплоносителя. Схема численных расчетов выбрана аналогично главе 3: сначала исследовалось влияние массовой концентрации влаги и абсолютной температуры теплоносителя, а затем – скорости воздуха в каналах.

Результатом расчетов являются двумерные поля температур горячего, холодного теплоносителей и температуры стенки. При графическом представлении в качестве температур теплоносителей взяты их средние значения

в направлении движения. Для характеристики поля температур стенки выбраны значения температур по диагонали теплообменника, которой соответствует максимальный перепад и градиент температуры стенки. Расчеты выполнены для экспериментального конденсатора по модели, не учитывающей действие начального участка.

3.1. ВЛИЯНИЕ НА ТЕПЛОПЕРЕДАЧУ МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЛАГИ

На рис. 3.1 – 3.3 представлены три серии расчетов, выполненных для начальных температур холодного теплоносителя $t_x^{BX} = -15\text{ }^\circ\text{C}$; $0\text{ }^\circ\text{C}$; $15\text{ }^\circ\text{C}$ соответственно; массовая концентрация влаги в холодном теплоносителе изменялась от 0 до 0,03 с шагом 0,5 %. Температура горячего теплоносителя задавалась по закону $t_\Gamma^{BX} = t_x^{BX} + 60\text{ }^\circ\text{C}$, чтобы иметь одинаковый начальный температурный напор. Соотношение расходов теплоносителей соответствует экспериментальному и равно $W_x/W_\Gamma = 0,785$.

Холодный тракт. Прирост температуры холодного теплоносителя t_x^i с увеличением массовой концентрации аэрозоля m резко сокращается, в то время как степень охлаждения горячего теплоносителя, наоборот, резко повышается. Причем чем выше t_x^{BX} , тем степень влияния массообмена в холодном теплоносителе на теплопередачу становится более высокой.

Пластина. Для исследования влияния на эффективность теплообмена наиболее показательное распределение температуры стенки t_{CT}^i . В случае роста массовой концентрации m аэрозоля наблюдается резкое нелинейное снижение t_{CT}^i при одновременном увеличении перепадов температур между стен-

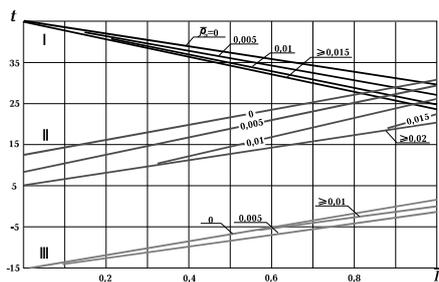


Рис. 3.1. Распределение средних температур горячего – I, холодного – III, теплоносителей и стенки – II по длине теплообменных трактов в конденсаторе при отрицательной начальной температуре холодного воздуха $t_x^{BX} = -15\text{ }^\circ\text{C}$ и различной массовой концентрации влаги

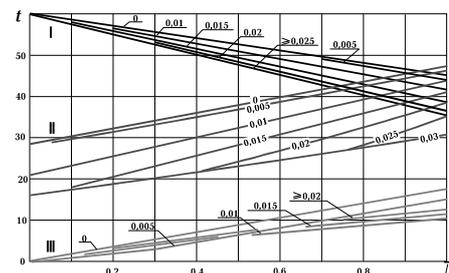


Рис. 3.2. Распределение средних температур горячего – I, холодного – III теплоносителей и стенки – II по длине теплообменных трактов в конденсаторе при нулевой начальной температуре холодного воздуха $t_x^{BX} = 0\text{ }^\circ\text{C}$ и различной массовой концентрации влаги (указатели у кривых) $G_\Gamma = G_x = 0,1719\text{ кг/с}$

кой и горячим теплоносителем t_{Γ}^i . Причем чем выше t_{X}^{BX} , тем степень влияния более значительна. При достижении определенного значения m дальнейшее увеличение массовой концентрации влаги не оказывает влияния на теплопередачу.

Тепловая эффективность. На рис. 3.4 изображен сводный график для средних температур стенки \bar{t}_{CT} , холодного $\bar{t}_{\text{X}}^{\text{ВЫХ}}$ и горячего $\bar{t}_{\Gamma}^{\text{ВЫХ}}$ теплоносителей, отнесенных к начальной разности температур $\Delta t = t_{\Gamma}^{\text{BX}} - t_{\text{X}}^{\text{BX}}$, а также относительное значение количества тепла \bar{Q} (отнесенное к "сыхому" случаю), отводимого от горячего теплоносителя, во всем диапазоне значений массовой концентрации влаги. Из рисунка виден сложный и нелинейный характер влияния массовой концентрации m и абсолютной температуры теплоносителей на суммарный теплообмен в теплообменнике.

