

На правах рукописи

Горбачев Максим Викторович

**ТЕРМОДИНАМИКА РЕАЛЬНЫХ ЦИКЛОВ
СИСТЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА**

01.04.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2009

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 » декабря 2009 г. в 14 час. 00 мин. 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 » ноября 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета:
кандидат технических наук, доцент

Шаров Ю.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время развитие авиационных систем кондиционирования воздуха (СКВ) идет по пути совершенствования агрегатного состава. В результате такой работы агрегаты современных систем имеют очень высокие технические характеристики. Однако термодинамическая эффективность цикла остается на слишком низком уровне, как правило, она не превышает 0,3-0,6. Уменьшение термодинамической эффективности компенсируется увеличением расхода рабочего воздуха. Именно поэтому в современных СКВ расходы воздуха значительно больше, чем нормативные значения на вентиляцию. Увеличение расхода отбираемого от компрессора силовой установки воздуха приводит к уменьшению тяги и дальности полета. В результате приведенная взлетная масса СКВ увеличивается, что эквивалентно уменьшению полезной загрузки самолета. Таким образом, направление увеличения термодинамической эффективности СКВ путем повышения эффективности агрегатов уже ограничено.

Дальнейшее увеличение термодинамической эффективности СКВ возможно только с помощью применения новых схемных построений и синтеза схемных решений. Сказанное определяет актуальность темы диссертации, посвященной научному обоснованию и разработке методики анализа и комплексной оптимизации реальных циклов СКВ. В данной работе авиационная СКВ рассматривается как сложная теплоэнергетическая система, состоящая из двух сопряженных подсистем – генерации тепла (прямой цикл) и холода (обратный цикл). Термодинамическое совершенствование циклов каждой из подсистем позволит увеличить термодинамическую эффективность всей СКВ.

Целью работы является: разработка методики и исследование методом численного моделирования термодинамической эффективности реальных циклов СКВ. Для этого решаются следующие задачи:

- 1) разработка методики численного моделирования СКВ;

2) разработка методики оценки термодинамической эффективности обратного цикла авиационной воздушно-холодильной машины (АВВХМ) и прямого цикла теплоиспользующей системы (ТИС);

3) исследование термодинамической эффективности реальных циклов подсистем СКВ;

4) разработка схемного построения усовершенствованной СКВ.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработана методика численного моделирования СКВ.

2. Впервые разработан метод и выполнен комплексный термодинамический анализ реальных циклов подсистем, входящих в состав авиационной системы кондиционирования воздуха с двукратной регенерацией.

3. Выполнен анализ влияния исходных параметров и характеристик агрегатного состава на термодинамическую эффективность реальных циклов СКВ.

4. Разработана схема и проведен термодинамический анализ усовершенствованной СКВ.

Связь с научными программами. Работа выполнена при финансовой поддержке грантов: РФФИ 05-08-33588 и РФФИ 09-08-00321-а.

Практическая ценность работы:

1. Выполнен анализ влияния необратимых потерь агрегатного состава на термодинамическую эффективность реальных циклов СКВ с двукратной регенерацией.

2. Разработана методика расчета необратимых потерь реальных циклов на примере СКВ самолета ТУ-204.

3. Полученные результаты могут быть использованы при разработке СКВ нового поколения.

Достоверность полученных результатов определяется сравнительным анализом полученных в диссертации расчетных данных с известными в литературе экспериментальными данными, а также тщательным тестированием программных модулей.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика численного моделирования СКВ.

2. Методика комплексного термодинамического анализа реальной СКВ, в том числе: оценка термодинамической эффективности реальных циклов, влияние исходных параметров, характеристик агрегатного состава, режимов полета.

3. Термодинамический анализ усовершенствованной схемы СКВ.

Личный вклад. Работа выполнена в тесном соавторстве с Ю.В. Дьяченко, который является научным руководителем работы, ему принадлежит постановка задачи и обсуждение полученных результатов. Автору принадлежит разработка программы моделирования, проведение численных экспериментов, разработка методики и проведение термодинамического анализа реальных циклов.

Апробация работы. Результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на 12 конференциях и семинарах, в том числе: Всероссийская научная конференция молодых ученых “Наука. Технологии. Инновации” (Новосибирск, НГТУ, 2005, 2006, 2007, 2008); Всероссийская научно-техническая конференция “Наука. Промышленность. Оборона” (Новосибирск, НГТУ, 2006, 2007, 2008, 2009); Международная конференция “Авиация и космонавтика” (Москва, МАИ (ТУ), 2006, 2007); Международная молодежная научная конференция “XV Туполевские чтения” (Казань, КГТУ-КАИ, 2007); Тринадцатая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов (Москва, МЭИ (ТУ), 2007).

Публикации. Всего по теме диссертации опубликовано 16 работ: из них 4 научные статьи в рецензируемых изданиях, вошедших в перечень, рекомендованных ВАК; 11 трудов научных конференций; 1 в сборнике научных трудов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Общий объем диссертации составляет 164 страниц, включая 88 рисунков и 3 таблицы. Список используемых источников содержит 84 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, ее научная и практическая значимость, новизна работы, сформулированы задачи исследования, дано краткое содержание диссертации.

В первой главе выполнен анализ современного состояния воздушно-холодильных машин (ВХМ) и перспектив их развития. Теоретическое обоснование замкнутого цикла ВХМ выполнено в работах Мартыновского В.С. и является классическим примером обратного газового цикла, используемым практически в каждом учебнике по термодинамике. В работах В.С. Мартыновского получено выражение для холодильного коэффициента (характеризует термодинамическую эффективность) в виде:

$$\varepsilon^{\text{ОБР}} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} = \frac{1}{(P_2 / P_1)^{\frac{k-1}{k}} - 1},$$

где T_1 , P_1 – температура и давление окружающей среды; T_2 , P_2 – температура и давление за компрессором ВХМ.

Также в работах В.С. Мартыновского представлен действительный цикл ВХМ и получена обобщенная зависимость для холодильного коэффициента реального (действительного) цикла.

