

На правах рукописи

Арбеков Александр Николаевич

**ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ И ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ
ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА ДЛЯ
НАЗЕМНОГО И КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

Специальность 05.04.12

Турбомашины и комбинированные турбоустановки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва - 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет» (национальный исследовательский университет)

Официальные оппоненты

Ведущее предприятие:

Защита состоится « .. » 2019 г. в 14 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.141.09 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Рубцовская наб., д. 2/18, Учебно-лабораторный корпус, ауд. 947.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета

Д 212.141.09.

Автореферат разослан « .. » 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Кандидат технических наук

_____ Р.З. Тумашев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В условиях постоянно возрастающей конкуренции в борьбе за ресурсы и нарастания экологических проблем резко проявляется противостояние производителей различных видов преобразователей тепловой энергии в механическую, а затем и в электрическую как наиболее универсальную. В этом противостоянии уже давно были выделены два основных направления: тепловые машины (двигатели) и безмашинные преобразователи энергии. Кажущаяся простота последних, однако, компенсируется низкой единичной мощностью и (или) низкой эффективностью. Среди машинных преобразователей также можно выделить две ветви: двигатели внутреннего сгорания (поршневые, роторные, газотурбинные) и двигатели с внешним подводом теплоты (паровые машины и турбины, двигатели Стирлинга, замкнутые газотурбинные установки). На начальном этапе развития тепловых двигателей (последняя четверть XVIII – первая четверть XIX века) первенство принадлежало поршневым паровым и газовым двигателям с внешним подводом теплоты, имеющим относительно простое устройство, но спустя примерно 100 лет они начали вытесняться двигателями внутреннего сгорания из-за более высокой эффективности последних, а также благодаря развитию науки и технологий. В «крупной» энергетике главное место заняли паротурбинные установки с их большими единичными (агрегатными) мощностями. И лишь колоссальный рывок в материаловедении в середине XX в. создал условия для формирования научно-технических, технологических и организационных основ широкого распространения авиационных, наземных и морских газотурбинных установок открытого цикла. Их развитие во многом способствовало, в частности, началу «газовой революции» в Советском Союзе в 1950-е годы, радикально изменившей топливно-энергетический баланс страны.

Поршневые двигатели внутреннего сгорания не имеют конкурентов во многих отраслях промышленности, транспорта и энергетики, благодаря, их высокой топливной экономичности. Однако в ряде областей техники (например, для освоения космоса) их применение затруднено, если отсутствует естественный окислитель – воздух. Использование других источников высокопотенциальной теплоты (солнечное излучение, продукты сгорания органического топлива, ядерная энергия) возможно только в двигателях с внешним подводом теплоты – как поршневых (двигателях Стирлинга), так и газотурбинных. Основным достоинством двигателей с внешним подводом теплоты является возможность выбора рабочего тела, причем для двигателей Стирлинга наиболее приемлемы легкие рабочие тела (водород, гелий), а для газотурбинных больше подходят тяжелые рабочие тела (аргон, диоксид углерода, криптон и ксенон).

Одним из видов двигателей с внешним подводом теплоты, конкурентоспособным с двигателем Стирлинга в широком диапазоне мощностей – от сотен ватт до сотен мегаватт, является замкнутая газотурбинная установка, которая способна одновременно обеспечить

потребителя электроэнергией, теплом и холодом (в том числе криогенного уровня). Такими потребителями могут быть космические аппараты, планетарные базы, наземные, подземные, надводные и подводные автономные объекты. В данной работе рассмотрены замкнутые газотурбинные установки мощностью от единиц киловатт для космических аппаратов и наземных систем радиорелейной связи до десятков мегаватт для межпланетных пилотируемых космических кораблей, морских судов, космических и наземных электростанций. К их достоинствам относятся следующие:

- возможность использования различных источников теплоты (солнечное излучение; теплота, выделяющаяся при сгорании органического топлива или в ядерных реакциях; «бросовая теплота» различных производств);
- достаточно высокая эффективность преобразования энергии (коэффициент полезного действия от 0,20 для мощности менее 100 кВт до 0,50 при мощностях в десятки мегаватт);
- высокая тепловая эффективность в широком диапазоне изменения мощности;
- возможность создания единого холдоэнергетического комплекса, обеспечивающего потребителя всеми видами энергии;
- отсутствие масляной системы смазки (применение газодинамических или электромагнитных подшипников);
- отсутствие низкочастотной вибрации, свойственной поршневым двигателям Стирлинга.

Первые замкнутые газотурбинные установки для электростанций были созданы швейцарской фирмой Escher-Wyss еще перед второй мировой войной, а с появлением ядерной энергетики, в 1950-х гг., стали рассматриваться как один из перспективных преобразователей тепловой энергии в электрическую, особенно для реакторов, охлаждаемых диоксидом углерода (Великобритания), а впоследствии и гелием. В начале XXI в. консорциум отечественных предприятий (Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова, Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африканова и Самарский научно-технический комплекс им. Н.Д. Кузнецова) по заказу фирмы General Atomics (США) спроектировал моноблочный газотурбинный реактор электрической мощностью 300 МВт и отработал его основные узлы.

В начале 1960-х гг. в США начались широкомасштабные работы по созданию космических замкнутых газотурбинных установок, лидером которых стало отделение Garrett AiResearch фирмы Allied Signal, ныне входящей в состав корпорации Honeywell. Результатом работ стал выбор в качестве рабочего тела гелий-ксеноновых смесей с низкими числами Прандтля. К настоящему времени NASA и Allied Signal успешно испытали солнечную солнечную замкнутую газотурбинную установку мощностью 2 кВт. Разработан ряд проектов замкнутых газотурбинных установок для электроснабжения пилотируемых и беспилотных КА, в том числе для исследования дальнего космоса, солнечные электростанции гигаваттного класса и микроустановки мощностью 50...100 Вт (Creare, Inc.). Выведена в

космос и успешно работает криогенная система космического телескопа «Hubble». Получены характеристики макетной двухпетлевой двухмодульной замкнутой газотурбинной установки, созданной на базе газотурбинной установки открытого цикла С30 фирмы Capstone, при работе на различных рабочих телах, позволившие создать и оттестировать ряд программ для математического моделирования замкнутых газотурбинных установок.

С конца 1960-х гг. в ряде организаций Советского союза (научно-исследовательском институте тепловых процессов, ракетно-космической корпорации «Энергия», научно-производственном объединении «Энергомаш», научно-производственном объединении «Наука» и др.), в том числе и в МВТУ им. Н.Э. Баумана под научным руководством проф. В.В. Уварова в секторе, возглавляемом В.Л. Самсоновым, проводились фундаментальные и прикладные исследования замкнутых газотурбинных установок, которые позволили получить экспериментальные и теоретические характеристики основных узлов замкнутых газотурбинных установок, а также разработать комплектные установки, в числе которых:

- теплодинамические имитаторы замкнутых газотурбинных установок мощностью 15 кВт и 3 кВт; прототип первой солнечной космической замкнутой газотурбинной установки мощностью 3 кВт и макетный образец замкнутой газотурбинной установки мощностью 1...3 кВт, работающий на органическом топливе;
- технические проекты опытно-промышленного образца и перспективной замкнутых газотурбинных установок мощностью 1...3 кВт, работающих на природном газе;
- Эскизные проекты солнечной космической замкнутой газотурбинной криоэнергетической установки электрической мощностью 2,3 кВт и холодопроизводительностью 3,4 Вт при 80 К; замкнутой газотурбинной энергодвигательной установки электрической мощностью 50 кВт для энергонасыщенного геостационарного телекоммуникационного спутника; солнечной замкнутой газотурбинной энергодвигательной установки электрической мощностью 3×5 МВт для пионерируемого межпланетного космического корабля; замкнутой газотурбинной установки электрической мощностью 160 кВт для марсианской базы; замкнутой газотурбинной холодоэнергетической установки электрической мощностью 3×16 кВт для лунной базы; тригенерационной замкнутой газотурбинной установки, работающей на органическом топливе; исследованы возможности создания унифицированного транспортно-энергетического модуля мощностью 1 МВт.