В качестве общего вывода можно заключить, что присутствие влаги в холодном теплоносителе во всех случаях приводит к более интенсивному охлаждению горячего теплоносителя. Так, например, для режима $t_{\text{X}}^{\text{BX}} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ эффективность теплообмена возрастает на 60 %, что соответствует полученному экспериментально другими авторами.

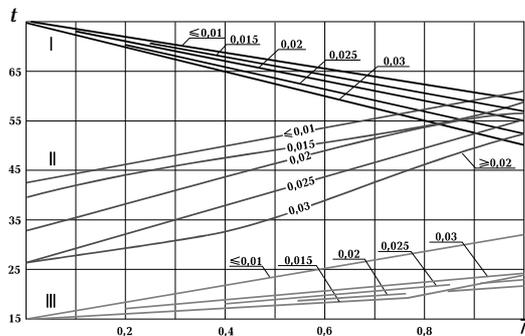


Рис. 3.3. Распределение средних температур горячего – I, холодного – III теплоносителей и стенки – II по длине теплообменных трактов в перекрестно-точном теплообменнике при положительной начальной температуре холодного воздуха $t_{\text{X}}^{\text{BX}} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и различной массовой концентрации влаги (указатели у кривых)

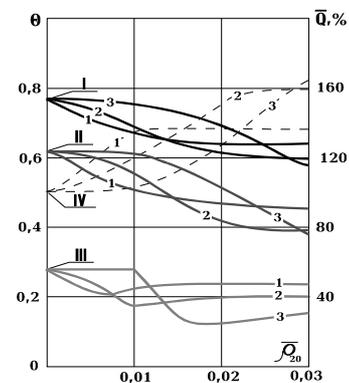


Рис. 3.4. Сопоставление значений средних температур на выходе горячего тракта – I, на выходе холодного тракта – III, на выходе между теплоносителями II и передаваемой тепловой мощности – IV в конденсаторе при увеличении массовой концентрации для различных начальных температур холодного воздуха: 1- $t_{\text{X}}^{\text{BX}} = -15 \text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$

3.2. ВЛИЯНИЕ НА ТЕПЛООТДАЧУ СКОРОСТИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

Исследование локальной теплопередачи выполнено при следующих условиях. Начальные температуры теплоносителей оставались постоянными во всех случаях: $t_x^{BX} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$, $t_r^{BX} = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$, массовая концентрация влаги варьировалась в диапазоне $m = 0 \dots 0,03$. Изменение скоростей теплоносителей проводилось по двум законам.

Фиксированное $W_x/W_r = \text{const}$. Первоначально выполнены три серии расчетов с разным количеством теплоносителя $G_r = 0,1719; 0,2272; 0,2847$ кг/с, но при постоянном соотношении водяных эквивалентов теплоносителей $W_x/W_r = 0,785$. Полученные результаты показали, что изменение расхода теплоносителей при фиксированном W_x/W_r не приводит к перераспределению полей температур теплоносителей и стенки. Во всем диапазоне m они соответствуют изображенному на рис. 5.3.1. Дополнительный сводный график (рис. 5.3.4) показывает, что при этом растет количество отведенного тепла пропорционально увеличению расхода.

Переменное $W_x/W_r = \text{var}$. Во втором случае расход G_r был зафиксирован, а расход G_x увеличивался так, чтобы соотношение водяных эквивалентов изменилось и было бы равно $W_x/W_r = 1,0$ и $1,215$. При этом наблюдается перераспределение полей температур теплоносителей и стенки (рис. 3.5, 3.6). На сводном графике рис. 3.7 легко наблюдается увеличение отводимого от горячего теплоносителя тепла в случае $W_x/W_r > 1$ и его уменьшение при $W_x/W_r < 1$.