Основной проблемой использования в ВХМ атмосферного воздуха является наличие в нем водяных паров. При охлаждении сжатого воздуха ниже температуры точки росы происходит конденсация водяных паров, а при отрицательных температурах – кристаллизация капельной влаги. Поэтому были разработаны два типа ВХМ, в которых использовался принцип регенеративной осушки влажного воздуха. Первый тип ВХМ разработан Н.Н. Кошкиным, второй – В.С. Мартыновским и М.Г. Дубинским. Основным недостатком этих циклов является циклический процесс осушки влажного воздуха.

В настоящее время в авиационных СКВ в качестве источников холода на борту используются воздушно-холодильные машины. В известной литературе

отсутствует теоретическое обоснование реальных термодинамических циклов авиационной воздушно-холодильной машины (АВВХМ).

Широкое применение АВВХМ привело к созданию в 70-х годах прошлого столетия ряда технических предложений, направленных на практическую реализацию принципа регенеративной осушки влажного воздуха и увеличения их эффективности. Несмотря на практическую реализацию таких схем, в известной литературе данные по теоретическим и экспериментальным исследованиям весьма ограничены. Среди них следует выделить публикации:

- 1) Ю.М. Шустрова – по анализу назначения теплообменника-конденсатора;
- 2) Ю.В. Дьяченко – по развитию методики термодинамического анализа обратимых циклов воздушно-холодильных машин.

По представлению и анализу реальных циклов подсистем СКВ в известной литературе сведения отсутствуют.

Во второй главе рассматриваются физическая и математическая модели авиационной системы кондиционирования воздуха с двукратной регенерацией. В отечественной авиации СКВ такого типа практически реализована на самолетах ТУ-204, ТУ-214, ТУ-334. Данная система разработана НПО “Наука” и впервые в отечественной гражданской авиации реализует отделение влаги на линии высокого давления (“петля”).

На рис. 1 представлена расчетная схема воздушно-холодильной машины в составе СКВ, составленная на основе принципиальной схемы. В нее внесены основные магистрали и агрегаты, а также важнейшие линии перепуска рабочего воздуха. Полученная в итоге расчетная схема является основной для разработки алгоритма расчета и на ней целесообразнее всего моделировать основные режимы работы воздушно-холодильной машины в составе авиационной системы кондиционирования воздуха.

Математическая модель агрегатов АВВХМ включает в себя систему уравнений баланса энергии, баланса теплоносителей, баланса гидравлических напоров. Гидравлический и тепловой расчет каждого элемента АВВХМ проводился по паспортным характеристикам серийных агрегатов. В качестве последних ис-

пользовались следующие зависимости: тепловые и гидравлические характеристики (степень повышения давления и температуры воздуха) элементов турбохолодильной установки (ТХУ); параметры оребренных поверхностей теплообменных аппаратов и их геометрические размеры; гидравлическая характеристика влагоотделителя.

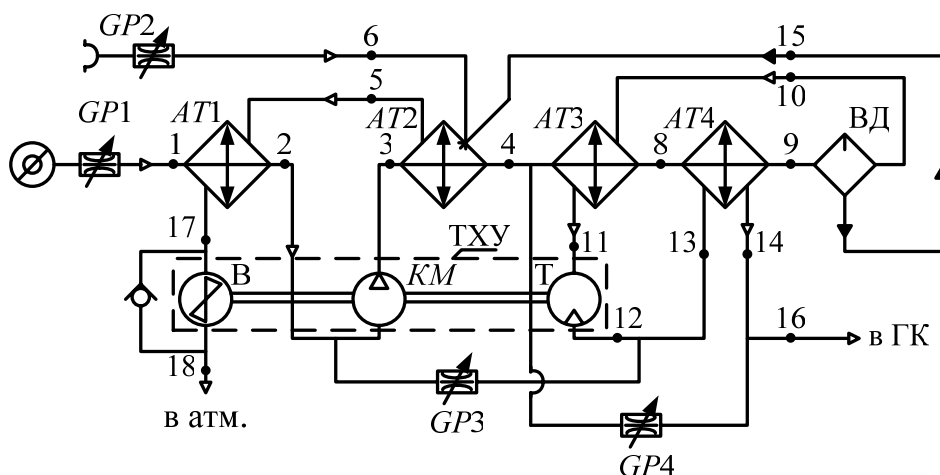


Рис. 1. Расчетная схема АВВХМ:

AT1 – предварительный теплообменник; *AT2* – основной теплообменник; *AT3* – теплообменник-регенератор; *AT4* – теплообменник-конденсатор; *GP1*, *GP2*, *GP3*, *GP4* – управляющие заслонки; ТХУ – турбохолодильная установка; В – вентилятор ТХУ; *KM* – компрессор ТХУ; Т – турбина ТХУ; ВД – влагоотделитель

Основные допущения, принятые при моделировании АВВХМ:

- 1) режим работы – стационарный;
- 2) не учитывалось изменение температуры в трубопроводах и во влагоотделителе;
- 3) режимы работы турбины, вентилятора и компрессора считались согласованными (т.е. мощность, вырабатываемая турбиной ТХУ, расходовалась на вращение компрессора и вентилятора);
- 4) утечки через агрегаты и трубопроводы не учитывались;
- 5) продувочный воздух за форсунками насыщен до $\varphi = 100\%$ (в реальных условиях $\varphi = 90 \div 95\%$).

Сравнительный анализ результатов расчета разработанной программы моделирования и данных расчетов организации “Афема”, позволил определить максимальные разбросы параметров АВВХМ:

1) по тракту охлаждения: $\Delta T \leq 7 \text{ К}$, $\Delta P \leq 17 \text{ кПа}$;

2) на выходе из подсистемы охлаждения: $\Delta T \leq 3,5 \text{ К}$, $\Delta P \leq 17 \text{ кПа}$,

(максимальное относительное отклонение составило: $\delta T_{\max} < 5 \%$, $\delta P_{\max} < 15 \%$), что свидетельствует об адекватности математической модели разработанной программы.