В результате этих работ был создан экспериментальный и теоретический задел для разработки замкнутых газотурбинных установок различного назначения, обеспечивающих потребителя электроэнергией, теплом и холдом в различных сочетаниях, рассмотрены схемы с параллельным, последовательным и комбинированным движением рабочего тела в едином газовом контуре.

Подходы, разработанные в указанных работах, нашли применение при

исследовании возможности конверсии двигателя Д30 пассажирского самолета Ту-134 в двухконтурную тригенерационную газотурбинную установку открытого и полузамкнутого цикла.

Самыми объемными и тяжелыми узлами, определяющими массогабаритные характеристики замкнутой газотурбинной установки, являются теплообменные аппараты (газонагреватель, газоохладитель, регенератор). Кроме того, потери давления в этих и других узлах замкнутой газотурбинной установки, как правило, почти втрое превосходят соответствующие потери в газотурбинной установки открытого цикла. Стремление к уменьшению массы и размеров замкнутых газотурбинных установок при одновременном обеспечении приемлемых гидравлических потерь в тракте привело к заключению о целесообразности использования в качестве рабочих тел смесей наиболее легких газов с тяжелыми газами (например, гелия с ксеноном).

Поскольку реальные процессы в замкнутых газотурбинных установках, являются необратимыми, то возникает необходимость применения методов термодинамики, которые можно свести к двум подходам, наиболее часто применяемым на практике: эксергетическому анализу (метод потоков эксергии) и энтропийно-статистическому анализу (метод потерь эксергии). Последнему, как наиболее простому и наглядному, отдано предпочтение.

Цель работы: создание газотурбинных установок замкнутого цикла для наземного и космического применения, обладающих высокими показателями экономичности, надежности, технологичности, безопасности в эксплуатации путем выбора тепловой схемы установки и оптимизации параметров ее основных узлов.

Объект исследования: замкнутая газотурбинная установка, предназначенная для энергоснабжения космических и наземных объектов, а при необходимости и холдом, с единым газовым контуром энергетической и холодильной (криогенной) частей, а также системой утилизации теплоты.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ и обобщение результатов исследований, опубликованных в литературных источниках.

2. Определить диапазон параметров термодинамического цикла в зависимости от назначения установки, видов вырабатываемой энергии и типа источника теплоты.

3. Разработать обобщенный метод выбора оптимальных параметров и эффективной тепловой схемы газотурбинной установки замкнутого цикла наземного и космического применения, обеспечивающей потребителя энергией требуемых видов (электричеством, теплом и холдом) в необходимых сочетаниях.

4. Разработать методику выбора рабочего тела, обеспечивающего высокую эффективность турбомашин и теплообменных аппаратов с учетом термопрочностных характеристик применяемых конструкционных материалов.

5. Провести экспериментальные исследования узлов замкнутой газотурбинной установки при работе на различных рабочих телах и получить

экспериментальные данные необходимые для корректировки и верификации предложенных методик.

6. Разработать методику оценки эффективности установки на переменных режимах с регулированием составом и параметрами рабочего тела.

7. Выработать рекомендации по применению разработанного метода для анализа замкнутых газотурбинных установок различных типов.

Методы исследований. Поставленная в диссертации цель достигается комбинацией теоретических и экспериментальных методов исследования. В качестве теоретического метода исследования принята комбинация термогазодинамического анализа эффективности циклов замкнутых газотурбинных установок, математического моделирования турбомашин и теплообменных аппаратов, анализа процессов отвода теплоты от газоохладителя в окружающее пространство с учетом полученных экспериментальных результатов. Полученные результаты теоретических исследований сопоставлялись с опубликованными данными других авторов.

Научная новизна работы заключается в следующем: обобщены результаты экспериментальных и теоретических исследований замкнутых газотурбинных установок и их узлов; сформулированы условия выбора рабочего тела для конкретных параметров цикла, условий применения, выходных характеристик замкнутой газотурбинной установки и термопрочностных характеристик материалов деталей ротора; разработан обобщенный метод выбора тепловой схемы и параметров замкнутых газотурбинных установок, предназначенных для космических и наземных применений и способных обеспечить потребителя электроэнергией, холодом и теплом.

Достоверность и обоснованность научных положений определяются применением термодинамического анализа к исследованию циклов замкнутых газотурбинных установок, использованием экспериментальных результатов для верификации расчетных методик. Экспериментальные исследования замкнутых газотурбинных установок и их узлов выполнены с использованием диагностического оборудования, обеспечивающего необходимую точность получения и фиксации данных в режиме реального времени.

Практическая ценность состоит в том, что: получены обобщенные зависимости параметров основных узлов, позволяющие с достаточной для практики точностью принимать их значения при проектировании и обоснованно выбирать рабочее тело для замкнутых газотурбинных установок различного назначения с учетом диапазонов определяющих параметров и условий окружающей среды; в создании единого подхода к проектированию замкнутых газотурбинных установок наземного и космического применения.

На защиту выносятся:

1. Рекомендации по выбору диапазонов исходных параметров термодинамического цикла в зависимости от назначения установки, видов вырабатываемой энергии и типа источника высокопотенциальной теплоты.

2. Обобщенный метод выбора оптимальных параметров и эффективной тепловой схемы газотурбинной установки замкнутого цикла

наземного и космического применения.

3. Расчетные и экспериментальные характеристики основных узлов установки.

4. Методика оценки параметров установки при работе на переменных режимах.

5. Рекомендации по использованию обобщенного метода анализа замкнутых газотурбинных установок различных типов при практических применениях.

Личный вклад автора. Разработан обобщенный метод анализа циклов и схем, включающий методики обоснованного выбора рабочего тела, оценки эффективности замкнутых газотурбинных установок, оценки параметров установки при работе на переменных режимах; определены диапазоны исходных для проектирования параметров термодинамического цикла в зависимости от назначения установки, видов вырабатываемой энергии и типа источника высокопотенциальной теплоты; разработаны новые и усовершенствованы существующие методики экспериментальных исследований турбомашин и процессов теплообмена; даны рекомендации по использованию обобщенного метода анализа циклов и схем замкнутых газотурбинных установок; обобщены экспериментальные данные, полученные ранее, и под непосредственным руководством автора выполнены экспериментальные исследования центробежного компрессора и процессов теплообмена в элементах конструкции.