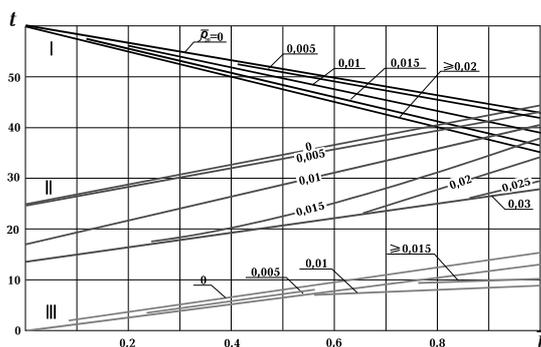


Рис. 3.5. Распределение средних температур горячего – I, холодного – III теплоносителей и стенки – II по длине теплообменных трактов в перекрестно-точном теплообменнике при увеличении расхода теплоносителей $G_r = G_x = 0,2272$ кг/с, $t_x^{BX} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\bar{m}' = 0 \dots 0,03$

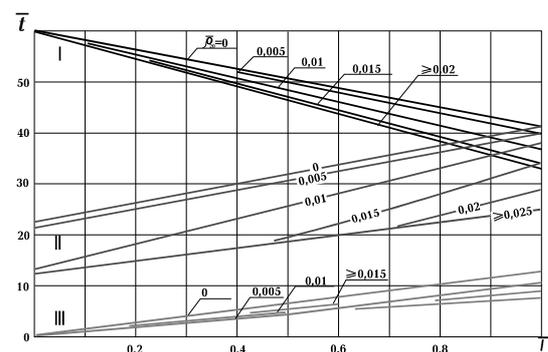


Рис. 3.6. Распределение средних температур горячего – I, холодного – III теплоносителей и стенки – II по длине теплообменных трактов в перекрестно-точном теплообменнике при увеличении расхода теплоносителей $G_r = G_x = 0,2847$ кг/с, $t_x^{BX} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\bar{m}' = 0 \dots 0,03$

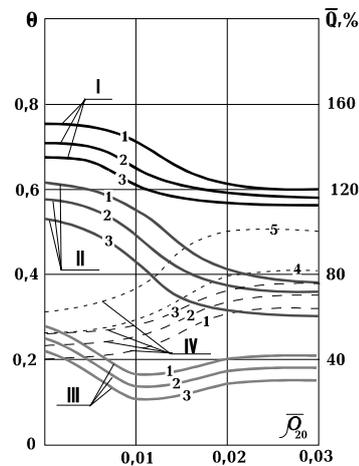


Рис. 3.7. Сопоставление значений безразмерных средних температур на выходе горячего тракта – I, на выходе холодного тракта – III, стенки между теплоносителями – II и передаваемой тепловой мощности – IV в перекрестно-точном теплообменнике при увеличении массовой концентрации влаги для различных соотношений водяных эквивалентов: 1 – $W_x/W_r = 0,785$; 2 – 1,0; 3 – 1,215. Линиями 4, 5 изображено влияние абсолютного расхода теплоносителей на тепловую мощность IV: 1...3 – $G_r = G_x = 0,1719$ кг/с; 4 – 0,2272; 5 – 0,2847, – значения безразмерных температур при этом остаются неизменными

3.3. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В КОНДЕНСАТОРЕ

В результате численного исследования установлено.

1. Межфазный тепломассообмен при испарении дисперсного теплоносителя приводит к перераспределению полей температур холодного и горячего теплоносителей, а также стенки, в результате чего в 1,5 ... 2 раза возрастает теплопередача при постоянных габаритах теплообменника.

2. Наибольший вклад в достигаемый эффект вносит процесс испарения аэрозоля в пределах пограничного слоя у стенки, который снижает температуру стенки на 100 ... 200 %. Заметное влияние, но уже косвенное, имеет снижение общего уровня температуры теплоносителя. В результате взаимного влияния этих факторов наблюдается существенно нелинейное локальное перераспределение полей температур в перекрестно-точном теплообменнике.

3. Результатом совокупности указанных эффектов является увеличение температурного напора между горячим теплоносителем и стенкой. Это приводит к увеличению теплового потока, отдаваемого горячим теплоносителем, и увеличению суммарного теплообмена в теплообменнике. При обработке экспериментальных данных, поскольку температурный напор между теплоносителями остается примерно постоянным, наблюдается рост суммарного коэффициента теплоотдачи.



ВЫВОДЫ

1. При расчете теплообменников, охлаждаемых двухфазным дисперсным теплоносителем, обязателен учет межфазного тепломассообмена при испарении аэрозоля, в особенности в пределах пограничного слоя, так как в противном случае возникают значительные отклонения от реальных процессов, а погрешность теплового расчета может достигать 100 %.