В разделе 2.5 проведен параметрический анализ работы АВВХМ. Получены качественные и количественные зависимости влияния влажности атмосферного воздуха и тепловой эффективности теплообменника-конденсатора на параметры рабочего воздуха АВВХМ.

В разделе 2.6 приведено описание математической модели СКВ с двукратной регенерацией. В качестве объекта моделирования использовалась схема, изображенная на рис. 2, которая составлена на основе принципиальной схемы СКВ. Расчетная схема включает в себя основные агрегаты и важнейшие линии перепуска рабочего воздуха.

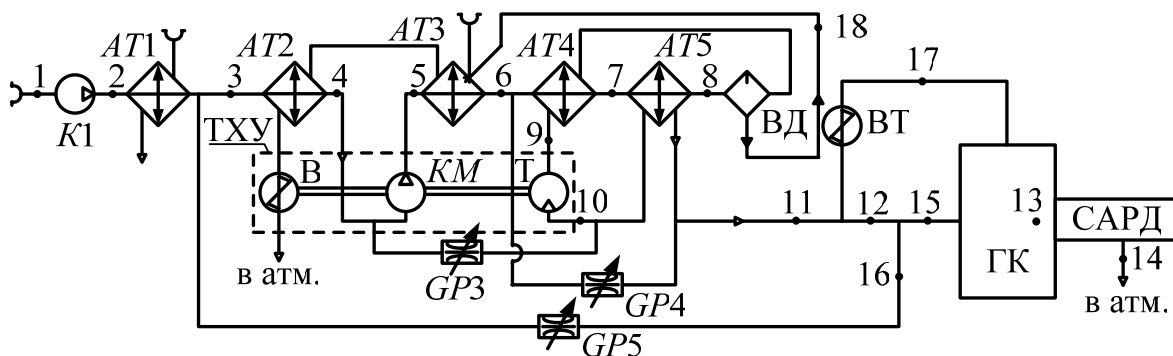


Рис. 2. Расчетная схема СКВ:

K1 – компрессор силовой установки; *AT1* – атмосферный охладитель (теплообменник); *AT2* – основной теплообменник; ТХУ – трехколесная турбохолодильная установка; В – вентилятор ТХУ; *KМ* – компрессор ТХУ; *AT3* – основной теплообменник; *AT4* – теплообменник-регенератор; Т – турбина ТХУ; *AT5* – теплообменник-конденсатор; ВД – влагоотделитель; ВТ – вентилятор рециркуляционной линии; ГК – гермокабина; САРД – система автоматического регулирования давления; *GP3*, *GP4* – заслонки перепуска рабочего воздуха; *GP5* – заслонка подмеса горячего воздуха

Математическая модель системы кондиционирования воздуха позволяет получить значения температуры, давления и влагосодержания воздуха во всех реперных точках по тракту охлаждения.

На рис. 3 показано влияние основного режимного параметра – давления за компрессором силовой установки P_{K1} , а также температуры заборного воздуха на значения температуры перед компрессором ТХУ, температуры на выходе из основного узла охлаждения, а также на изменение температуры воздуха на турбине ТХУ. Из приведенных графических данных следует, что увеличение давления P_{K1} приводит к увеличению температуры за компрессором ТХУ и температуры T_6 .

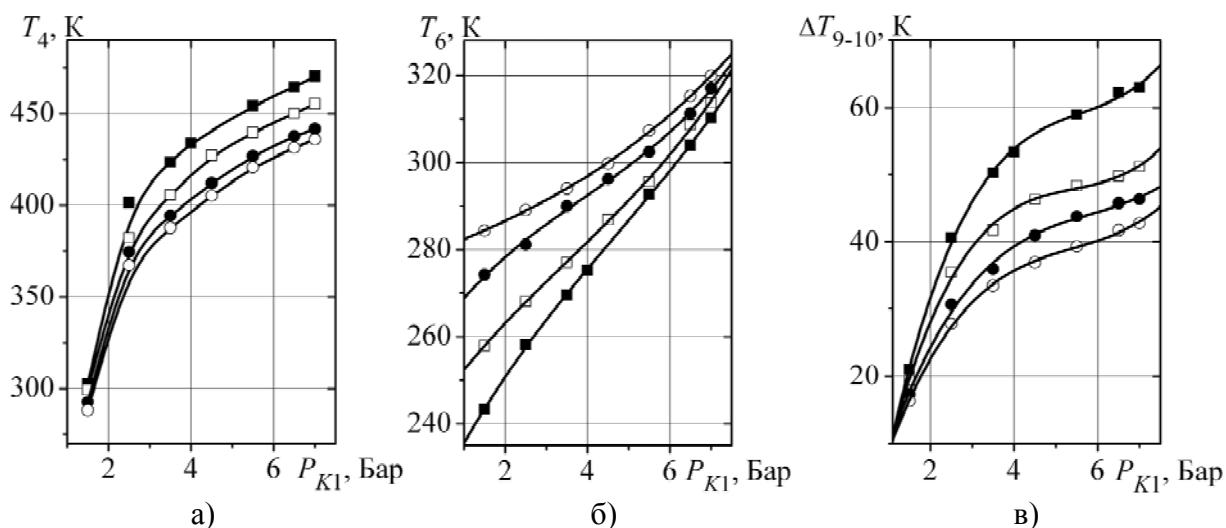


Рис. 3. Влияние давления за компрессором силовой установки и температуры заборного воздуха на: а) температуру перед компрессором ТХУ; б) температуру на выходе из основного узла охлаждения; в) изменение температуры на турбине ТХУ (■ – $T_0 = 220$ К, □ – $T_0 = 240$ К, ● – $T_0 = 280$ К, ○ – $T_0 = 300$ К)