Реализация результатов. Результаты исследований использованы при разработке проектов космических и наземных замкнутых газотурбинных установок различного назначения в МГТУ им. Н.Э. Баумана, послужили обоснованием для принятия ряда решений при разработке унифицированного транспортного модуля мощностью 1 МВт, выполняемой в ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» и АО «НИКИЭТ им. Н.А. Доллежаля», а также при исследовании возможности создания конверсионных двухконтурных тригенерационных газотурбинных установок на базе авиационных двухконтурных турбореактивных двигателей.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации были представлены и обсуждались:

на заседаниях кафедры газотурбинных и нетрадиционных энергоустановок МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2016, 2017 гг.);

на Международной космической конференции «Космос без оружия – арена мирного сотрудничества в XXI веке», МАИ (ТУ) (Москва, 2001 г.);

на XII-й и XIII-й Всероссийских межвузовских научно-технических конференциях «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели», МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2004, 2008 гг.);

на 3-й, 4-й и 5-й Российских национальных конференциях по теплообмену, МЭИ (ТУ) (Москва, 2002, 2006, 2010 гг.);

на II-й и III-й Международных научно-технических конференциях «Авиадвигатели XXI века», ЦИАМ (Москва, 2005, 2010 гг.)

на 10-й, 11-й и 12-й Международных конференциях «Авиация и

космонавтика», МАИ (ТУ) (Москва, 2011, 2012, 2013 гг.);
на Международном научно-техническом форуме, посвященном 100-летию Н.Д. Кузнецова и 70-летию СГАУ (Самара, 2012 г.);
на Международной конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», СГАУ (Самара, 2014 г.);
на LXI научно-технической сессии по проблемам газовых турбин и парогазовых установок, посвященной 75-летию ОАО «Авиадвигатель» и 65-летию Комиссии по газовым турбинам РАН (Пермь, 2014 г.);
на Международной конференции «Атомные станции малой мощности – актуальное направление развития атомной энергетики» (Москва, 2013 г.);
на Международной конференции «International Conference on the Methods of Aerophysical Research, ICMAR 2016» (Пермь, 2016 г.);
на XV Международной конференции «Renewable and small power engineering-2018» (Москва, 2018 г.);
на заседаниях Всероссийского научно-технического семинара им. проф. В.В. Уварова по газотурбостроению при кафедре газотурбинных и нетрадиционных энергоустановок МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2003, 2005 гг.).

Публикации. По теме диссертации изданы 20 научных статей, 11 из них опубликованы в журналах, включенных в перечень ВАК РФ рецензируемых ведущих научных журналов и изданий, в том числе 5 в журналах, входящих в Web of Science и Scopus. Кроме того, по теме диссертации опубликовано 20 тезисов и материалов конференций. Получен 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов по диссертационной работе, списка использованной литературы. Общий объем работы 333 страницы, включая 283 страницы основного текста, содержащего 142 рисунка, 45 таблиц. Список литературы включает 333 наименования на 37 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проведения работ, направленных на создание обобщенного метода проектирования замкнутых газотурбинных установок космического и наземного применения, дана общая характеристика диссертационной работы.

В первой главе диссертации выполнен анализ и обобщение отечественных и зарубежных работ, посвященных исследованию и созданию замкнутых газотурбинных установок для наземных и космических применений, их узлов; методам термогазодинамического анализа циклов. Сформулированы цель и задачи работы.

Выявлены основные потребители энергии, для которых замкнутые газотурбинные установки могут быть использованы в качестве источника электричества, тепла и холода: космические аппараты, планетарные базы, космические межпланетные корабли, системы радиорелейной связи и катодной защиты трубопроводов и др.

Ряд задач, которые приходится решать при разработке замкнутых газотурбинных установок, аналогичны задачам создания перспективных

силовых установок авиационного и транспортного назначения: электрических генераторов с роторами на постоянных магнитах, встроенных в газотурбинный двигатель, компактных теплообменных аппаратов и безмасляных опор ротора.

Коэффициент полезного действия (далее КПД) цикла $\eta_{\text{ц}}$ теплового двигателя ограничен в соответствии с теоремой С. Карно отношением

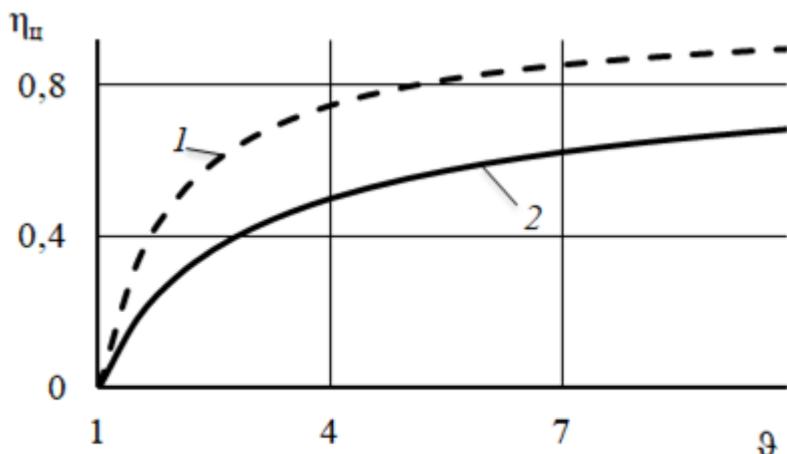


Рис. 1 Коэффициент полезного действия цикла С. Карно без учета (1) и учетом (2) необратимого подвода теплоты

двигателей с внешним подводом теплоты.

Максимальная температура цикла T_3^* ограничена прочностными свойствами материалов, используемых в самой замкнутой газотурбинной установке и в системе источника теплоты.

Минимальная температура цикла T_9^* определяется условиями кондиционирования объекта, работы аппаратуры или хранения топлива.

Выбор давления в контуре замкнутой газотурбинной установки ограничен:

- снизу – необходимостью превышения минимального давления в наземных и напланетных установках над атмосферным, для предотвращения притока в контур активных веществ извне, а также обеспечения работоспособности конструкции и эффективности процессов теплопередачи;
- сверху – прочностными свойствами конструкционных материалов и удельной массой установки.

Выбор рабочего тела обусловлен:

- необходимостью сохранения его в газовой фазе во всем температурном диапазоне;
- выбором высокоэффективной геометрии проточных частей установки;
- требованием обеспечения заданного ресурса установки.

Расчет тепловой эффективности цикла замкнутой газотурбинной установки может быть выполнен в результате термогазодинамического анализа при одном из следующих подходов:

- путем определения термодинамического КПД;
- эксергетическим анализом (Г. Гюи и А. Стодола);
- энтропийно-статистическим методом (Р. Клаузиус).

Для энергетической (или холодильной) установки, вырабатывающей

температуру в цикле $\vartheta = T_3^*/T_0^*$ (кривая 1 на Рис. 1), а учет необратимого подвода теплоты в цикл от внешнего источника, как показал И.И. Новиков, существенно его снижает $\eta_{\text{ц}} = 1 - 1/\sqrt{\vartheta}$ (кривая 2). По сути, эти кривые показывают пределы совершенствования циклов двигателей внутреннего сгорания и

только электроэнергию (холод), достаточно классический подход – определение термодинамического коэффициента полезного действия.

В тех случаях когда установка производит электроэнергию, тепло и холод в различных сочетаниях, ситуация усложняется: известные методы расчета коэффициента использования топлива В.И. Гриневецкого и Министерства электростанций СССР при этом не применимы, поэтому необходимо использовать эксергетический или энтропийно-статистический анализ.

Второй из них, являющийся более наглядным и простым в применении на практике, восходит к использованию введенному Р. Клаузиусом понятию максимальной работы

$$L_{max} = Q_{2-3} - T_c \int_0^{Q_{2-3}} \frac{dT}{Q}, \quad (1)$$

где Q_{2-3} – подведенная теплота, T_c – температура окружающей среды (стока).