2. Наиболее простой и подходящей для этих целей является двухслойная гомогенная модель расчета, учитывающая массообмен в ядре потока и в пределах пограничного слоя. Обязательным условием для точного расчета является вычисление параметров на локальном уровне, ввиду существенной нелинейности процессов и невозможности учесть все факторы простыми линейными поправками.

3. Достоверность равновесной (гомогенной) модели ограничена в основном факторами, определяющими межфазное взаимодействие: диаметр капель не должен превышать 10...15 мкм, эквивалентный диаметр теплообменного канала не должен быть меньше 1 мм. В противном случае необходимо учитывать скольжение фаз, что можно сделать только с помощью двухскоростной неравновесной модели.

4. Эксперименты по проверке достоверности проведены для каналов с гладким оребрением. Тем не менее, их можно распространить и на другие типы оребрения, поскольку аэрозольные частицы практически безынерционны и повторяют эволюцию потока. Однако параметры двухфазного потока при этом не должны выходить за рекомендованные границы. В противном случае расчеты по гомогенной модели дают идеальный предельно допустимый вариант, что можно использовать только для оценок.

5. Наибольшее соответствие экспериментам получено для модели, учитывающей кроме двухфазности потока и особенности развития теплового пограничного слоя, поскольку последний существенно влияет на межфазный тепломассообмен при испарении аэрозоля. Картина процессов при этом резко усложняется. Сравнение с экспериментами показало, что такая модель увеличивает точность получаемых результатов еще на 10...20 %.

4. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ КОНДЕНСАТОРА

4.1. МЕТОДИКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Поля температур в конденсаторе. Общим недостатком описанных противообледенительных систем служит то, что все они борются с последствиями обмерзания, практически не затрагивая причин его возникновения. Главной из них является специфическое распределение полей температуры теплообменной поверхности (рис. 4.1).

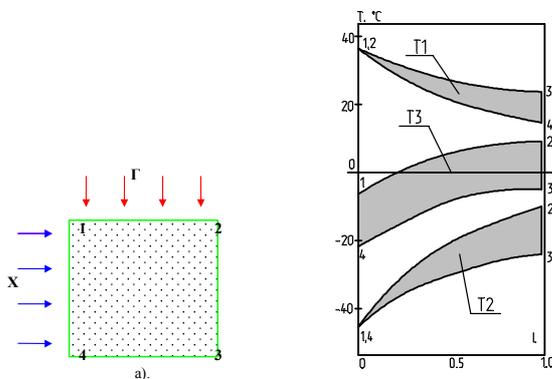


Рис. 4.1. Схема полей температур в конденсаторе: *a* – координатная сетка, *б* – поля температур. T_1 – температура горячего теплоносителя, T_2 – температура холодного теплоносителя, T_3 – температура пластины; 1-4 – номера углов пластины в координатной сетке

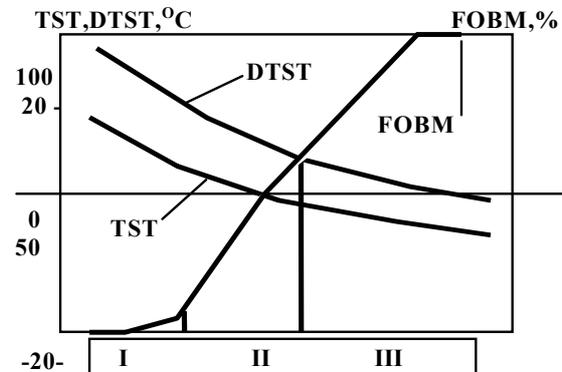


Рис. 4.2. Противообледенительная оптимизация конденсатора: TST , $DTST$ – среднее значение и перепад температур на пластине, $FOBM$ – доля поверхности при отрицательной температуре, N_1 – количество горячих пакетов; *I* – зона "оптимальности", когда обмерзание отсутствует, *II* – зона частичного замерзания

Перекрытно-точная схема течения приводит к тому, что часть теплообменной поверхности в районе углового сечения 4 становится ниже нуля градусов Цельсия. Таким образом, основная причина обмерзания состоит в том, что имеется "переохлаждённая" теплообменная поверхность, при попадании на которую любой влаги произойдёт её намерзание. Поэтому единственным способом, избавляющим от обмерзания, может быть получение температуры теплообменной поверхности выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Методика эксплуатационной оптимизации. Суть методики состоит в поиске таких вариантов *тепловой защиты холодного тракта* $RR > 1$, которые бы увеличили температуру теплообменной поверхности. В качестве оптимизируемых параметров используются: *температура стенки* TST , показывающая, насколько среднее ее значение отличается от нуля градусов; *перепад температур* стенки $DTST$ – предел отклонения температуры поверхности от средней; а также $FOBM$ – процент обмерзания поверхности теплообмена. Этой информации достаточно для обобщенной проверки работоспособности конденсатора.