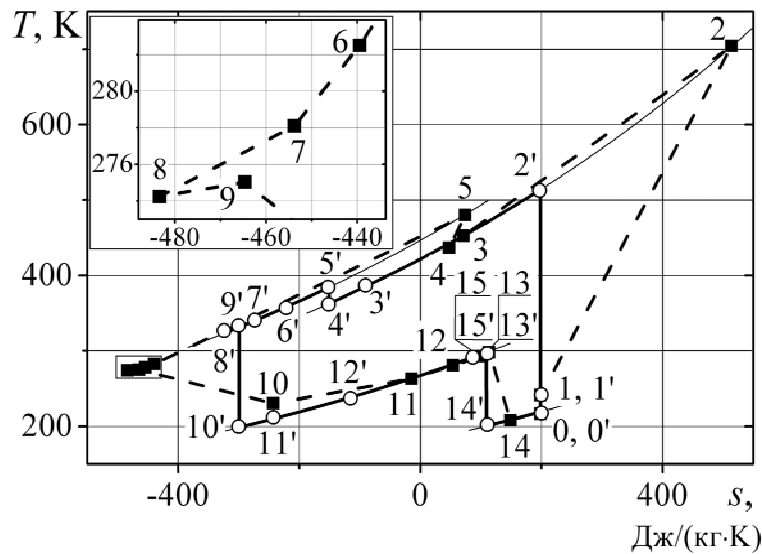
На основе данных, полученных с помощью математической модели, можно построить реальные циклы СКВ и исследовать их методами термодинамики для определения термодинамической эффективности.

В третьей главе проведен термодинамический анализ реальных циклов СКВ с двукратной регенерацией, применительно к схеме, изображенной на рис. 2.

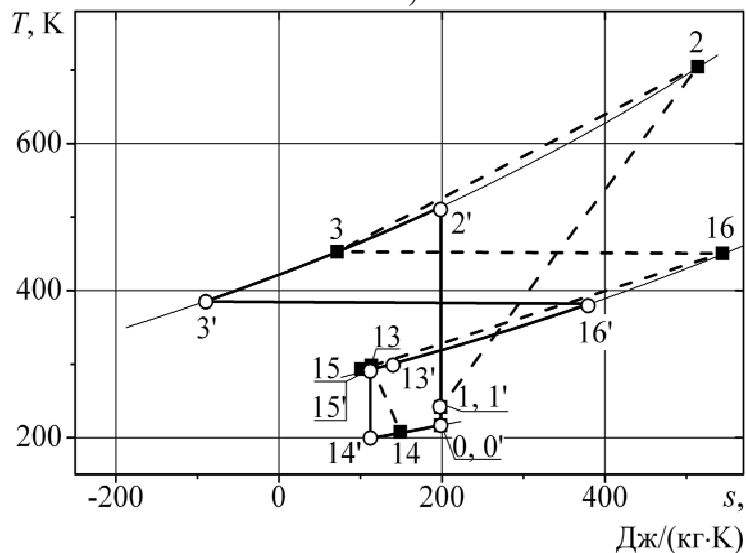
Авиационная СКВ рассматривается как сложная теплоэнергетическая система, состоящая из двух сопряженных подсистем (системы генерации холода и тепла). В основе работы каждой из этих систем лежат термодинамические циклы.

При рассмотрении реальных циклов АВВХМ и ТИС (рис. 4), установлено, что они объединены общими процессами:

1) торможения в воздухозаборнике (0-1) и сжатия воздуха в компрессоре силовой установки (1-2);



а)



б)

Рис. 4. Реальные термодинамические циклы:
а) АВВХМ; б) ТИС ($H = 10000$ м, $\omega = 222$ м/с)

- 2) охлаждения сжатого воздуха в атмосферном охладителе (2-3);
- 3) нагрева воздуха в гермокабине (15-13);
- 4) истечения воздуха через систему автоматического регулирования давления (13-14).

На рис. 4 пунктирными линиями изображены реальные циклы АВВХМ и ТИС, сплошными – теоретические циклы, реализуемые при тех же исходных параметрах.

Для определения характеристик реальных циклов АВВХМ и ТИС получены выражения в виде:

- полная холодопроизводительность реального цикла АВВХМ:

$$Q^X = c_p (G_{P4} (T_{\text{вых}} - T_{11}) + n_{\text{рец}} G_{\text{СКВ}} (T_{11} - T_{12}) + G_{P5} (T_{12} - T_{15}) + G_{\text{СКВ}} (T_{13} - T_{15})),$$

где G_{P4} , G_{P5} , $G_{\text{СКВ}}$ – расход рабочего воздуха через заслонки и через всю систему охлаждения соответственно; $T_{\text{вых}}$ – температура на выходе из узла охлаждения; $n_{\text{рец}}$ – степень рециркуляции кабинного воздуха.

- удельная холодопроизводительность реального цикла АВВХМ:

$$q^X = Q^X / G_{\text{СКВ}};$$

- холодопроизводительность в процессе атмосферного теплообмена:

$$Q_{\text{атм}}^X = c_p G_{\text{СКВ}} (T_0 - T_{13});$$

- удельная теплота атмосферного теплообмена:

$$q_{\text{атм}}^X = Q_{\text{атм}}^X / G_{\text{СКВ}};$$

- теоретический холодильный коэффициент цикла АВВХМ:

$$\varepsilon^T = (q^X + q_{\text{атм}}^X) / l_{K1}, \quad (1)$$

где l_{K1} – удельная работа сжатия компрессора силовой установки;

- практический холодильный коэффициент цикла АВВХМ:

$$\varepsilon^{\text{ПР}} = q^X / l_{K1}; \quad (2)$$

- коэффициент теплоиспользования цикла ТИС:

$$\varphi^{\text{ТИС}} = \frac{(T_0 + Z\omega^2) \left[\eta_{AT1} + (1 - \eta_{AT1}) \left(\frac{P_{K1}}{P^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] - \Delta T - T_{\text{ГК}}}{T_0 \left[\left(\frac{P_{K1}}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} . \quad (3)$$

В работах Дьяченко Ю.В. получена зависимость теоретического холодильного коэффициента цикла АВВХМ с двукратной регенерацией в виде:

$$\varepsilon^{\text{T}} = \frac{T_{\text{ГК}} + \left(T_0 - \frac{T_{\text{ГК}}}{\left(\frac{P_{\text{ГК}}}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}}} \right)}{T_0 \left[\left(\frac{P_{K1}}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} - \frac{(T_0 + Z\omega^2) \left[\frac{3\eta_{AT4}\eta_{AT5} - \eta_{AT4} - 2\eta_{AT5} + 1 - A\eta_{AT4}\eta_{AT5} + A\eta_{AT5}}{A\eta_{AT4}\eta_{AT5} + \eta_{AT4}\eta_{AT5} - A\eta_{AT4} - \eta_{AT5} + A} \right]}{T_0 \left[\left(\frac{P_{K1}}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} . \quad (4)$$

Зависимости (1) – (4) выражают термодинамическую эффективность реальных и теоретических циклов АВВХМ и ТИС.

