

На правах рукописи

Пащенко Наталья Ивановна

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЦИКЛОВ
СИСТЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА**

01.04.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении
Высшего профессионального образования
«Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Дьяченко Юрий Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Балаганский Игорь Андреевич

кандидат технических наук, с.н.с.
Елистратов Сергей Львович

Ведущая организация: Московский авиационный институт
(Технический университет), г. Москва

Защита состоится «18» июня 2010 г. в 10⁰⁰ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.173.02 при Новосибирском государственном
техническом университете.

Адрес: 630092, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского
государственного технического университета.

Автореферат разослан «17» мая 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета:

доктор технических наук, доцент

Чичиндаев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из проблем современной авиационной техники является разработка систем кондиционирования воздуха (СКВ), имеющих максимальную эффективность и экономичность. Экономичность авиационных систем определяется приведенной взлетной массой, которая представляет сумму установочной массы и ее приращения, определяемого величиной отбираемого расхода воздуха и механической работы от силовой установки, увеличением аэродинамического сопротивления самолета воздухозаборниками системы и т.д. Применение систем кондиционирования, работающих по усовершенствованным циклам с оптимизированными параметрами, позволяет значительно уменьшить расход воздуха в «холодной» линии и отбор механической работы, уменьшить приведенную взлетную массу системы и увеличить полезную нагрузку, а также увеличить степень комфортности в гермокабине. Для решения этой проблемы все более широкое применение находит новое поколение СКВ, характерной особенностью которых является применение ступенчатого сжатия и регенеративная осушка влажного воздуха. При практической реализации этих систем, для получения максимальной эффективности необходимы научно обоснованные методики расчета, проектирования и оптимизации. Решение оптимизационных задач требует теоретического обоснования и модельных представлений о системе кондиционирования в целом и ее структурных элементов.

В настоящее время при разработке СКВ используются в основном инженерные методики расчета. В инженерной методике расчета целый ряд исходных параметров цикла задается на основе ранее разработанных аналогов или опыта и интуиции проектировщика. Кроме того, такая методика не опирается на физическую и математическую модели всей системы, поэтому не может определить оптимальные условия реализации. В настоящее время сложилась парадоксальная ситуация – высокий технический уровень агрегатного состава сочетается с полным отсутствием теоретического представления и анализа СКВ.

СКВ можно представить как сложную теплоэнергетическую систему, в которой сочетаются холодильный (обратный) и теплоиспользующий (прямой) циклы. Эти циклы можно представить как обратимые, т.е. идеальные для данных условий цикла, что в термодинамическом анализе циклов имеет очень важное значение. Представление обратимых циклов позволяет создать наиболее простую физическую и математическую модели цикла, строить на их основе реальный цикл и анализировать его, анализировать основные закономерности цикла и получать аналитические расчетные зависимости, определять оптимальные условия реализации цикла, оценивать влияние исходных параметров на термодинамическую эффективность и область существования цикла, т.е. оценивать степень совершенства реального цикла. Таким образом, полный термодинамический анализ циклов представляет собой комплекс частных задач. В настоящее время такой комплексный подход к анализу циклов СКВ отсутствует.

Цели и задачи исследования. Проведение комплексного термодинамического анализа идеализированных циклов авиационной СКВ. Для этого решаются следующие задачи:

- 1) разработка методики термодинамического анализа циклов СКВ;
- 2) разработка термодинамических моделей сопряженных циклов воздушно-холодильной машины (АВВХМ) и теплоиспользующей системы (ТИС) в составе СКВ;
- 3) разработка методики определения области существования циклов СКВ;
- 4) разработка методики оценки термодинамической эффективности циклов СКВ;
- 5) разработка методики оценки расхода рабочего воздуха в СКВ;

Научная значимость и новизна работы состоит в следующем:

- 1) предложена методика анализа СКВ как результат совместной работы идеализированных термодинамических циклов АВВХМ и ТИС с учетом их взаимосвязи, что позволяет более полно оценить термодинамическую эффективность СКВ в целом;

2) развита методика определения области существования циклов СКВ, дополнительно учитывающая влияние исходных параметров (атмосферных давления и температуры, скорости полета, давления за компрессором), а так же схемных решений циклов АВВХМ и ТИС;

3) предложена методика оценки термодинамической эффективности СКВ в целом, учитывающая совместную работу холодильного и теплового циклов;

4) выполнен комплексный термодинамический сравнительный анализ идеализированных циклов СКВ различных схем (нерегенеративной одноступенчатой, нерегенеративной двухступенчатой, регенеративной двухступенчатой по схеме «петля»), установлены области существования и термодинамические эффективности каждой из них.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) термодинамические модели идеализированных циклов СКВ;
- 2) методика термодинамического анализа идеализированных циклов СКВ;
- 3) результаты термодинамического анализа идеализированных циклов СКВ.

Практическая ценность работы:

1) разработанные модели идеализированных термодинамических циклов СКВ позволяют сделать термодинамическую оценку степени совершенства реальных циклов СКВ;

2) установлено существование наиболее рациональных условий реализации циклов СКВ с точки зрения термодинамической эффективности;

3) разработана методика определения области существования циклов СКВ;

4) выполнен термодинамический анализ схемы СКВ используемой на современных зарубежных самолетах, таких как Боинг-757(767), А-300(310), ТУ-204 (224, 334), и ИЛ-96-300;

5) полученные результаты могут быть использованы при разработке СКВ нового поколения.

Достоверность полученных результатов. В основе работы лежат известные законы и апробированные методы термодинамического анализа. Сформу-

лированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации обоснованы численными данными и решениями, полученными в работе, и не противоречат известным положениям наук – термодинамики, механики жидкости и газа, математики; базируются на строго доказанных выводах о закономерностях процессов тепломассообмена, согласуются с имеющимися теоретическими работами в области термодинамики и теплопередачи.

Личный вклад. Автору принадлежит разработка методики термодинамического анализа систем кондиционирования, результаты и выводы. Им выполнены представление и анализ идеализированных циклов СКВ, проведение исследований и обработка данных численного моделирования, подготовка докладов и публикаций, выводы и заключения по работе. Постановка задачи принадлежит д.т.н. Ю.В. Дьяченко, который является научным руководителем работы.

Апробация работы. Содержание и основные результаты исследований диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона», НГТУ, Новосибирск, 2005, 2010; Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», Новосибирск, НГТУ, 2009; на II Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь, техника космос», БГДУ, Санкт-Петербург, 2010.

Публикации. Всего по теме диссертации опубликовано 10 работ. Из них 1 научная статья в рецензируемом журнале, входящем в перечень, рекомендованный ВАК; 2 научные статьи в рецензируемых журналах; 3 статьи в сборниках научных трудов; 4 публикации в материалах научных Всероссийских конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и Приложения. Общий объем диссертации составляет 155 страниц, включая 72 рисунка и 1 таблицу. Список используемых источников содержит 88 наименований.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов:

- 1) РФФИ 05-08-33588 – «Моделирование и анализ авиационных систем кондиционирования воздуха»;
- 2) РФФИ 09-08-00321-а – «Исследование эффективности авиационных систем кондиционирования воздуха».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, ее научная и практическая ценность, новизна работы, определены цель и содержание решаемых задач, дано краткое содержание диссертации.