Типичная зависимость TST , $DTST$, $FOBM$ от числа пакетов N_1 показана на рис. 4.2. По мере увеличения числа пакетов N_1 наблюдаются нелинейные изменения TST , $DTST$, $FOBM$. Характер изменений может быть произвольным, так как зависит и от режима работы, и от соотношения эффективности работы ребрений. В частности, кривая $FOBM$ показывает зону

"оптимальности", которая расположена при нулевых значениях. Любой теплообменник из этой зоны можно считать противообледенительно "оптимальным". Идеальным теплообменником можно считать тот, у которого на рабочем режиме $FOBM = 0$, и, кроме того, температура поверхности в самом холодном углу пластины на несколько градусов выше нуля (т.е. $TST > DTST/2$). При наличии зоны обмерзания $FOBM = 0... 30\%$ конденсатор может быть пригоден, но требует разработки противообледенительной системы (например, "теплого ножа" либо обводного канала в холодном тракте). В случае $FOBM$ более 30% конденсатор считается непригодным для работы.

4.2. ВЛИЯНИЕ НА ТЕПЛОПЕРЕДАЧУ КОМПОНОВКИ ТЕПЛООБМЕННИКА

Проблема борьбы с обмерзанием конденсатора вызвала интерес к поиску оптимальной его конструкции. Приведенные ниже результаты позволяют выработать несколько общих положений, облегчающих проектирование конденсатора с заданным полем температур пластины.

ОДНОЗАХОДНЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ

На рис. 4.3 представлены данные о полях температур пластины в зависимости от компоновки теплообменной секции однозаходного теплообменника. Было рассмотрено сорок типоразмеров при неизменном объеме теплообменника, площади теплообмена и режиме работы ($T_{г\text{ вх}} = 30\text{ }^\circ\text{C}$, $T_{х\text{ вх}} = -50\text{ }^\circ\text{C}$). Изменялось количество пластин от 8 до 16 пар (размер L_3) и для каждого варианта – длина L_1 и ширина L_2 пластины, так что их отношение находилось в диапазоне $L_1/L_2 = 0,3...3$.

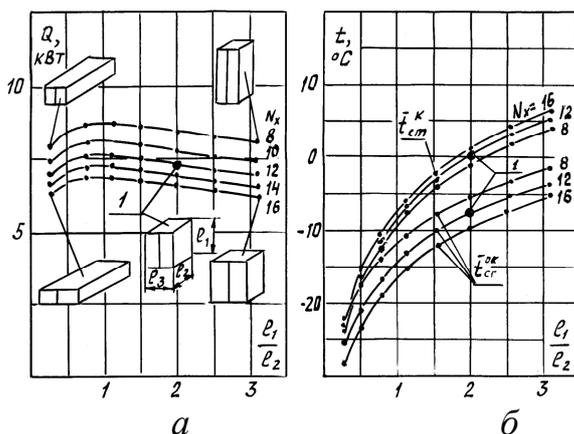


Рис. 4.3. Влияние компоновки теплообменной секции на среднюю температуру стенки (б) и тепловой поток (а) в перекрестно-точном теплообменнике: 1 – экспериментальный конденсатор

Средняя температура пластины (рис. 4.3, б) имеет свое минимальное значение ($-23\text{ }^\circ\text{C}$) в случае уменьшения проходного сечения холодного воздуха ($L_1/L_2 = 0,3$). И, наоборот, в случае увеличения проходного сечения холодного воздуха ($L_1/L_2 = 3$) температура достигает своего максимального значения $+7\text{ }^\circ\text{C}$. Причем этой величины достаточно, чтобы 90% поверхности пластины было выше нуля градусов, так как минимальное и максимальное значения температуры пластины отличались от среднего не более чем на $\pm 8...10\text{ }^\circ\text{C}$.