На рис. 5 приведены графические зависимости влияния основного режимного параметра – давления цикла P_{K1} . Этот вопрос представляет наибольший интерес, так как давление для всех циклов является оптимизационным параметром. Из приведенных графических данных следует, что зависимости термодинамической эффективности циклов АВВХМ и ТИС от давления P_{K1} имеют явно выраженный максимум. Следовательно, имеется оптимальный режим работы всей СКВ от давления за компрессором силовой установки.

Внешняя схожесть зависимостей холодильного коэффициента для теоретических и реальных циклов АВВХМ и ТИС подтверждает адекватность разработанной математической модели реальных циклов.

Наличие водяных паров в атмосферном воздухе является актуальной проблемой для авиационных СКВ, так как паровая влага может претерпевать фазовые переходы. При этом происходит резкое изменение параметров рабочего воздуха по тракту охлаждения.

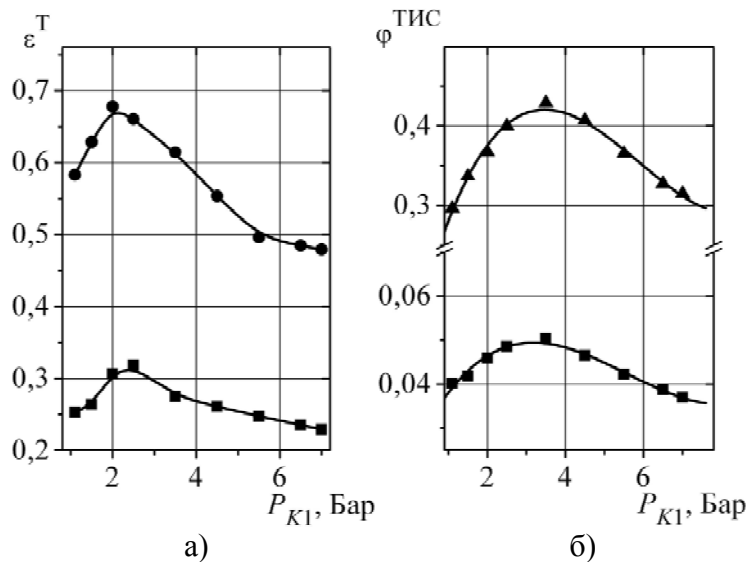


Рис. 5. Влияние давления цикла на термодинамическую эффективность циклов АВВХМ и ТИС ($H = 10000$ м, $\omega = 222$ м/с):
 ■ – мат. модель; ● – по (4); ▲ – по (3)

Графические зависимости, приведенные на рис. 6, позволяют заключить, что увеличение температуры и влажности атмосферного воздуха приводит к уменьшению термодинамической эффективности действительного цикла АВВХМ.

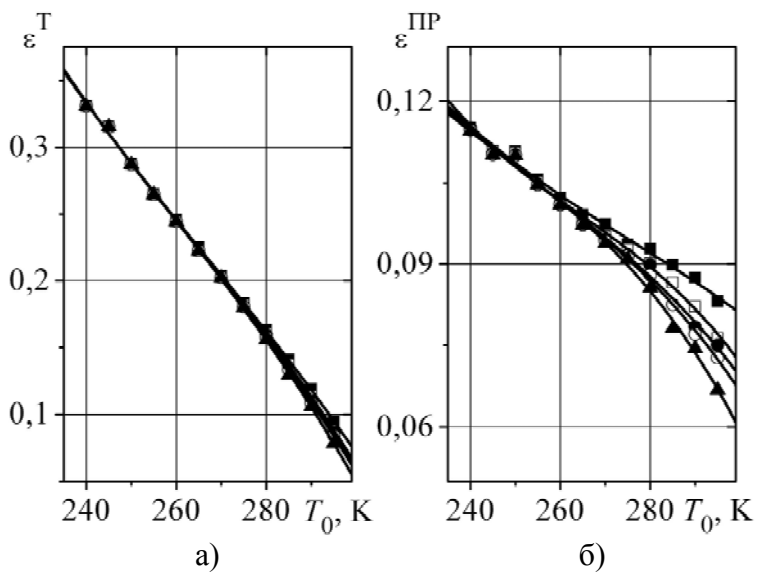


Рис. 6. Влияние температуры и влажности окружающей среды на термодинамическую эффективность цикла АВВХМ ($H=1000$ м, $\omega=77,8$ м/с):
 ■ – $\varphi = 0$; □ – 25%; ● – 50%; ○ – 75%; ▲ – 100%

Таким образом, можно заключить, что увеличение влажности атмосферного воздуха носит исключительно негативный характер на величину термодинамической эффективности реального цикла АВВХМ.

В четвертой главе предложен метод оценки влияния внутренних и внешних необратимостей на термодинамическую эффективность реальных циклов СКВ. Данный метод основан на представлении реальных циклов с последующим анализом влияния реальных характеристик и реальности процессов на термодинамическую эффективность.

На рис. 7,а,б представлены зависимости влияния тепловой эффективности теплообменника-регенератора (η_{AT4}) и теплообменника-конденсатора (η_{AT5}) на теоретический холодильный коэффициент реального цикла АВВХМ. Увеличение тепловой эффективности η_{AT5} приводит к уменьшению холодильного коэффициента реального цикла АВВХМ. Увеличение тепловой эффективности теплообменника-регенератора позволяет компенсировать уменьшение термодинамической эффективности действительного цикла. Таким образом, теплообменник-регенератор является “термодинамическим компенсатором”, который позволяет снизить негативное влияние теплообменника-конденсатора. Практическое использование $AT5$ обусловлено тем, что теплообменник-конденсатор выполняет свою основную функцию – конденсацию водяных паров при работе СКВ на влажном воздухе.