В первой главе выполнен обзор и анализ современного состояния СКВ и перспектив их развития. Рассмотрены схемы воздушно-холодильных машин в составе авиационной систем кондиционирования воздуха (АВВХМ). Теоретическое обоснование замкнутого цикла воздушно-холодильной машины выполнено в работах В.С. Мартыновского. Работа АВВХМ основана на использовании атмосферного воздуха в качестве рабочего тела, поэтому для них особенно актуальны проблемы осушки влажного воздуха. Исследования влияния влажности на работу АВВХМ и СКВ проводились в работах К.И. Старостина и М.В. Горбачева. В работах Ю.М. Шустрова проведена оценка расходов топлива, необходимого для компенсации энергопотребления систем кондиционирования.

Применение регенеративных АВВХМ в составе СКВ в сочетании со ступенчатым сжатием позволяет достигать максимальной термодинамической эффективности СКВ. Это направление развития является наиболее перспективным. Несмотря на практическую реализацию таких схем в литературе отсутствуют данные по теоретическим и экспериментальным исследованиям. Исключениями являются работы Ю.В. Дьяченко, в которых развита теория воздушно-холодильных машин, в том числе, ступенчатого сжатия и регенеративных, а также разработана методика системного комплексного термодинамического анализа обратимых циклов.

Решение оптимизационных задач требует представления термодинамической модели системы кондиционирования воздуха. Данные о представлении идеальных циклов авиационных систем кондиционирования воздуха и их анализ в имеющейся литературе весьма ограничен, что не позволяет выявить оптимальные условия реализации авиационных систем кондиционирования воздуха.

Во второй главе рассматриваются физическая и математическая модели нерегенеративной авиационной системы кондиционирования воздуха, применяемой на реактивных самолетах первого поколения – ТУ-104, ТУ-134, ТУ-154, ИЛ-62, ИЛ-86. Типовая блок-схема авиационной СКВ показана на рис. 1. Функционально в авиационной СКВ можно выделить две основные теплоэнергетические системы: систему генерации холода (рис. 2(а)) и систему генерации тепла (рис. 2(б)). В основе работы этих систем лежат термодинамические циклы. Работа первой системы основана на обратном термодинамическом цикле – цикле воздушно-холодильной машины. Работа второй системы – на прямом термодинамическом цикле – цикле теплоиспользующей системы.

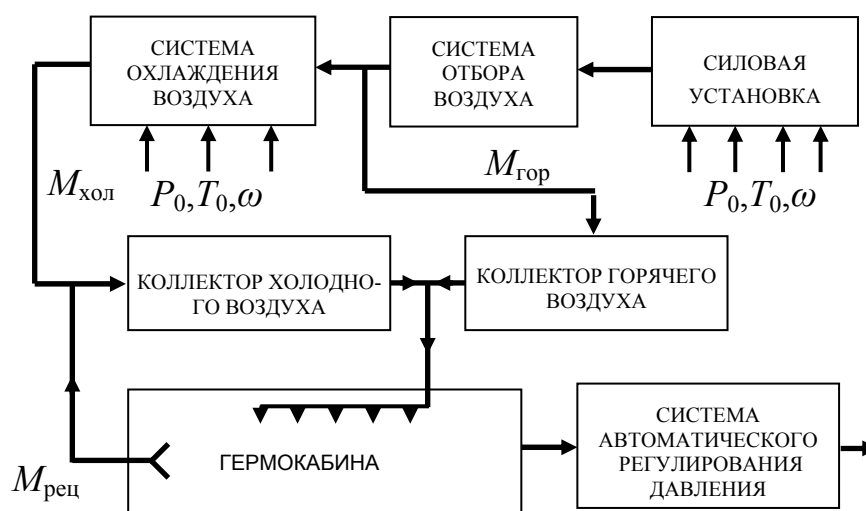


Рис. 1. Блок-схема авиационной системы кондиционирования

Термодинамические модели циклов АВВХМ и ТИС составляются на основе их схем, и в общем случае представляют собой систему нелинейных уравнений, которые описывают процессы в моделируемом объекте и устанавливают

связь между режимными параметрами: скоростью полета ω , давлением за компрессором P_K , атмосферной температурой T_0 , атмосферным давлением P_0 .

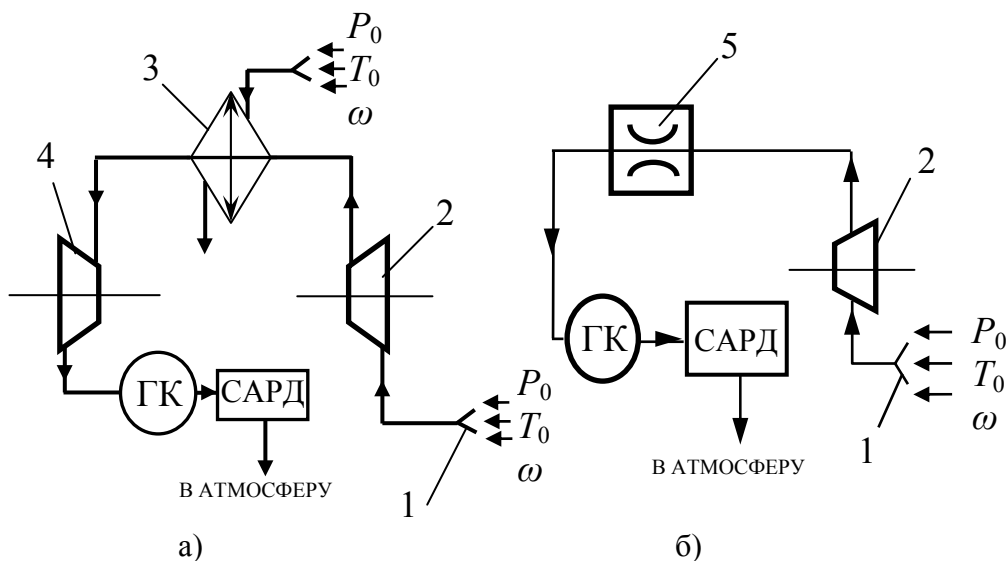


Рис. 2. Схема: а) воздушно-холодильной машины, б) теплоиспользующей системы в составе авиационной СКВ: 1 - воздухозаборник, 2 - турбокомпрессор, 3 - атмосферный теплообменник, 4 - турбохолодильник, 5 - дроссельная заслонка, ГК - гермокабина, САРД - система автоматического регулирования давления

На рис. 3 показаны $T-s$ диаграммы циклов АВВХМ (а) и ТИС (б). Данные циклы характеризуются общими процессами:

- торможения в воздухозаборнике (а-1)
- сжатия воздуха в компрессоре силовой установки (1-2);
- смешения горячего воздуха с холодным (41-б) в цикле АВВХМ, (8-б) в цикле ТИС;
- нагрева воздуха в гермокабине (б-5);
- истечения воздуха через систему автоматического регулирования давления (5-6).

Для цикла АВВХМ характерны так же процессы:

- охлаждения сжатого воздуха в атмосферном теплообменнике (2-3);
- смешения рециркуляционного воздуха с холодным (4-41).

Для цикла ТИС:

- процесс дросселирования (2-8).

При моделировании АВВХМ и ТИС принимаем: воздух, циркулирующий в данных циклах, является идеальным газом, тогда процессы сжатия и расши-

рения считаем адиабатными и изоэнтропными, процесс теплообмена - обратимым.