Оценка тепловой эффективности теплообменников (рис. 4.3, *a*) показала, что максимальный тепловой поток достигается в случае $L1:L2:L3 = 1:1:1$, т.е. равного проходного сечения обоих трактов.

При изменении соотношения проходных сечений в любую сторону происходит снижение теплового потока до 8...10 %. Увеличение количества пакетов приводит к падению теплового потока до 30 %.

Таким образом, при неблагоприятном режиме работы конденсатора ($|T_{Г\text{ ВХ}}| < |T_{Х\text{ ВХ}}|$) можно уменьшить зону обмерзания путем увеличения проходного сечения холодного воздуха. И, наоборот, в случае ($|T_{Г\text{ ВХ}}| > |T_{Х\text{ ВХ}}|$) уменьшением проходного сечения можно интенсифицировать процесс конденсации в горячем тракте.

Действие фактора живого сечения связано с изменением скорости теплоносителя (при фиксированном расходе), приводящего к перераспределению термических сопротивлений в горячем и холодном трактах.

МНОГОЗАХОДНЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ

"Управлять" полем температур пластины можно и путем изменения количества заходов горячего теплоносителя. На рис. 4.4 представлены средние значения температур теплоносителей и пластин по каждому тракту для однозаходного (*a*), двухзаходного (*б*), трехзаходного (*в*) и четырехзаходного (*г*) теплообменников, у которых одинаковая площадь теплообмена. Увеличение числа заходов приводит к благоприятному перераспределению температуры пластины. В частности, наблюдается рост температуры в наиболее холодной части пластины, в то время как среднее ее значение изменяется незначительно.

Оценка гидравлических потерь позволила установить следующее: увеличение числа заходов (либо "зажатие" проходного сечения в однозаходном варианте) сопровождается ростом гидравлических потерь. Однако максимальное увеличение потерь (четырёхзаходный вариант) не превышает двухкратного значения. Последнее объясняется небольшим удельным весом потерь на трение в каналах по сравнению с общими потерями (потери от внезапного расширения и сужения достигают 80 % суммарных).