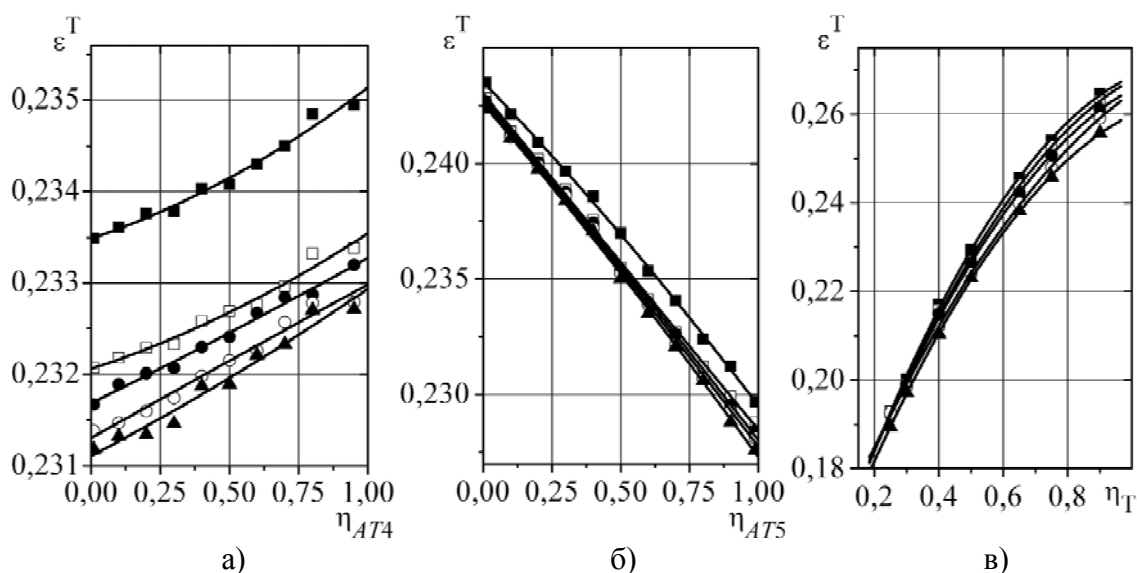


Рис. 7. Влияние характеристик агрегатов на термодинамическую эффективность реального цикла АВВХМ ($H = 1000$ м; $\omega = 75$ м/с):

■ – $\varphi = 0$; □ – 25%; ● – 50%; ○ – 75%; ▲ – 100%

На рис. 7,в представлены графические зависимости влияния адиабатного к.п.д. турбины ТХУ на термодинамическую эффективность реального цикла АВВХМ. Согласно приведенным графическим данным, увеличение к.п.д. турбины приводит к увеличению термодинамической эффективности реального цикла АВВХМ.

В разделе 4.3 проведена оценка влияния характеристик агрегатов на величину необратимых потерь термодинамической эффективности цикла АВВХМ. Необратимые потери (заштрихованная область на рис. 8,а) термодинамической эффективности ($\Delta \varepsilon^{\text{пот}}$) можно определить, как разность значений холодильных коэффициентов теоретического и реального циклов АВВХМ. Эти потери представляют собой суммарные потери по всем процессам и агрегатам, обусловленные внутренней и внешней необратимостью.

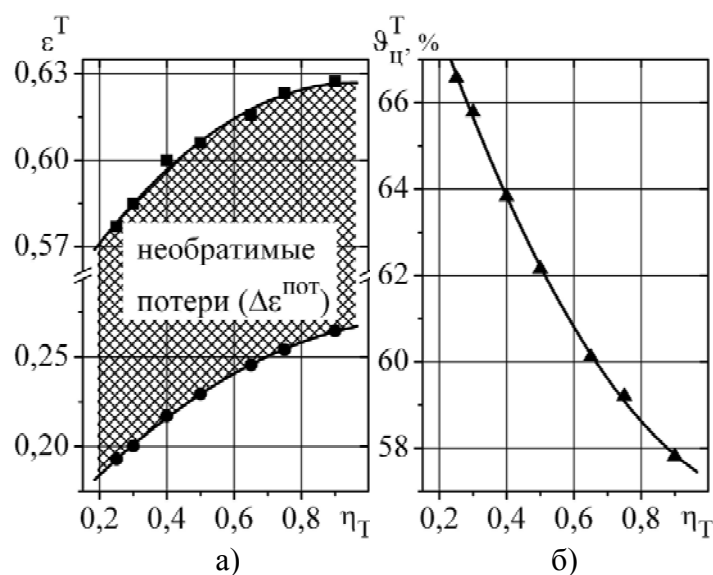


Рис. 8. Характеристики цикла АВВХМ в зависимости от к.п.д. турбины ТХУ ($H = 1000$ м; $\omega = 75$ м/с)
 ● – мат. модель; ■ – по (4)

Для количественной оценки влияния увеличения адиабатного к.п.д. турбины на величину необратимых потерь рассмотрим относительное изменение холодильного коэффициента, которое представляет собой отношение необратимых потерь к холодильному коэффициенту обратимого цикла АВВХМ:

$$\eta_{\text{ц}}^{\text{T}} = \frac{\Delta \varepsilon^{\text{пот}}}{\varepsilon^{\text{T}}} \cdot 100\%.$$

На рис. 8,б приведена зависимость влияния адиабатного к.п.д. турбины на значения $\eta_{\text{ц}}^{\text{T}}$. Из приведенных графических данных следует, что увеличение η_{T} от 0,3 до 0,9 позволяет снизить необратимые потери цикла на $\approx 9\%$.