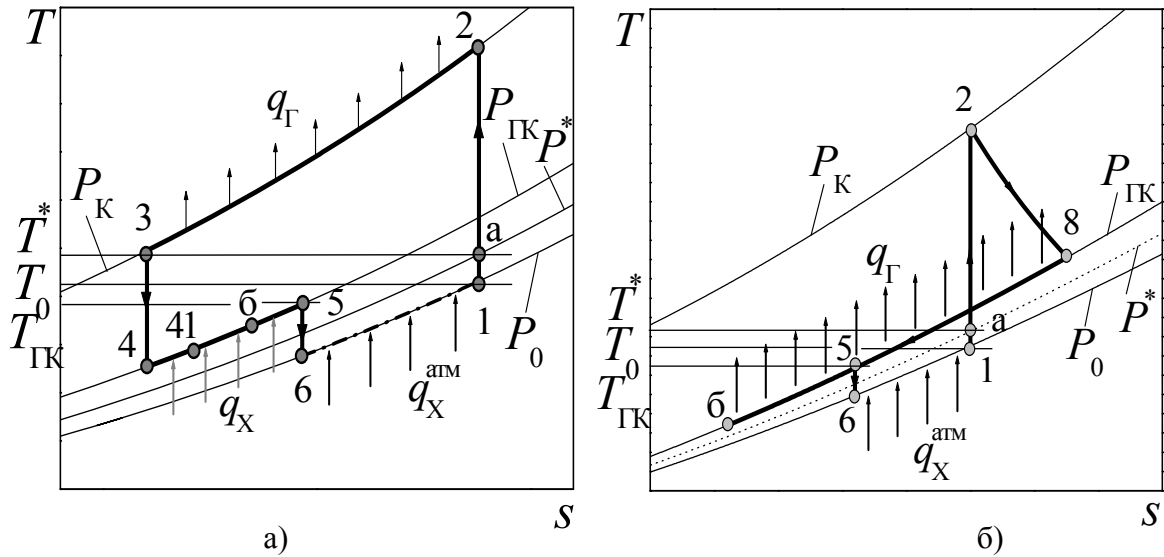


Рис. 3. $T - s$ диаграммы циклов: а) АВВХМ и б) ТИС

В работах Дьяченко Ю.В. получена зависимость практического холодильного коэффициента цикла АВВХМ в виде:

$$\varepsilon_{\text{АВВХМ}}^{\text{обп}} = \frac{q_X}{\ell_K} = \frac{\left[T_{\text{ГК}} - \frac{T^*}{\left(\frac{P_K}{P_{\text{ГК}}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} \right]}{\left[\left(\frac{P_K}{P^*} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] T^*}. \quad (1)$$

Для описания характеристик идеализированных циклов АВВХМ и ТИС, и их взаимосвязи предложены следующие параметры:

- тепловой коэффициент цикла ТИС:

$$\varepsilon_{\text{ТИС}}^{\text{ид}} = \frac{q_G}{\ell_K} = \frac{T_0 \left(\frac{P_K}{P_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - \Delta T - T_6}{T_0 \left(\frac{P_K}{P_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - T_0 \left(1 + \frac{\kappa-1}{\kappa} \cdot M^2 \right)}, \quad (2)$$

- коэффициент отношения рециркуляционного потока воздуха $M_{\text{рец}}$ к холодному $M_{\text{хол}}$ (используя уравнений теплового баланса $Q_X = Q_G$):

$$\eta = \frac{M_{\text{реци}}}{M_{\text{хол}}} = \frac{T_4 - T_{41}}{T_{41} - T_{\text{ГК}}}, \quad (3)$$

- коэффициент отношения горячего потока воздуха $M_{\text{гор}}$ к холодному $M_{\text{хол}}$:

$$\xi = \frac{M_{\text{гор}}}{M_{\text{хол}}} = (1 + \eta) \frac{T_6 - T_{41}}{T_8 - T_6}, \quad (4)$$

- полная работа, затрачиваемая на реализацию СКВ:

$$L = M_{\text{гор}} \ell_K + M_{\text{хол}} \ell_K = \frac{M_{\text{реци}}}{\eta} \cdot (1 + \xi) \cdot \ell_K, \quad (5)$$

где ℓ_K - работа компрессора;

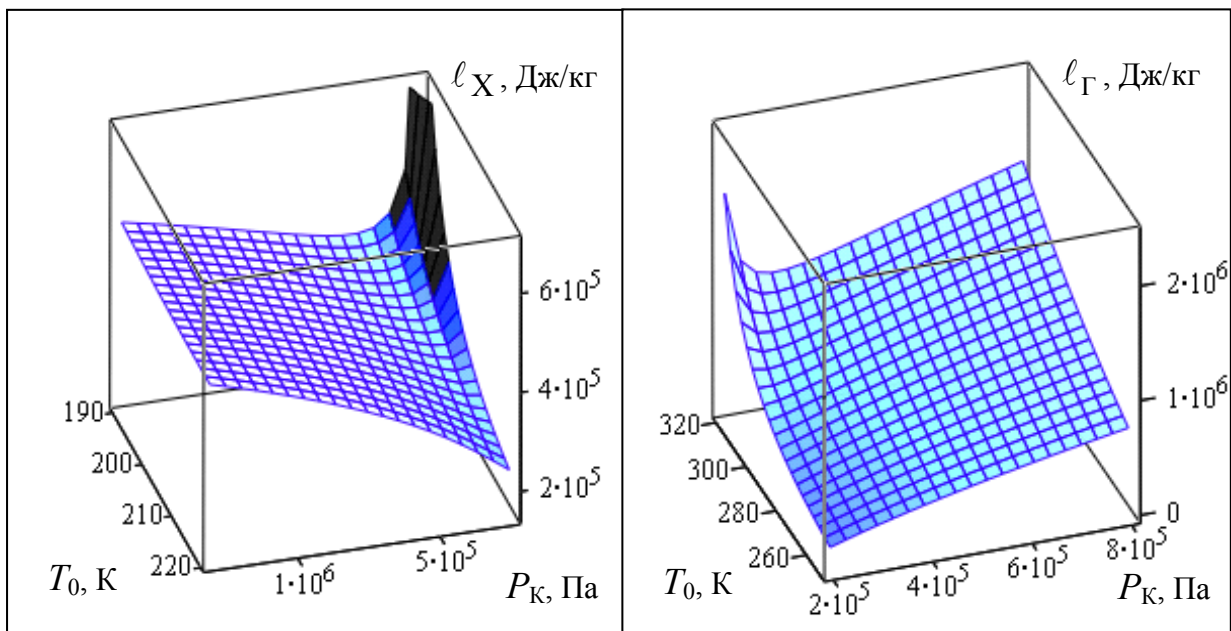
- удельная работа цикла АВВХМ:

$$\ell_X = (\xi + 1) \ell_K, \quad (6)$$

- удельная работа цикла ТИС:

$$\ell_{\Gamma} = (1 + 1/\xi) \ell_K. \quad (7)$$

На рис. 4 показаны зависимости, рассчитанные по (6) и (7), соответственно. Как следует из приведенных на рисунке данных, при определенных исходных данных в зависимостях удельных работ циклов АВВХМ и ТИС имеется явно выраженный минимум от P_K .



а)

б)

Рис. 4. Зависимость удельных работ циклов: а) АВВХМ и б) ТИС от T_0 и P_K ; при $P_0 = 0,5 \cdot 10^5$ Па, $\omega = 300$ м/с, $\eta = 0,3$

Численный анализ показал, что для цикла АВВХМ существует и оптимальная высота полета. Следовательно, существуют рациональные режимы работы подсистем по давлению за компрессором и высоте, при которых удельная работа циклов минимальна.