Действительная работа цикла

$$L = Q_{2-3} - T_s \int_0^{Q_{2-3}} \frac{dT}{Q} - T_c \oint \frac{dT}{Q} \quad (2)$$

отличается от максимальной на величину произведения температуры стока T_c и некомпенсированного превращения теплоты

$$\oint \frac{dT}{Q} = \sum \Delta S, \quad (3)$$

равную суммарному приращению энтропии $\sum \Delta S$. Другое название метода Р. Клаузиуса – метод вычитания, причем, как показал Д.П. Гохштейн, если под ним понимать алгебраическое вычитание, то он применим и для прямых, и для обратных циклов.

Во второй главе

Назначение замкнутых газотурбинных установок во многом определяет диапазон реализуемых параметров термодинамического цикла, зависящий существенным образом от типа источника высокопотенциальной теплоты, в качестве которого может быть использованы: солнечное излучение; теплота, выделяющаяся при сгорании органического топлива, в ядерном реакторе или в радиоизотопном источнике; «бросовая» теплота высокотемпературного производства (Рис. 2).

Значительную роль в возможности реализации замкнутых газотурбинных установок играют условия отвода теплоты из цикла, связанные с температурой при входе в компрессор T_0^* , которую назовем опорной, и температурой стока T_c^* , зависящей от окружающей среды – атмосферы, гидросферы или литосферы планет; космического пространства; сжиженного газообразного топлива.

Рассмотрены возможные диапазоны параметров термодинамического цикла замкнутых газотурбинных установок для наземных и космических применений в зависимости от конкретного назначения установки и внешних условий ее работы, определены подходы к оптимизации термодинамического цикла замкнутой газотурбинной установки, представленного на Рис. 3.

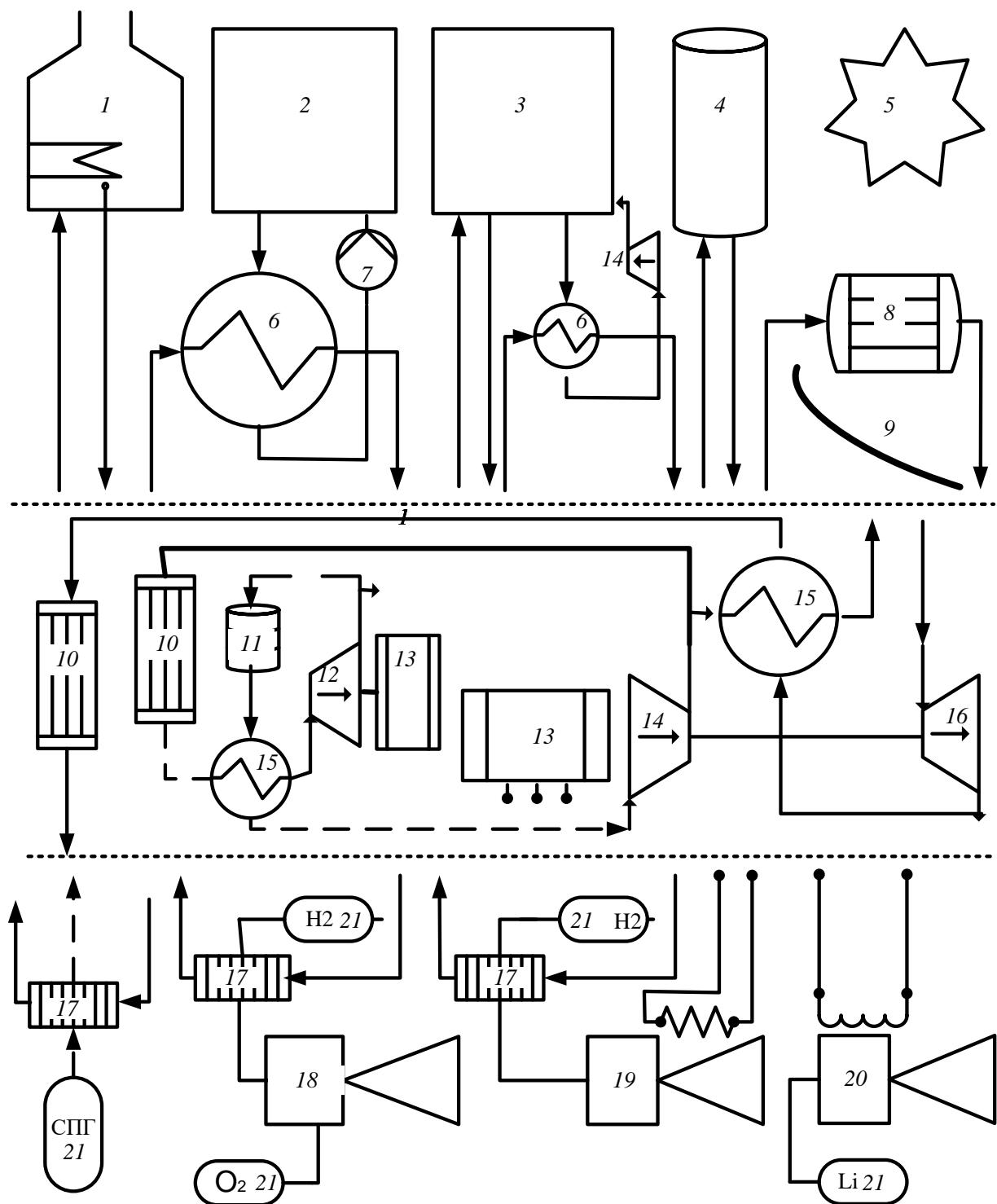


Рис. 2. Источники и стоки теплоты замкнутой газотурбинной установки: 1 – газонагреватель с топкой на органическом топливе, 2 – ядерный реактор с жидкотяжелым охлаждением, 3 – газоохлаждаемый реактор, 4 – радиоизотопный источник тепла, 5 – солнце, 6 – промежуточный теплообменник, 7 – насос, 8 – приемник-тепловой аккумулятор, 9 – концентратор, 10 – газоохладитель, 11 – кондиционируемый объект, 12 – турбодетандер, 13 – генератор, 14 – компрессор, 15 – регенератор, 16 – турбина, 17 – подогреватель топлива, 18 – жидкостной ракетный двигатель, 19 – тепловой ракетный двигатель, 20 – магнитоплазменный двигатель, 21 – бак

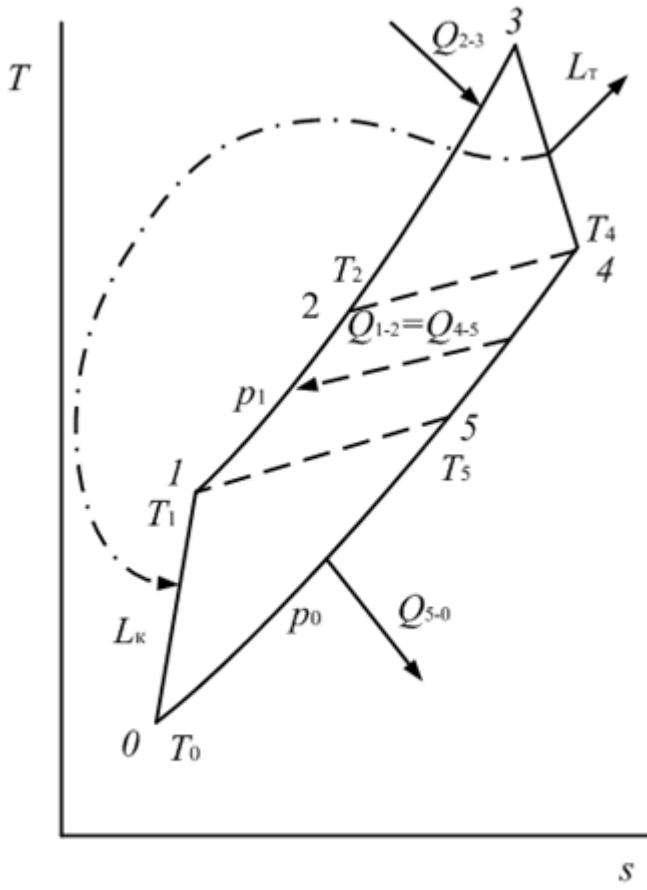


Рис. 3. s - T – диаграмма регенеративного газотурбинного цикла

являются:

– КПД цикла, представляющий собой отношение работы цикла $L_{\text{ц}}$ к количеству подведенной теплоты Q_{2-3}

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{L_{\text{ц}}}{Q_{2-3}}; \quad (4)$$

– степень повышения давления в компрессоре, представляющая собой отношение максимального давления в цикле p_1^* (за компрессором) к начальному давлению p_0^* (перед компрессором):

$$\pi_{\text{k}}^* = \frac{p_1^*}{p_0^*}; \quad (5)$$

– относительная работа цикла $\bar{L}_{\text{ц}}$, т.е. работа цикла $L_{\text{ц}}$, отнесенная к опорной энталпии цикла (которая, в свою очередь, равна произведению теплоемкости рабочего тела c_p на значение нижней температуры цикла T_0^*) и представляющая собой разность относительных работ турбины и компрессора:

$$\bar{L}_{\text{ц}} = \frac{L_{\text{ц}}}{c_p T_0^*} = \vartheta(1 - \bar{g}) \left[1 - (\pi_{\text{k}}^* \sigma^*)^{\frac{1-k}{k}} \right] \eta_{\text{t}}^* - \frac{\pi_{\text{k}}^{*\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_{\text{k}}^*}, \quad (6)$$

где \bar{g} – относительные утечки рабочего тела; σ^* – коэффициент сохранения полного давления в цикле; η_{t}^* – коэффициент полезного действия турбины; η_{k}^* – коэффициент полезного действия компрессора; k – показатель адиабаты.

Влияние отношения температур на коэффициент полезного действия

Определяющим параметром термодинамического цикла газотурбинной установки как замкнутого, так и открытого цикла, является отношение температур, полный диапазон возможного изменения которого ($\vartheta = 2 \dots 10$) покрывает, как область работы установки на номинальном режиме ($\vartheta = 2 \dots 6$) при $T_3^* = 1000 \dots 2000$ К и $T_0^* = 600 \dots 300$ К, так и диапазон форсированных режимов ($\vartheta = 4 \dots 11$), в котором при тех же «верхних» значениях температуры «нижние» имеют уровень $T_0^* = 250 \dots 180$ К за счет использования хладоресурса топлива – сжиженного природного газа или криогенного рабочего тела двигательной установки космического аппарата.

Основными зависимыми (определяемыми) безразмерными параметрами при расчете цикла

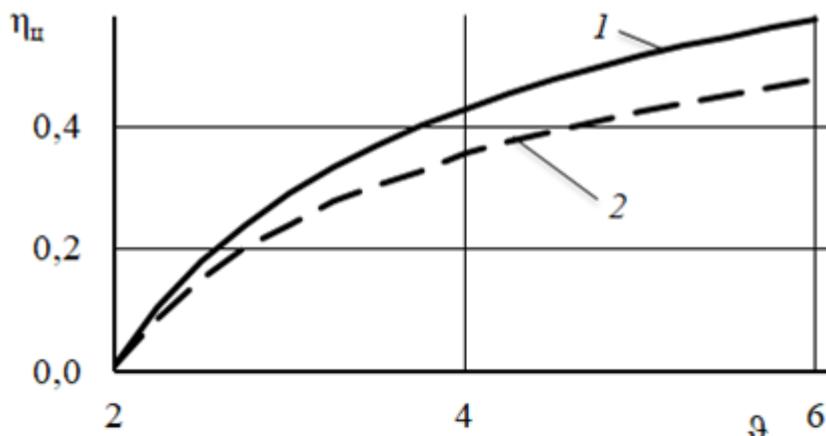


Рис. 4. Влияние отношения температур в цикле на максимальный КПД цикла (1) и КПД цикла при максимальной работе (2)

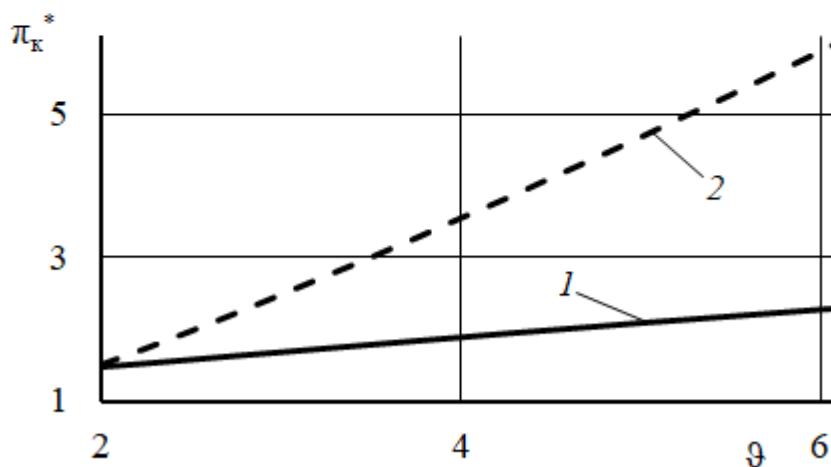


Рис. 5. Влияние отношения температур в цикле на степень повышения давления при максимальных КПД (1) и работе (2)

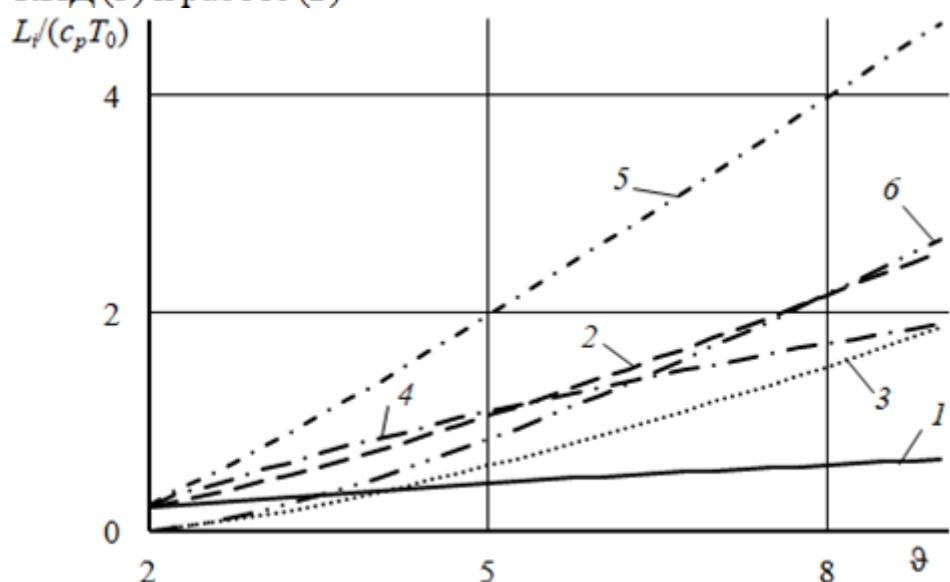


Рис. 6. Влияние отношения температур при максимальных КПД (1, 2, 3) и работе (4, 5, 6) цикла на: относительную работу 1, 4 – компрессора и 2, 5 – турбины; 3, 6 – цикла

цикла и степень повышения давления при максимальных значениях КПД цикла и относительной работе цикла представлено на Рис. 4 и 5.