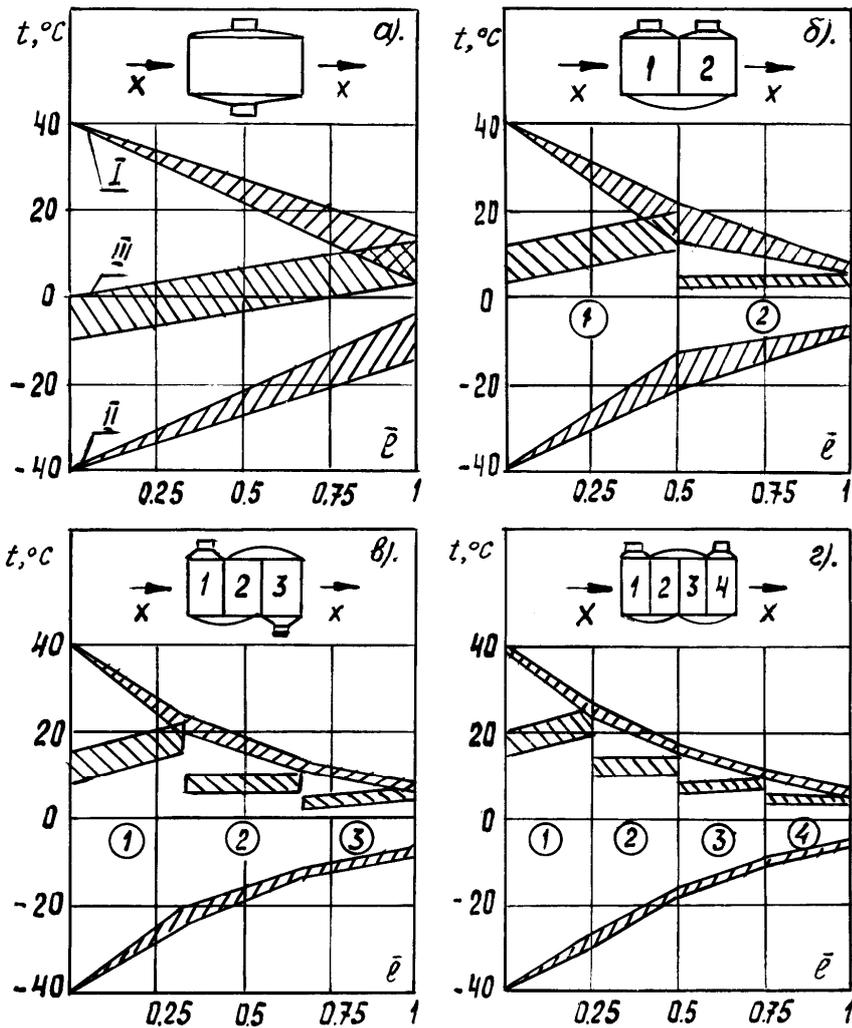


Рис. 4.4 Изменение полей температур в многозаходных теплообменниках: а – однозаходный, б – двухзаходный, в – трехзаходный, г – четырехзаходный теплообменники. I – горячий теплоноситель, II – холодный теплоноситель, III – пластина

4.3. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНДЕНСАТОРА

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНДЕНСАТОРА С ТРЕБУЕМЫМИ СВОЙСТВАМИ

Основные цели оптимизации конструкции конденсатора. Для того чтобы получить конденсатор с оптимальными свойствами, необходимо последовательно провести технологическую, тепловую и противообледенительную оптимизацию конструкции теплообменника. Задачу можно считать решенной, когда будет найдена конструкция, удовлетворяющая всем трем условиям. В настоящий момент степень важности решаемых подзадач разная и выглядит следующим образом:

- 1) ТО не должен обмерзнуть на рабочем режиме;



- 2) ТО должен быть технологически удобным в изготовлении;
- 3) ТО должен обладать наилучшей тепловой эффективностью.

Такой приоритет объясняется требованиями промышленности. На первом месте стоит задача обеспечения работоспособности системы кондиционирования. На втором месте – наличие на конкретном производстве требуемых материалов и технологических процессов. Последнее место – за высокой эффективностью тепловых процессов.

Оценка вероятности обмерзания. С технической точки зрения для решения задачи необходимо подобрать такие свойства процесса теплопередачи в теплообменнике, чтобы обеспечить незамерзающее поле температуры пластины на рабочем режиме. Требуемые свойства можно оценить следующим выражением:

$$RR = \frac{R_2}{R_1} = \frac{m|T_2|}{|T_1|}, \quad (4.1)$$

где T_1, T_2 – исходные температуры теплоносителей, $m = 1,2 \dots 1,5$ – коэффициент запаса, RR – отношение термических сопротивлений в процессе теплопередачи. Физический смысл соотношения (4.1) – степень "вероятности замерзания" (неблагополучности) конденсатора. Возможны три варианта: 1) $RR > 1$ – неблагоприятный режим: замерзание предопределено; 2) $RR = 1$ – возможно обмерзание части теплообменника; 3) $RR < 1$ – благополучный режим: замерзание маловероятно. Таким образом, на стадии анализа исходных данных известны условия работы будущего теплообменного аппарата. Попытаемся априорно получить такие свойства будущего конденсатора, которые бы компенсировали "вероятность обмерзания".

Определение отношения термических сопротивлений. Для задачи оптимизации конструкции теплообменников более удобным обобщенным критерием является отношение термических сопротивлений холодного и горячего тракта RR :

$$RR = \frac{R_2}{R_1} = \frac{\alpha_1 F_1}{\alpha_2 F_2}. \quad (4.2.)$$

Физический смысл RR – во сколько раз сопротивление со стороны холодного теплоносителя больше сопротивления со стороны горячего теплоносителя. Этот параметр оказывает определяющее воздействие на температуру теплообменной поверхности, которая разделяет теплоносители. При этом возможны три случая: 1) $RR > 1$ – сопротивление с холодной стороны больше, чем с горячей: температура поверхности ближе к горячему теплоносителю; 2) $RR = 1$ – сопротивления равны: температура поверхности на равном удалении; 3) $RR < 1$ – сопротивление с горячей стороны больше, чем с холодной: температура поверхности ближе к холодному теплоносителю.

Таким образом, задавая через конструктивные параметры теплообменника величину RR , можно "управлять" температурой теплообменной поверх-



ности. Получая желаемую температуру поверхности, можно вести борьбу с обмерзанием.