Область существования СКВ по предложенной методике определяется системой неравенств, удовлетворяющей следующим требованиям:

1 - используемая энергия компрессора имеет положительное значение

$$\ell_K \geq 0, \quad (8)$$

2 - числитель и знаменатель коэффициента ξ характеризуют процессы нагрева холодного воздуха и охлаждения горячего, соответственно, и имеют положительные значения по физическому смыслу

$$(1 + \eta) \cdot (T_6 - T_{41}) > 0, \quad (9)$$

$$T_8 - T_6 > 0. \quad (10)$$

Решение системы неравенств относительно исходных параметров является теоретической областью существования идеализированных циклов СКВ. Численный анализ показал, что решение данной системы меняется в зависимости от численного значения параметров.

На рис. 5 показаны предельные случаи реализации циклов, определяемые данной системой неравенств. Предложенный метод термодинамического анализа позволил описать механизмы формирования границ области существования циклов СКВ.

Для определения термодинамической эффективности всей СКВ получены:

- теоретический коэффициент термодинамической эффективности СКВ (выраженный через параметр связи циклов ξ), который представляет собой отношение полной холодо- и теплопроизводительности циклов входящих в СКВ к полной работе, затраченной на реализацию системы:

$$\Psi_{СКВ}^{идт} = \frac{M_{хол} \cdot (q_X + q_X^{атм}) + M_{гор} \cdot q_{Г}}{L} = \frac{(T_5 - T_4) + (T_1 - T_6) + \xi \cdot (T_8 - T_6)}{(1 + \xi) \cdot (T_2 - T_a)}, \quad (11)$$

- практический коэффициент термодинамической эффективности СКВ, характеризующий отношение полезной холодо- и теплопроизводительности циклов к работе системы:

$$\Psi_{\text{СКВ}}^{\text{идп}} = \frac{M_{\text{хол}} \cdot q_X + M_{\text{гор}} \cdot q_{\Gamma}}{L} = \frac{(T_5 - T_4) + \xi \cdot (T_8 - T_6)}{(1 + \xi) \cdot (T_2 - T_a)}, \quad (12)$$

- расход воздуха $M_{\text{СКВ}}$, отбираемый от компрессора силовой установки в систему кондиционирования:

$$M_{\text{СКВ}} = M_{\text{хол}} + M_{\text{гор}} = \frac{M_{\text{реци}}}{\eta} \cdot (1 + \xi). \quad (13)$$

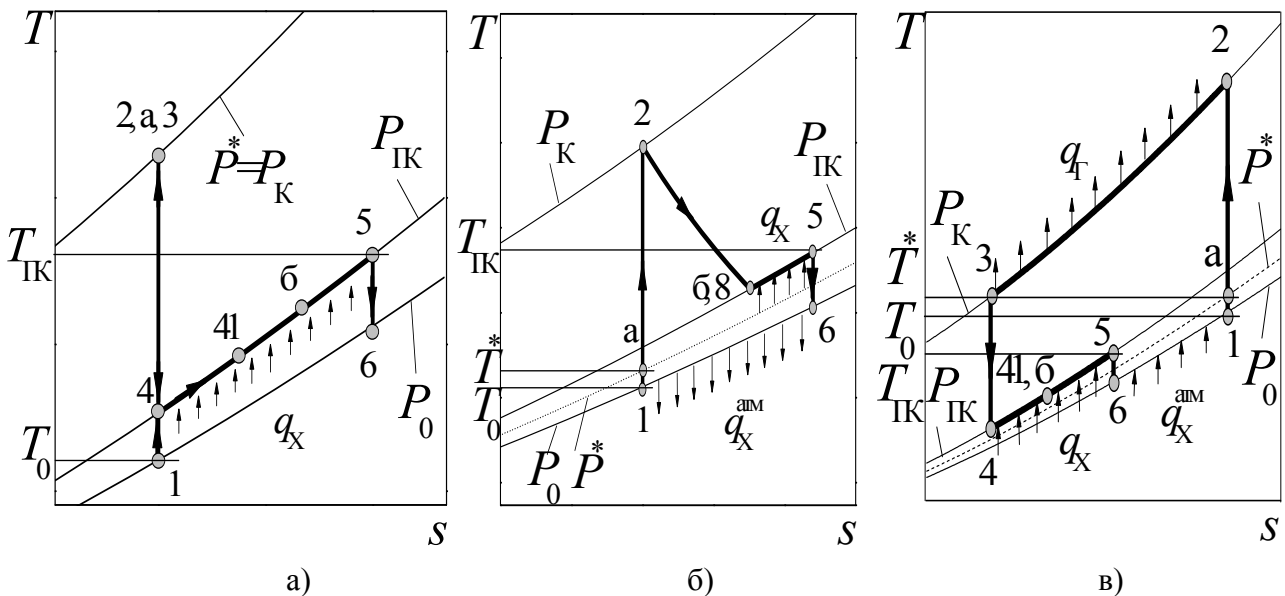


Рис. 5. Предельные случаи реализации циклов АВВХМ и ТИС в составе СКВ:
 а) используемая удельная работа компрессора $\ell_K \rightarrow 0$; б) процесс охлаждения горячего воздуха отсутствует, $M_{\text{хол}} \rightarrow 0$; в) процесс нагрева холодного воздуха отсутствует, $M_{\text{гор}} \rightarrow 0$

На рис. 6 показаны зависимости коэффициентов термодинамической эффективности циклов АВВХМ, ТИС и СКВ в целом от давления за компрессором и атмосферной температуры. Для определения закона изменения эффективности проведен параметрический анализ. Наличие оптимума в зависимости говорит о том, что существуют наиболее рациональные режимы работы циклов СКВ.

Из анализа рис. 6(б) следует, что наличие максимума термодинамической эффективности системы обуславливается сложным взаимодействием подсистем генерации холода и тепла.

Зависимости (1) – (13) позволили провести комплексный анализ идеализированных циклов АВВХМ и ТИС, входящих в состав СКВ, а так же СКВ в целом.

Данная методика анализа сопряженных циклов СКВ показывает, что существует сложный механизм влияния исходных параметров на работу циклов. При определенных сочетаниях параметров имеются такие оптимальные режимы работы, при которых затраты на реализацию циклов минимальны.