Размеры турбомашин и выбор рабочего тела определяются относительными работами турбомашин, представленными на Рис. 6.

Наиболее громоздкими и массивными узлами замкнутой газотурбинной установки являются газонагреватель, газоохладитель и регенератор, габариты которых определяются их тепловыми мощностями, приведенными на Рис. 7.

Минимизация массогабаритных характеристик газоохладителя замкнутой газотурбинной установки космического аппарата с развитой излучающей поверхностью при отношении температур $\theta \approx 3 \dots 3,5$ ограничена максимально достижимыми уровнями КПД и работы.

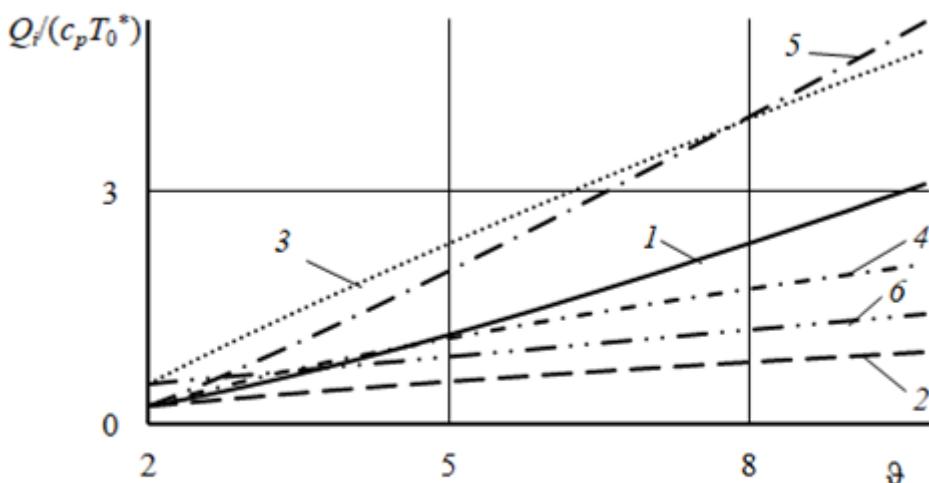


Рис. 7. Влияние отношения температур при максимальных КПД (1, 2, 3) и работе (4, 5, 6) цикла на теплоту: 1, 4 – подведенную; 2, 5 – отведенную; 3, 6 – возвращенную

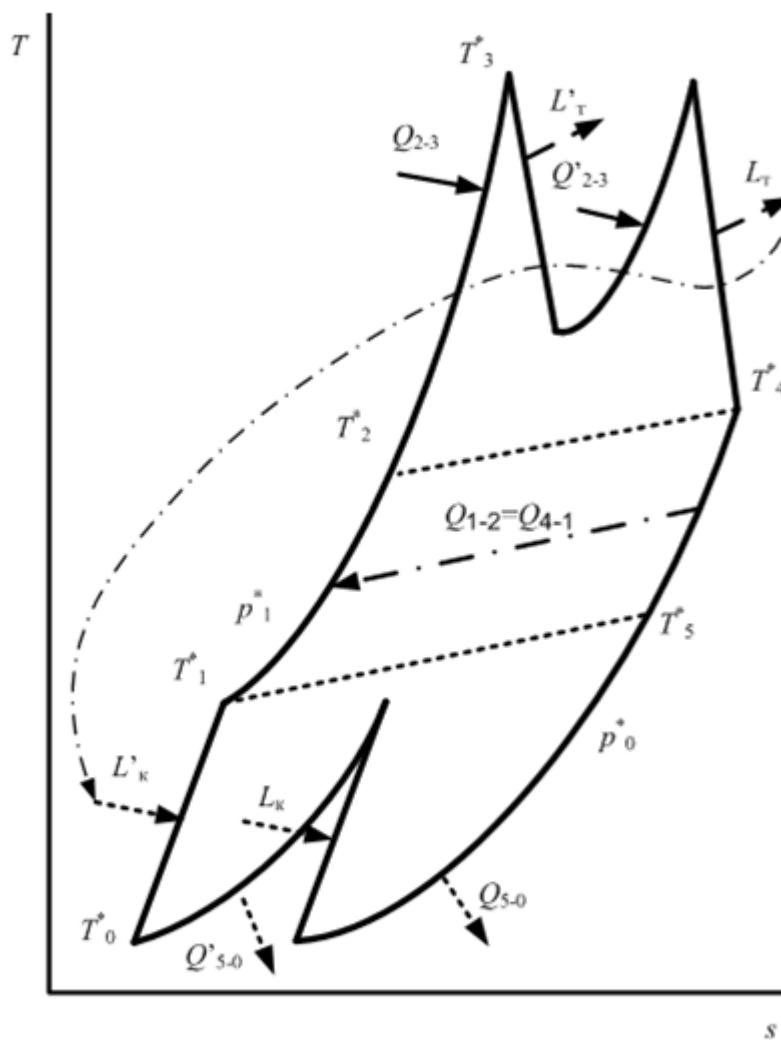


Рис. 8. $s-T$ – диаграмма «карнотизированного» цикла

(см. Рис. 11 и 12).

Как видно из представленных данных, введение регенерации позволяет существенно сократить площадь концевого газоохладителя (1).

В 1930-е гг. В.В. Уваровым для повышения эффективности газотурбинной установки была предложена «карнотизация» термодинамического цикла введением промежуточных охлаждения (Х) и подогрева рабочего тела (Γ), а Г.И. Зотиковым – регенерации теплоты (Р) (Рис. 8).

Сравнение простого цикла Брайтона – Джоуля (1Х1Г), регенеративного цикла (1Х1Р1Г), цикла с промежуточным охлаждением (2Х1Г), промежуточным подогревом (1Х2Г), промежуточным охлаждением и регенерацией (2Х1Р1Г), и с регенерацией, промежуточными охлаждением и подогревом (2Х1Р2Г) показано на Рис. 9 и 10.

Полученные зависимости коэффициента полезного действия и относительной работы для рассмотренных циклов позволили оценить требуемые площади газоохладителей, приходящиеся на единицу полезной мощности замкнутой газотурбинной установки

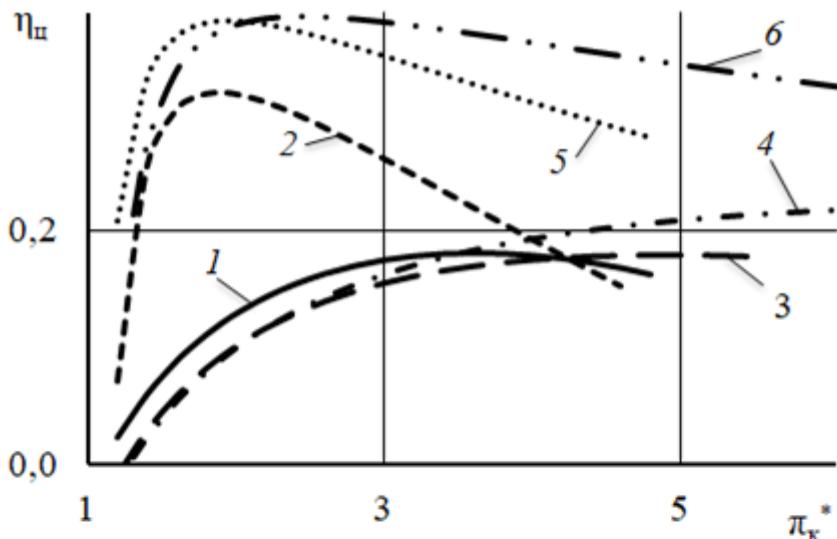


Рис. 9. Влияние степени повышения давления на КПД циклов: 1Х1Г (1); 1Х1Р1Г (2); 2Х1Г (3); 1Х2Г (4); 2Х1Р1Г (5); 2Х1Р2Г (6)