В пятой главе предложена схема (рис. 9) и выполнен комплексный термодинамический анализ усовершенствованной авиационной воздушно-холодильной машины (УАВВХМ), который позволил:

- 1) оценить влияние исходных параметров на термодинамическую эффективность;
- 2) провести анализ оптимальных условий реализации цикла УАВВХМ;
- 3) установить области рационального применения цикла;
- 4) провести сравнительный анализ теоретических циклов УАВВХМ и АВВХМ с двукратной регенерацией.

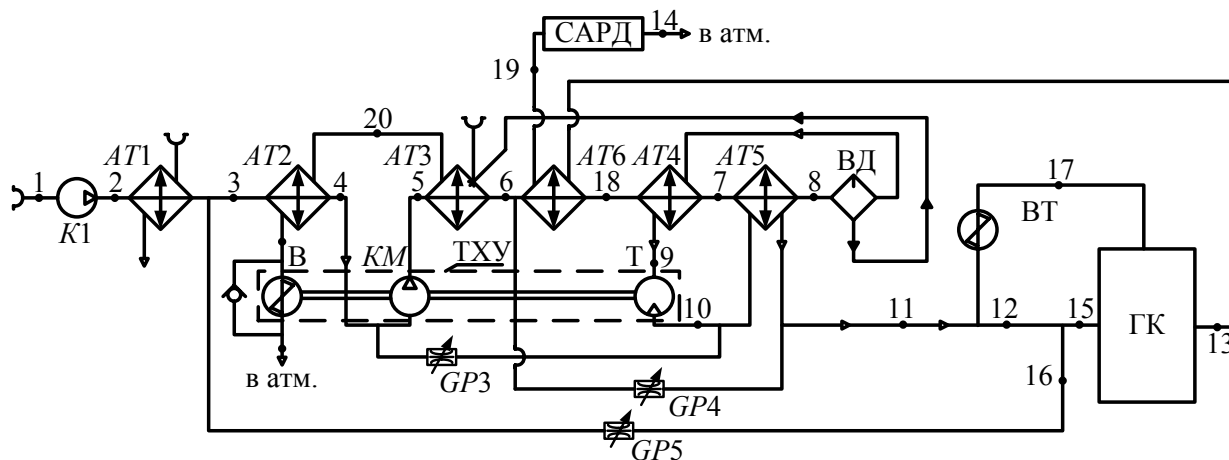


Рис. 9. Расчетная схема усовершенствованной АВВХМ:

K1 – компрессор силовой установки; *AT1* – атмосферный охладитель (теплообменник); *AT2* – предварительный теплообменник; *ТХУ* – трехколесная турбохолодильная установка; *В* – вентилятор *ТХУ*; *КМ* – компрессор *ТХУ*; *AT3* – основной теплообменник; *AT4* – первый теплообменник-регенератор; *Т* – турбина *ТХУ*; *AT5* – теплообменник-конденсатор; *AT6* – второй регенеративный теплообменник; *ВД* – влагоотделитель; *ВТ* – вентилятор рециркуляционной линии; *ГК* – гермокабина; *САРД* – система автоматического регулирования давления; *GP3*, *GP4* – заслонки перепуска рабочего воздуха; *GP5* – заслонка подмеса горячего воздуха

Отличие схемы УАВВХМ (рис. 9) от АВВХМ с двукратной регенерацией (рис. 2) состоит в наличии второго теплообменника-регенератора. Теплообменник-регенератор АТ6 введен в схему УАВВХМ для компенсации негативного влияния теплообменника-конденсатора.

Обобщенный сравнительный анализ схем можно выполнить с помощью коэффициента сравнительной эффективности, который представляет собой отношение холодильных коэффициентов реальных циклов УАВВХМ и АВВХМ с двукратной регенерацией:

$$\Psi_{\text{Д}}^{\text{T}} = \frac{\varepsilon_{\text{У}}^{\text{T}}}{\varepsilon^{\text{T}}}.$$

На рис. 10 показаны зависимости влияния исходных параметров на коэффициент сравнительной эффективности реальных циклов. Увеличение скорости полета (рис. 10,а) приводит к увеличению $\Psi_{\text{Д}}^{\text{T}}$, причем, значения коэффициента эффективности, на рассматриваемом интервале исходных параметров, всегда больше единицы. Таким образом, можно предположить, что схема УАВВХМ наиболее перспективна для скоростных самолетов.

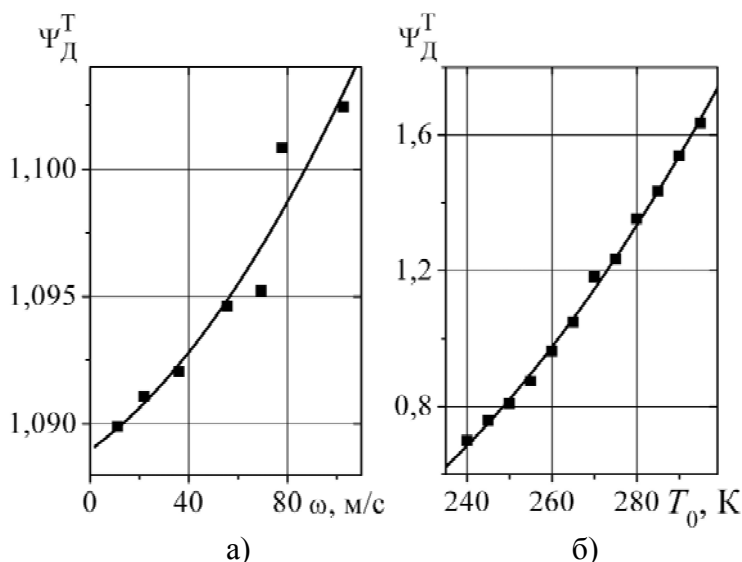


Рис. 10 Влияние исходных параметров на коэффициент сравнительной эффективности реальных циклов ($H = 10000$ м; $\omega = 222$ м/с)

Особый интерес представляет влияние параметров атмосферы на коэффициент сравнительной эффективности. Уменьшение температуры атмосферного

воздуха при увеличении высоты полета в атмосфере приводит к уменьшению коэффициента сравнительной эффективности (рис. 10,б). При температурах атмосферного воздуха $T_0 < 260\text{ К}$ коэффициент Ψ_d^T становится меньше единицы. Следует отметить, что в реальных условиях СКВ работает в режиме охлаждения только при стоянке на земле в условиях “горячей” атмосферы и при полетах на малых высотах. На средних и больших высотах воздушно-холодильная машина работает в режиме минимальной холодопроизводительности.