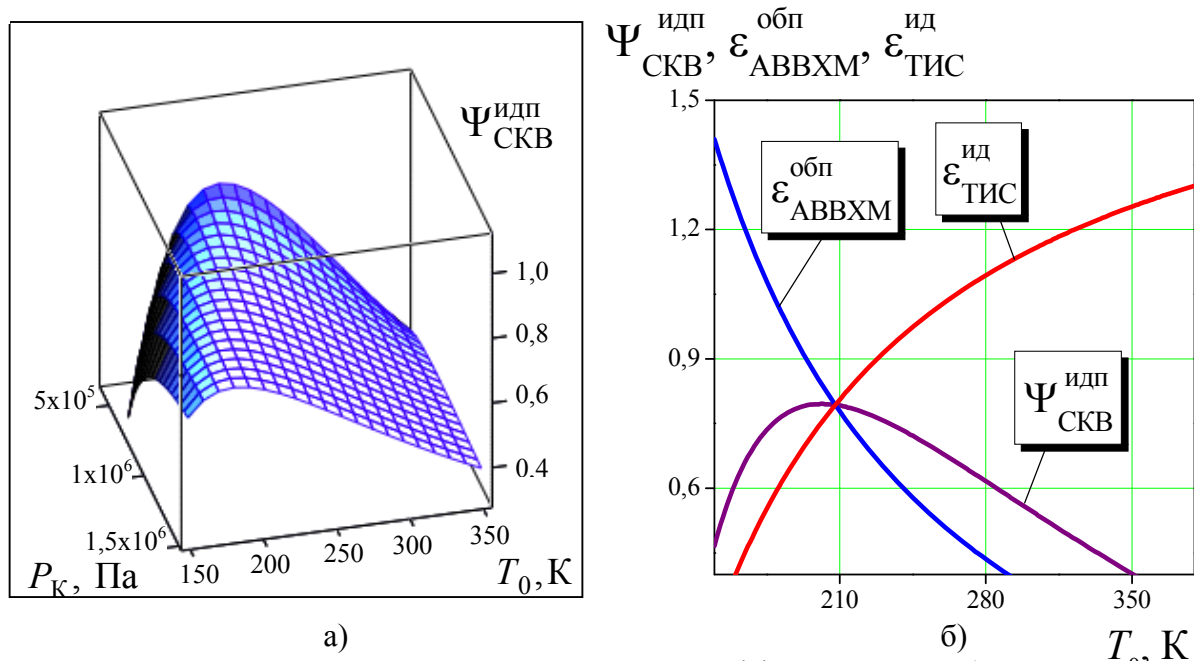


Рис. 6. Зависимости термодинамических эффективностей: а) СКВ от T_0 и P_K при $P_0 = 0,3 \times 10^5$ Па, $\omega = 300$ м/с, $\eta = 0,3$; б) АВВХМ, ТИС, СКВ от T_0 ; при $P_K = 8 \times 10^5$ Па, $P_0 = 0,5 \times 10^5$ Па, $\omega = 300$ м/с, $\eta = 0,3$

В третьей главе рассматриваются физическая и математическая модели нерегенеративной СКВ с двухступенчатым сжатием, рис. 7.

Предложенным методом получены аналитические зависимости для удельных работ циклов АВВХМ и ТИС, термодинамической эффективности цикла СКВ, а так же зависимость, определяющая расход воздуха, отбираемого от компрессора в систему кондиционирования воздуха. Определена система неравенств, обуславливающая область реализации циклов СКВ.

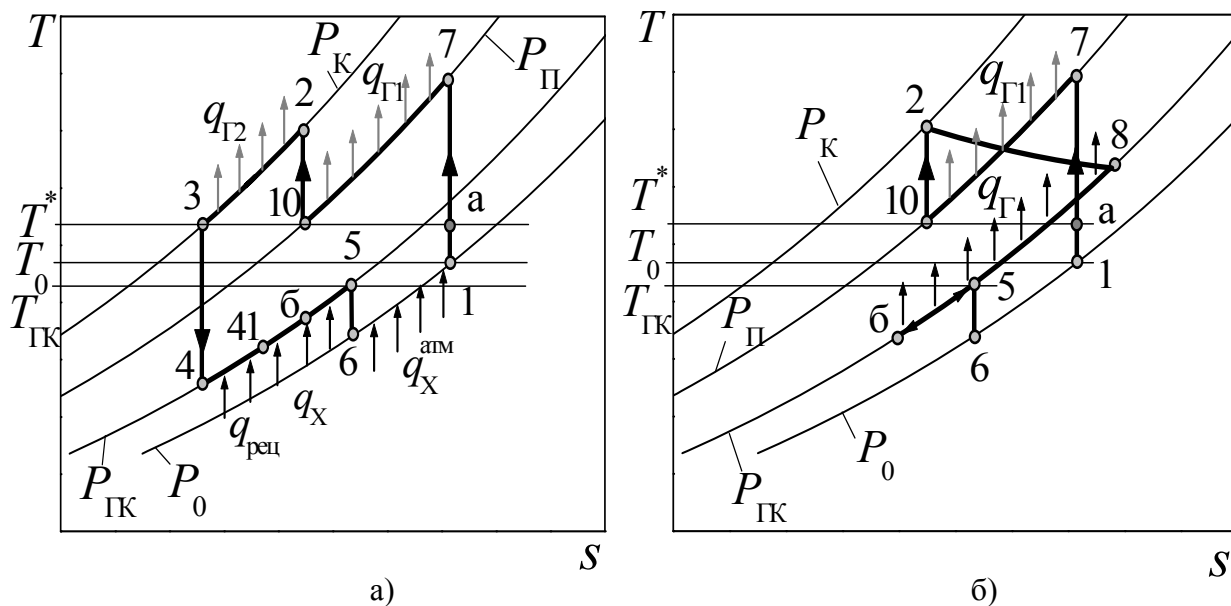


Рис. 7. $T - s$ диаграммы циклов: а) АВВХМ и б) ТИС

В четвертой главе рассматриваются физическая и математическая модели регенеративной СКВ с двухступенчатым сжатием, рис. 8. В отечественной авиации СКВ такого типа практически реализована на самолетах ТУ-204, ТУ-214, ТУ-334.

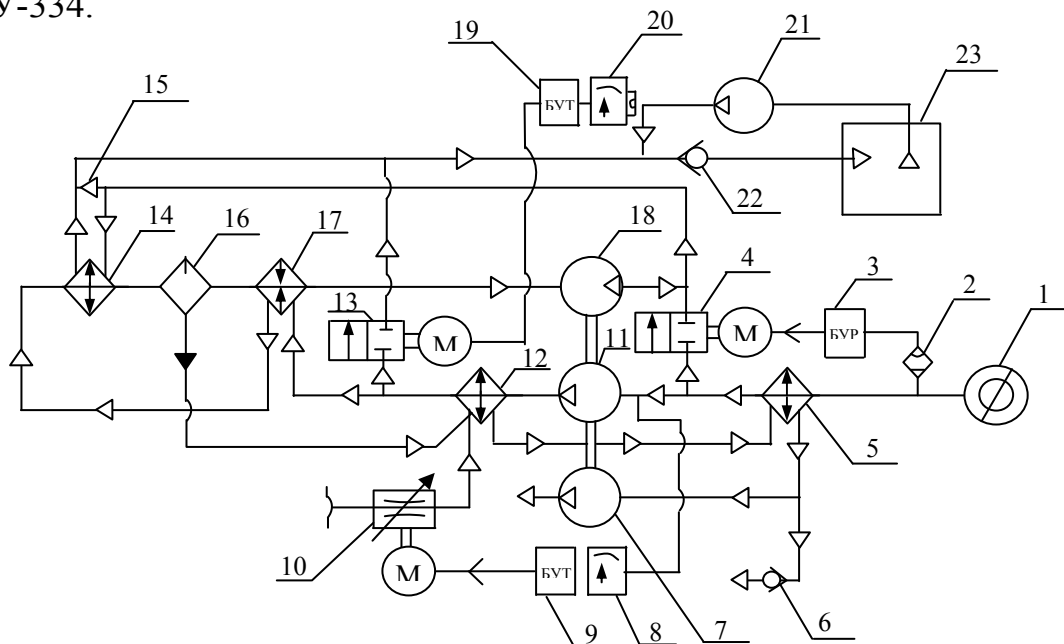


Рис. 8. Принципиальная схема СКВ самолета ТУ-204: 1 - отбор ВВД; 2 - датчик расхода; 3 - блок управления расходом; 4 - клапан обводной линии; 5 - первичный теплообменник; 6 - обратный клапан; 7 - вентилятор ТХ; 8 - датчик температуры; 9 - блок управления температурой; 10 - заслонка линии продувочного воздуха; 11 - компрессор ТХ; 12 - основной теплообменник; 13 - заслонка линии регулирования температуры; 14 - конденсатор; 15 - обводной канал конденсатора; 16 - влагоотделитель; 17 - регенератор; 18 - турбина ТХ; 19 - блок управления температурой; 20 - датчик температуры; 21 - вентилятор линии рециркуляции; 22 - обратный клапан ГК; 23 - ГК

Представлены схемы АВВХМ и ТИС в составе СКВ, а так же $T-s$ и $P-v$ диаграммы этих циклов, рис. 9, на основе которых составлена математическая модель СКВ.