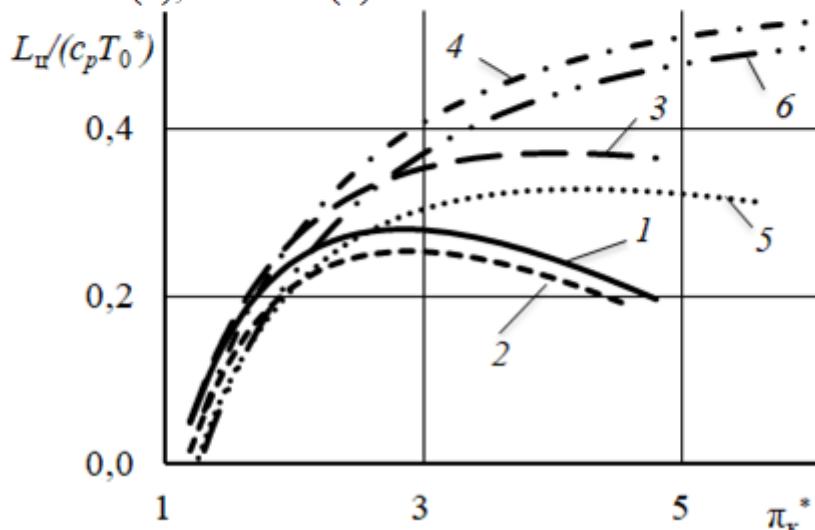


Рис. 10. Влияние степени повышения давления на относительную работу циклов: 1Х1Г (1); 1Х1Р1Г (2); 2Х1Г (3); 1Х2Г (4); 2Х1Р1Г (5); 2Х1Р2Г (6)

Показано, что в качестве рабочих тел двигателей тепла наиболее приемлемы инертные газы, азот, диоксид углерода и углеводороды, параметры насыщения которых представлены на Рис. 12. Среди них высокой температурой кипения выделяется пентан (8) и близкий к нему толуол, которые используются в низкотемпературных паротурбинных установках фирмы Ormat Technology (Израиль) с коэффициентом полезного действия не превышающим 0,06. Стремление к повышению эффективности энергетических установок привело к возобновлению исследований углекислотных сверхкритических циклов, позволяющих резко уменьшить габариты турбомашин, однако и здесь определяющими являются массогабаритные характеристики теплообменных аппаратов, работающих при давлении от 7,5 до 20 МПа.

Основным критерием, характеризующим теплофизические свойства

Во всех остальных случаях уменьшение излучающей площади концевого газоохладителя компенсируется наличием излучающей площади промежуточного (межкомпрессорного) газоохладителя (2), что в итоге приводит к неприемлемому увеличению их суммарной поверхности.

Широкий диапазон агрегатных мощностей и температур при выборе рабочего тела замкнутых газотурбинных установок для наземного и (особенно) космического применения приводит к жестким ограничениям, которые связаны с необходимостью обеспечения рациональной геометрии проточной части турбомашин и высокой эффективности теплообменных аппаратов.

с внешним подводом углерода и углеводороды, параметры насыщения которых представлены на Рис. 12. Среди них высокой температурой кипения выделяется пентан (8) и близкий к нему толуол, которые используются в низкотемпературных паротурбинных установках фирмы Ormat Technology (Израиль) с коэффициентом полезного действия не превышающим 0,06. Стремление к повышению эффективности энергетических установок привело к возобновлению исследований углекислотных сверхкритических циклов, позволяющих резко уменьшить габариты турбомашин, однако и здесь определяющими являются массогабаритные характеристики теплообменных аппаратов, работающих при давлении от 7,5 до 20 МПа.

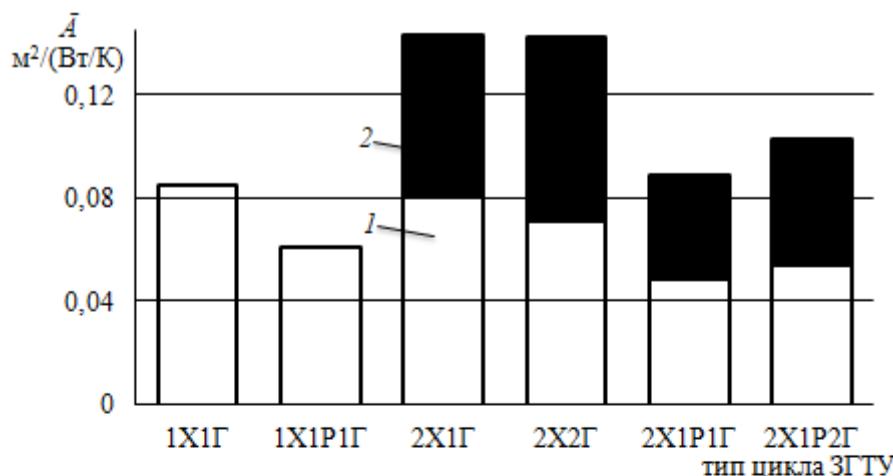


Рис. 11. Влияние типа цикла на удельную площадь концевого (1) и промежуточного (2) газоохладителя при максимальном КПД

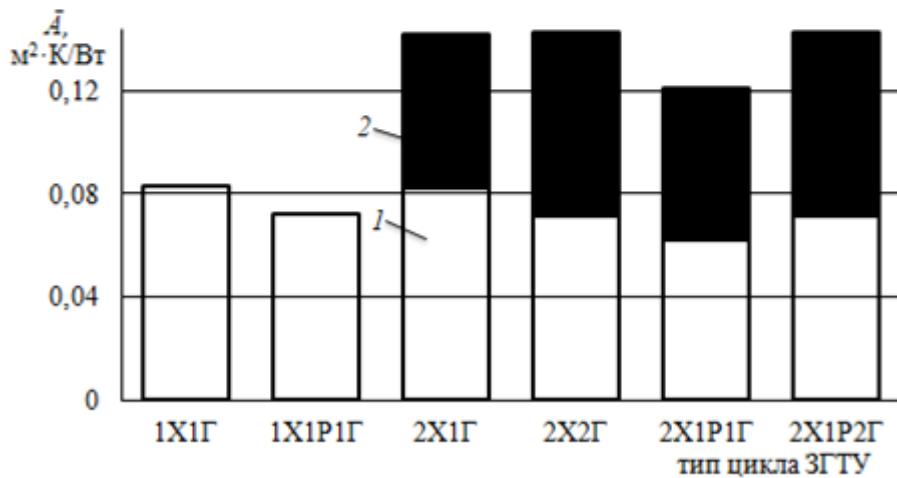


Рис. 12. Влияние типа цикла на удельную площадь концевого (1) и промежуточного (2) газоохладителя при максимальной работе