Алгоритм оптимизации конструкции конденсатора. На практике для предварительного анализа вместо (5.4.2) более удобно использовать следующее выражение:

$$RR = \frac{R_2}{R_1} = \frac{Re_1 \varphi_1}{Re_2 \varphi_2}, \quad (4.3)$$

где Re_1, Re_2 – исходные значения критериев Рейнольдса (режимов течения) для теплоносителей; φ_1, φ_2 – коэффициенты оребрения теплообменной поверхности.

Нетрудно заметить, что в уравнениях (4.1), (4.3) параметр RR одинаков. Если уравнение (4.1) содержит условия работы теплообменника, то уравнение (4.3) – конкретные параметры будущего теплообменного аппарата. Приравняв эти выражения, получим формулу для алгоритма поиска оптимальной конструкции конденсатора:

$$RR = \frac{R_2}{R_1} = \frac{m|T_2|}{|T_1|} = \frac{Re_1 \varphi_1}{Re_2 \varphi_2} = R_{Re} R_{\varphi}, \quad (4.4)$$

где R_{Re} – фактор, описывающий соотношение режимных параметров теплоносителей; R_{φ} – фактор, описывающий соотношение площадей оребрений.

С точки зрения конструкции теплообменника параметр R_{Re} отвечает за режимы течения теплоносителя (ламинарный - турбулентный), а параметр R_{φ} – за величины оребренности поверхности. Изменяя входящие в них числа Re_1, Re_2 и φ_1, φ_2 , можно получить любой требуемый вариант RR .

КРИТЕРИИ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ КОНДЕНСАТОРА

Из экспериментов известно, что конденсатор устойчиво работает, если площадь поверхности с отрицательной температурой $F_{обм}$ не превышает 20...25 %. Поэтому задача оптимизации конструкции конденсатора может считаться законченной, когда по результатам проверочного расчета на рабочем режиме обеспечивается условие $F_{обм} \leq 10...20$ %. В зависимости от тяжести рабочего режима возможны три схемы поиска требуемого теплообменника.

Благоприятный режим. Соответствует случаю, когда входная температура горячего теплоносителя превышает по модулю входную температуру холодного теплоносителя ($|T_1| > |T_2|$). Одинаковые термические сопротивления теплоносителей ($R_1=R_2$) в процессе теплопередачи дают положительное поле температур пластины – обмерзания нет. Таким условиям вполне удовлетворяет обычный однозаходный теплообменник, спроектированный на максимальную термическую эффективность и минимальные гидравлические потери. В самом простом случае можно ограни-



читься условием $R_{Re} = 1$ и $R_{\phi} = 1$, в более сложных: $R_{Re} > 1$ и $R_{\phi} < 1$ или $R_{Re} < 1$ и $R_{\phi} > 1$. В случае заметного превышения T_1 над T_2 имеет смысл уменьшить термическое сопротивление по холодному теплоносителю, чтобы снизить температуру пластины до более благоприятной для процесса конденсации.

Удовлетворительный режим. Соответствует случаю $|T_1| = |T_2|$, когда условие $R_1 = R_2$ приводит к распространению отрицательной температуры на заметную часть пластины. В этом случае желательно уменьшать термическое сопротивление горячего теплоносителя ($R_1 < R_2$), чего можно добиться путем соответствующего изменения режимов течения либо геометрии однозаходного теплообменника. В зависимости от дополнительных ограничений можно идти либо путем $R_{Re} > 1$, либо путем $R_{\phi} > 1$. Допускается наличие небольшого участка пластины с отрицательной температурой (менее 25 % площади), что можно компенсировать с помощью противообледенительной системы.

Неблагоприятный режим. В этом случае $|T_1| < |T_2|$, и условие $R_1 = R_2$ дает отрицательное поле температур пластины. Необходимо любыми способами снижать R_1 и увеличивать R_2 . Наиболее подходящим вариантом является задание максимальных значений $R_{Re} > 1$ и $R_{\phi} > 1$ в однозаходном теплообменнике. В тяжелых случаях целесообразно перейти к многозаходному теплообменнику. Во всех вариантах необходимо применять обводной канал, а также использовать противообледенительную систему. Надо иметь в виду, что все эти меры снижают термическую эффективность теплообменника и вынуждают делать запас площади теплообменника. Кроме того, возрастают и гидравлические потери, и необходимо иметь соответствующий запас давления.

Подробная методика проектировочного расчета конденсатора изложена в приложении III. Пример расчета по этой методике дан в приложении IV. Пример гидравлического расчета КПРТ описан в приложении V.