С помощью предложенного метода комплексного анализа разработана система сопряженных циклов (прямого и обратного), определяющих работу регенеративной системы кондиционирования воздуха с двухступенчатым сжатием. Получены аналитические зависимости, определяющие работу циклов, термодинамическую эффективность, расходные характеристики системы.

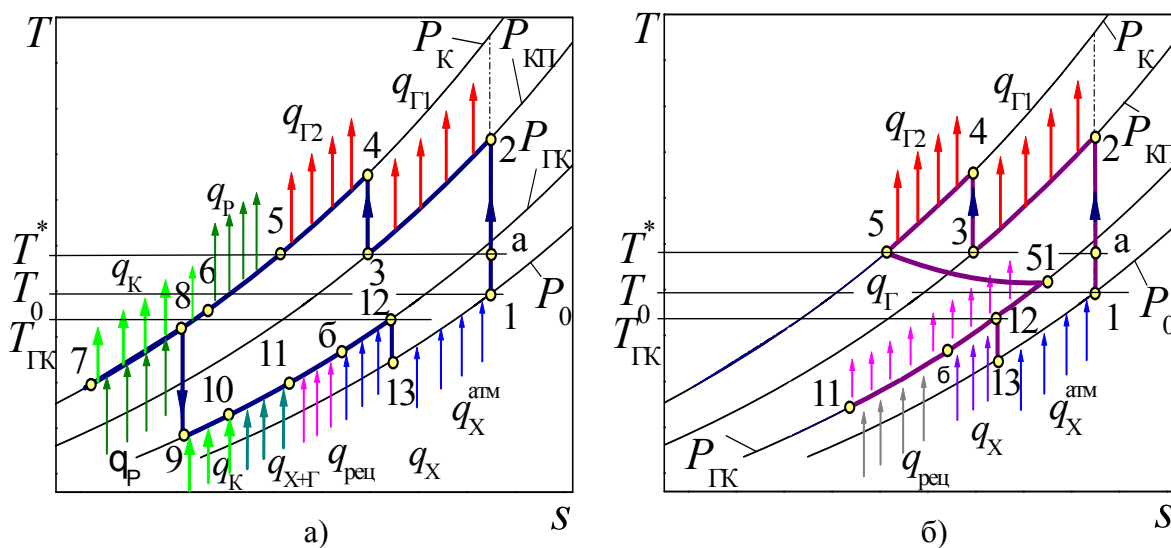


Рис. 9. $T-s$ диаграммы циклов: а) АВВХМ и б) ТИС

В пятой главе проводится сравнительный анализ циклов СКВ: нерегенеративной «Н», нерегенеративной с двухступенчатым сжатием – «НС», регенеративной с двухступенчатым сжатием – «РС». На рис. 10 наглядно показаны расчетные предельные значения скорости полета ω и атмосферной температуры T_0 , определенные с помощью предложенного метода термодинамического анализа.

Заштрихованная зона является областью реализации циклов СКВ. Кривые, ограничивающие область существования системы, представляют собой:

«а» - характеризует предельное использование системой удельной работы сжатия компрессора ($l_K = 0$); «в» - предельный случай процесса охлаждения горячего воздуха, ($M_{хол} \rightarrow 0$), знаменатель коэффициента ξ ; «с» - предельный

случай процесса нагрева холодного воздуха ($M_{гор} \rightarrow 0$), числитель коэффициента ξ .

Рассмотренные механизмы работают совместно, но при определенных условиях каждый из них может иметь доминирующее значение. Так, по данным рис. 10(а) существует такое значение температуры $T_0^{пер}$, при котором кривые, ограничивающие область реализации цикла, определяются разными процессами. Максимальные предельные значения скорости полета соответствуют случаю $T_0 = T_0^{пер}$.

Сравнительный анализ областей существования СКВ показал, что в регенеративных СКВ эти области находятся в более узком диапазоне скоростей полета ω , давления за компрессором P_K , атмосферного давления P_0 , а так же атмосферной температуры T_0 . Это объясняется наличием «петли», что способствует протеканию процесса смешения горячего и холодного потоков воздуха в регенеративной СКВ_{PC} в более высоком диапазоне температур, чем в нерегенеративных, а так же более низкой температурой, при которой формируются холодный и горячий потоки воздуха.

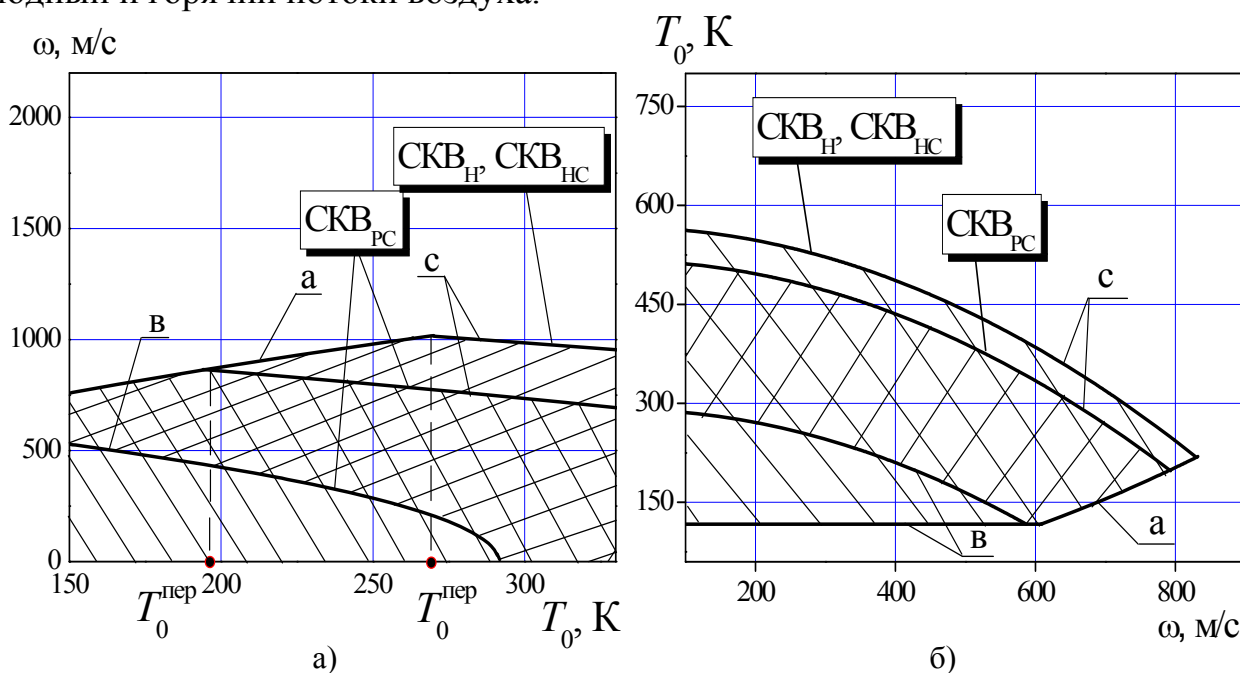


Рис. 10. Область реализации циклов СКВ: а) по скорости полета от температуры атмосферы при $P_0 = 0,2 \cdot 10^5$ Па, $P_K = 8 \cdot 10^5$ Па, $\eta = 0,5$;
 б) по атмосферному давлению от скорости полета, при $P_K = 8 \cdot 10^5$ Па, $P_0 = 0,3 \cdot 10^5$ Па, $\eta = 0,5$