Таким образом, применение дополнительного регенеративного теплообменника *AT6* для рассмотренных исходных параметров приводит к увеличению коэффициента сравнительной эффективности, а, следовательно, к увеличению термодинамической эффективности цикла УАВВХМ по сравнению со схемой АВВХМ с двукратной регенерацией.

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

1. Разработана методика численного моделирования авиационной системы кондиционирования воздуха на примере СКВ самолета ТУ-204. Данные, полученные с помощью математической модели проверены сопоставлением с экспериментальными данными, известными в литературе (расхождения между ними составили: по температуре – менее 5%; по давлению – менее 15%).

2. Впервые разработано представление о реальных циклах СКВ как о сложной теплоэнергетической системе, состоящей из подсистем генерации тепла и холода. Выполнено сопоставление обратимых и реальных циклов подсистем СКВ. Установлено, что термодинамическая эффективность реальных циклов примерно в 3-5 раз ниже чем у обратных циклов.

3. Разработана методика комплексного анализа реальных термодинамических циклов АВВХМ и ТИС, позволяющая на основе схемного построения и термодинамического цикла создать математическую модель и выполнить ее анализ. Математическая модель рассматривается как многопараметрическая система, а ее анализ позволяет получать новые данные по внутренним связям системы, влиянию исходных параметров и сравнительной эффективности.

4. Разработана методика и выполнен анализ влияния характеристик агрегатного состава на величину необратимых потерь термодинамической эффективности реальных циклов.

5. Предложена схема, разработан обратимый цикл и проведен термодинамический анализ усовершенствованной АВВХМ. Выполнен сравнительный анализ обратимых и реальных циклов АВВХМ с двукратной регенерацией и УАВВХМ, который позволил:

- установить области рационального применения цикла УАВВХМ;
- выявить преимущества схемы УАВВХМ по сравнению с АВВХМ с двукратной регенерацией.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

1. Горбачев М.В. Оценка необратимых потерь термодинамической эффективности реальных циклов воздушно-холодильной машины / М.В. Горбачев, Ю.В. Дьяченко // Научный вестник НГТУ. 2009. №4(37). – С. 175-178.

2. Горбачев М.В. Термодинамический анализ реальных циклов системы кондиционирования воздуха с двукратной регенерацией / М.В. Горбачев, Ю.В. Дьяченко // Авиакосмическое приборостроение. – 2008. – №1. – С. 41-50.

3. Горбачев М.В. Разработка программы моделирования авиационной системы кондиционирования воздуха с двукратной регенерацией / М.В. Горбачев, Ю.В. Дьяченко // Авиакосмическое приборостроение. – 2008. – №4. – С. 41-51.

4. Горбачев М.В. Анализ влияния влажности атмосферного воздуха на работу воздушно-холодильной машины с двукратной регенерацией в составе авиационной СКВ / М.В. Горбачев, Ю.В. Дьяченко // Авиакосмическое приборостроение. – 2009. – №3. – С. 56-63.

5. Горбачев М.В. Численное моделирование СКВ самолета Ту-204 с отделением влаги на высоком давлении / М.В. Горбачев // Труды VII всеросс. научно-техн. конф. “Наука. Промышленность. Оборона”. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – С. 123-127.

6. Горбачев М.В. Термодинамический анализ реальных циклов ВХМ в составе СКВ / М.В. Горбачев // Труды VIII всеросс. научно-техн. конф. “Наука. Промышленность. Оборона”. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – С. 105-109.

7. Горбачев М.В. Анализ работы авиационной СКВ на влажном воздухе / М.В. Горбачев // Труды всеросс. научно-техн. конф. “Наука. Промышленность. Оборона”. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – С. 104-107.

8. Горбачев М.В. Термодинамический анализ перспективной воздушно-холодильной машины в составе авиационной СКВ / М.В. Горбачев // Труды X всеросс. научно-техн. конф. “Наука. Промышленность. Оборона”. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – С. 96-100.

9. Горбачев М.В. Численное моделирование системы кондиционирования воздуха самолета ТУ-204 с отделением влаги на высоком давлении / М.В. Горбачев // Материалы всеросс. научной конф. молодых ученых “Наука. Технологии. Инновации” в 7-ми частях. Часть 3. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – С. 55-57.

10. Горбачев М.В. Термодинамический анализ реальных циклов СКВ / М.В. Горбачев // Материалы всеросс. научной конф. молодых ученых “Наука. Технологии. Инновации” в 7-ми частях. Часть 3. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – С. 138-140.

11. Горбачев М.В. Термодинамический анализ реальных циклов теплоиспользующей системы в составе авиационной системы кондиционирования воздуха / М.В. Горбачев // Материалы всеросс. научной конф. молодых ученых “Наука. Технологии. Инновации” в 7-ми частях. Часть 3. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – С. 156-158.

12. Горбачев М.В. Термодинамический анализ реальных циклов СКВ / М.В. Горбачев // Тринадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Тезисы докладов.: В 3-х т. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – С. 13-14.

13. Горбачев М.В. Термодинамический анализ реальных циклов теплоиспользующей системы в составе систем кондиционирования воздуха / М.В. Горбачев // XV Туполевские чтения: Международная молодежная научная конфере-

ренция: Материалы конференции. Том 1. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2007. – С. 276-277.

14. Горбачев М.В. Термодинамический анализ реальных циклов систем кондиционирования воздуха / М.В. Горбачев, Ю.В.Дьяченко // Энергетика и тепло-техника: сб. научн. трудов / под ред. акад. РАН В.Е. Накорякова. –Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – Вып. 11. – С. 261-272.

Подписано в печать 13.11.09 г. Формат 60x84x1/16.

Бумага офсетная. Объем 1,5 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 1593

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, тел./факс (383) 346-08-57