На рис. 11 приведены графические зависимости влияния режимных параметров – скорости полета ω , давления цикла P_K , а также атмосферной температуры T_0 на термодинамическую эффективность СКВ. Из приведенных данных следует, что зависимости термодинамической эффективности СКВ от данных параметров имеют явно выраженные максимумы. Следовательно, имеются оптимальные режимы работы СКВ от параметров ω , P_K и T_0 .

Из проведенного анализа следует, что регенеративная СКВ, в общем случае, характеризуется меньшей термодинамической эффективностью, чем нерегенеративные $\Psi_{СКВ_{PC}}^{идп} < \Psi_{СКВ_{H}}^{идп} < \Psi_{СКВ_{HC}}^{идп}$ при любых значениях исходных параметров ω , P_0 , T_0 и P_K . Это объясняется наличием петли в цикле АВВХМ и более низкой температурой рабочего воздуха в цикле ТИС, что приводит к уменьшению тепловых потоков q_X и q_T в циклах подсистем.

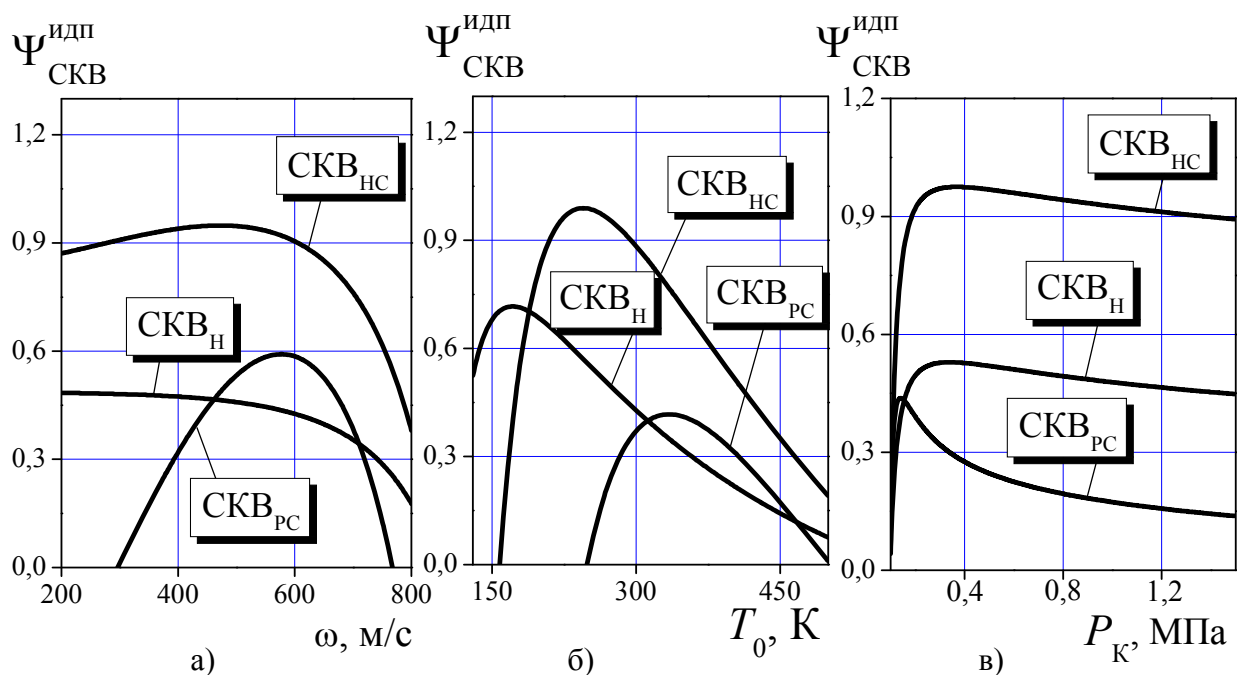


Рис. 11. Зависимость коэффициента термодинамической эффективности СКВ при $\eta=0,5$: а) от скорости полета, при $P_K = 10 \cdot 10^5$ Па, $P_0 = 0,2 \cdot 10^5$ Па, $T_0 = 250$ К; б) от атмосферной температуры при $P_K = 10 \cdot 10^5$ Па, $P_0 = 0,3 \cdot 10^5$ Па, $\omega = 300$ м/с; в) от давления за компрессором при $P_0 = 0,2 \cdot 10^5$ Па, $T_0 = 250$ К, $\omega = 350$ м/с

В разделе 5.4 исследован механизм и проведен сравнительный анализ влияния исходных параметров ω , P_0 , T_0 и P_K на расход воздуха $M_{СКВ}$, отбираемый от компрессора силовой установки в СКВ. На рис. 12 приведены гра-

фические зависимости влияния скорости полета ω и атмосферной температуры воздуха T_0 на расходные характеристики СКВ.

Численный анализ влияния параметров на $M_{СКВ}$ показывает, что при любых значениях ω , P_0 , T_0 и P_K расход воздуха $M_{СКВ}$ в регенеративной СКВ больше, чем в нерегенеративных. Уменьшению $M_{СКВ}$ способствует: увеличение скорости ω и температуры T_0 , а так же уменьшение давления P_0 . Установлено, что количество воздуха, $M_{СКВ}$, отбираемого в систему кондиционирования воздуха от компрессора зависит от того, на каком этапе в СКВ происходит формирование горячего и холодного потоков воздуха. Теоретически обосновано то, что деление на более раннем этапе приводит к уменьшению $M_{СКВ}$.

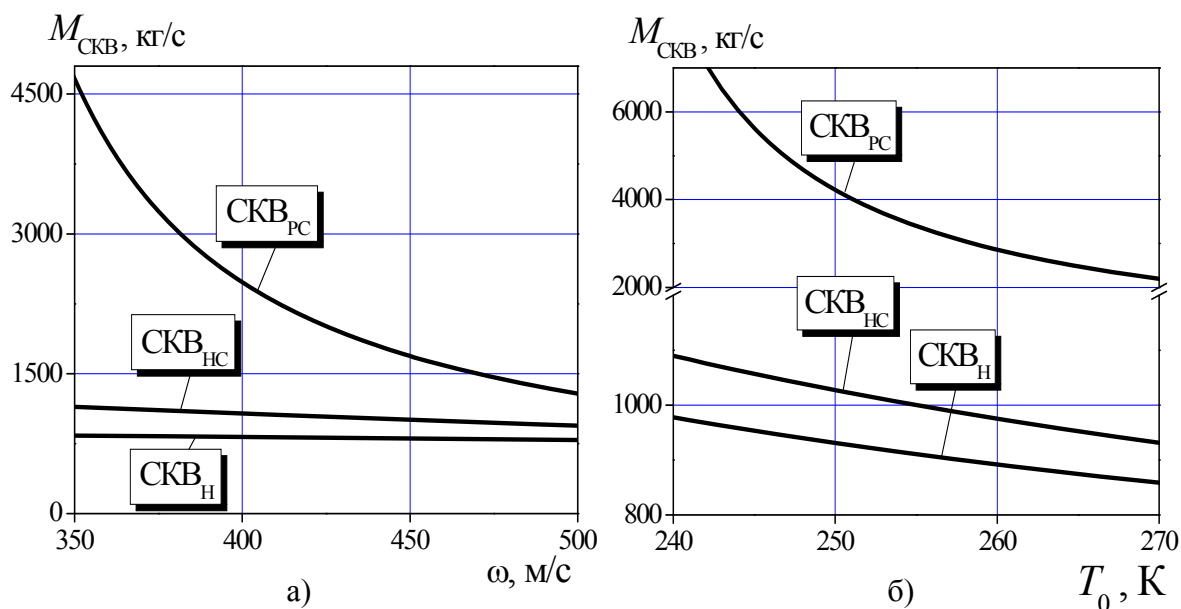


Рис. 12. Зависимость расхода $M_{СКВ}$ при $M_{реци} = 300$ кг/с, $\eta = 0,5$:

а) от скорости полета при $P_K = 12 \cdot 10^5$ Па, $T_0 = 250$ К, $P_0 = 0,4 \cdot 10^5$ Па,

б) от атмосферной температуры; при $\omega = 350$ м/с, $P_K = 8 \cdot 10^5$ Па,
 $P_0 = 0,6 \cdot 10^5$ Па

В заключении сформулированы **основные результаты**, полученные в работе:

1. Разработана методика анализа авиационной СКВ как сложной теплоэнергетической системы, состоящей из подсистем генерации тепла (прямой цикл) и холода (обратный цикл). Условиями сопряжения этих циклов приняты введенные коэффициенты соотношения расходов горячего, холодного и рецир-

куляционного воздуха. Данная методика позволила получить новые данные по внутренним связям системы, влиянию исходных параметров и проведению комплексного термодинамического анализа циклов СКВ.

2. Разработаны термодинамические модели идеализированных циклов авиационных СКВ:

- нерегенеративной схемы с одноступенчатым сжатием, применяемой на реактивных самолетах первого поколения – ТУ-104, ТУ-134, ТУ-154, ИЛ-62, ИЛ-86;

- нерегенеративной схемы с двухступенчатым сжатием,

- регенеративной схемы с двухступенчатым сжатием, применяемой на самолете ТУ-204 и его аналогах – ТУ-214, ТУ-334, Боинг-757(767), А-300(310).

3. Развита методика численного определения области реализации идеализированных циклов СКВ на основе разработанных термодинамических моделей. Предложенная методика позволила исследовать механизмы формирования предельных условий.

4. Выполнен комплексный термодинамический анализ идеализированных циклов авиационной системы кондиционирования воздуха типовых схем (нерегенеративной одноступенчатой, нерегенеративной двухступенчатой, регенеративной двухступенчатой по схеме «петля»), определены области существования и термодинамические эффективности СКВ каждой из них. Проведена их сравнительная оценка. Теоретически установлено:

- регенерация в цикле АВВХМ и уменьшение температуры рабочего воздуха в цикле ТИС приводит к уменьшению области реализации циклов СКВ по исходным параметрам: на высоте $H = 10$ км при «горячей» атмосфере наличие петли в цикле АВВХМ уменьшает предельную скорость полета до 25 %, а верхний предел атмосферной температуры до 10 %.

- применение «петли» в цикле АВВХМ и понижение температуры, при которой формируются холодный и горячий потоки, уменьшает холодильный и тепловой коэффициенты: на высоте $H = 10$ км при «горячей» атмосфере уменьшение холодильного коэффициента составляет 10 %, понижение температуры

рабочего воздуха в цикле ТИС на 1 градус приводит к уменьшению теплового коэффициента на 4 %. Определено существование оптимальных условий реализации циклов АВВХМ и ТИС по удельной работе и выполнен анализ этих условий. Получены аналитические зависимости для оптимального давления цикла и оптимального давления атмосферы.

– термодинамическая эффективность регенеративной СКВ ниже, чем нерегенеративных за счет наличия «петли» в цикле АВВХМ. Определено существование рациональных условий реализации циклов СКВ с точки зрения термодинамики.

– увеличение температуры рабочего воздуха в цикле ТИС приводит к уменьшению требуемого для СКВ расхода воздуха, а наличие «петли» в цикле АВВХМ – к его увеличению.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

1. Пащенко Н. И. Оценка термодинамической эффективности авиационной системы кондиционирования воздуха / Н. И. Пащенко, Ю. В. Дьяченко // Научный вестник НГТУ. – 2010. – №1(38). – С. 185-190.

2. Пащенко Н. И. Термодинамическая модель авиационной системы кондиционирования воздуха / Н. И. Пащенко // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона». – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – С. 122-125.

3. Пащенко Н. И. Моделирование авиационной системы кондиционирования воздуха регенеративного типа ступенчатого сжатия. Физическая модель / Н. И. Пащенко // Сборник научных статей НГТУ. – 2007. – № 4(50). – С. 27-32.

4. Пащенко Н. И. Моделирование авиационной системы кондиционирования воздуха регенеративного типа ступенчатого сжатия. Математическая модель / Н.И. Пащенко // Сборник научных статей НГТУ. – 2007. – № 4(50). – С. 33-38.

5. Пащенко Н. И. Моделирование авиационной системы кондиционирования воздуха регенеративного типа ступенчатого сжатия / Н. И. Пащенко, Ю. В. Дья-

ченко // Доклады Академии наук высшей школы России. – 2008. – № 2(11). – С. 98-108.

6. Пашенко Н. И. Термодинамическая модель авиационной системы кондиционирования воздуха / Н. И. Пашенко, Ю. В. Дьяченко // Авиакосмическое приборостроение. – 2008. – № 12. – С. 31-37.

7. Пашенко Н. И. Анализ влияния исходных параметров на удельную работу прямого и обратного циклов системы кондиционирования воздуха / Н. И. Пашенко // Сборник научных трудов НГТУ. – 2009. – № 1(55). – С. 46-50.

8. Пашенко Н. И. Термодинамическая эффективность авиационной системы кондиционирования воздуха / Н. И. Пашенко // Труды Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации». Часть 3. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – С. 78-80.

9. Пашенко Н. И. Термодинамическая эффективность авиационной системы кондиционирования воздуха / Н. И. Пашенко, Ю. В. Дьяченко // Труды II Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос». – Санкт-Петербург: Изд-во БГДУ, 2010. – С. 64-66.

10. Пашенко Н. И. Термодинамическая эффективность авиационных систем кондиционирования воздуха / Н. И. Пашенко, Ю. В. Дьяченко // Труды XI Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона». – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – С. 479-483.

Отпечатано в типографии Новосибирского
Государственного технического университета
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
тел./факс (383) 346-08-57
формат 60 X 84/16 объем 1.5 п.л., тираж 100 экз..
заказ № 251 подписано в печать 13.05.2010 г