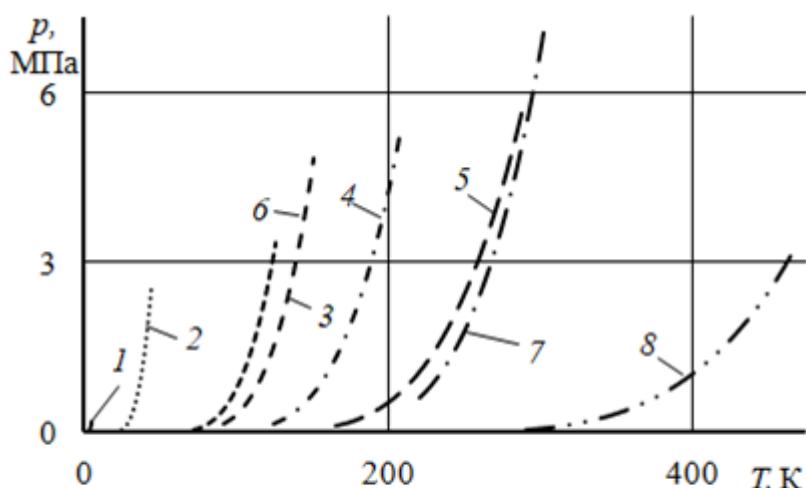


Рис. 13. Линии насыщения рабочих тел: 1 – гелий, 2 – неон, 3 – аргон, 4 – криптон, 5 – ксенон, 6 – азот, 7 – диоксид углерода, 8 – пентан

установок для наземных и космических

рабочих тел, является число Прандтля $Pr = c_p \mu / \lambda$ (см. Рис. 13, 14).

Противоречивые требования, предъявляемые к рабочему телу замкнутой газотурбинной установки малой мощности, привели к необходимости использования гелий-ксеноновых смесей, теплофизические свойства которых представлены на Рис. 15, 16.

В диапазоне молярных масс от 20 до 80 кг/кмоль для гелий-ксеноновых смесей характерны низкие значения чисел Прандтля $Pr = 0,2 \dots 0,3$, что приводит к существенному увеличению коэффициентов теплоотдачи при числах $Re \leq 1\,200$ и обеспечивает снижение

массогабаритных характеристик теплообменных аппаратов примерно на треть по сравнению с теплообменниками на чистых газах – аналогах.

В третьей главе приведены методики экспериментальных исследований основных узлов замкнутых газотурбинных применений, описаны

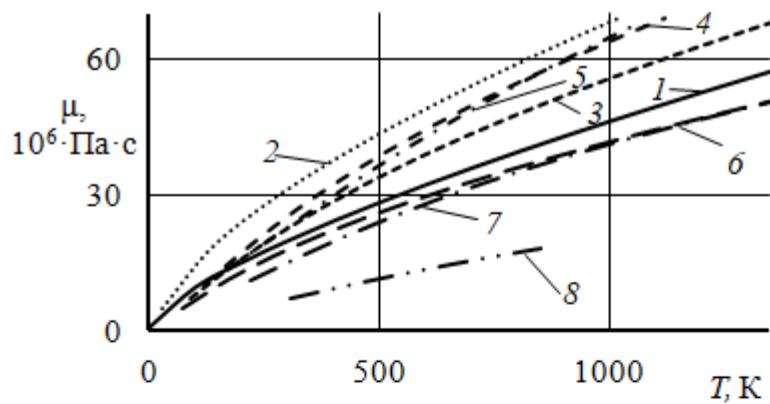


Рис. 14. Зависимости от температуры вязкости газов: 1 – гелий, 2 – неон, 3 – аргон, 4 – криптон, 5 – ксенон, 6 – азот, 7 – диоксид углерода, 8 – пентан

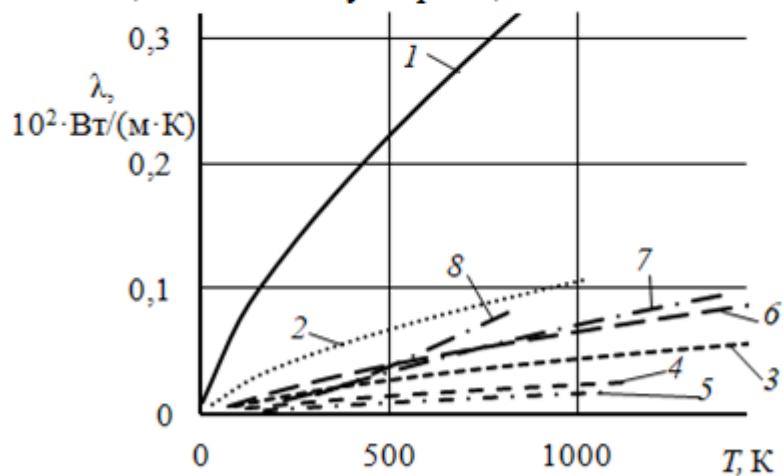


Рис. 15. Зависимости от температуры теплопроводности газов: 1 – гелий, 2 – неон, 3 – аргон, 4 – криптон, 5 – ксенон, 6 – азот, 7 – диоксид углерода, 8 – пентан

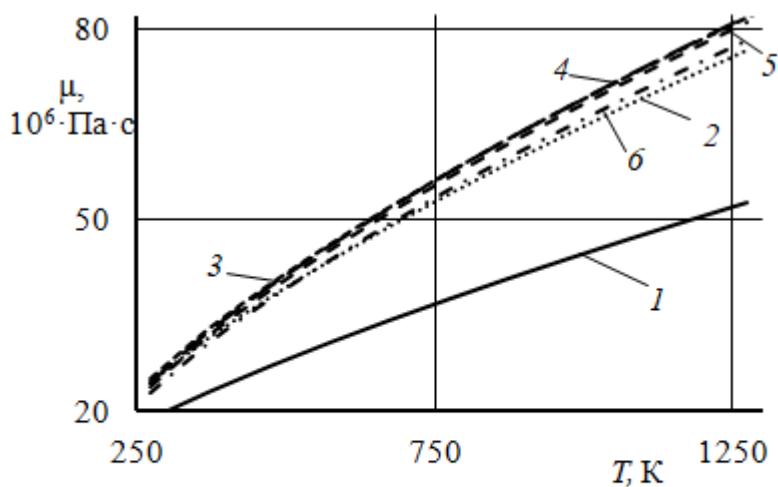


Рис. 16. Зависимость от температуры вязкости гелий-ксеноновых смесей с молярными массами (кг/кмоль): 1 – 4,003; 2 – 20,2; 3 – 39,95; 4 – 60; 5 – 81,3; 6 – 131,3

аппаратуры и оценка погрешностей измерения.

Создание высокоэффективного малоразмерного

экспериментальные стенды, спроектированные и изготовленные для определения

экспериментальных характеристик ступеней малоразмерных центробежного компрессора и центро斯特ремительной турбины, а также регенератора рекуперативного типа с пластинчато-ребристой матрицей и газонагревателя.

Стендовое оборудование выполнено герметичным, что позволило проводить исследования на различных рабочих тела (воздух, аргон, криптон, неон, гелий-ксеноновые смеси с молярными массами 39,94 и 83,80 кг/кмоль). Все турбомашины были оснащены газодинамическими лепестковыми подшипниками, которые, как и электрические машины, проходили отработку в составе турбокомпрессоров и теплодинамических имитаторов блоков турбогенераторов-компрессоров замкнутых газотурбинных установок.

Приведены описания диагностической

центробежного

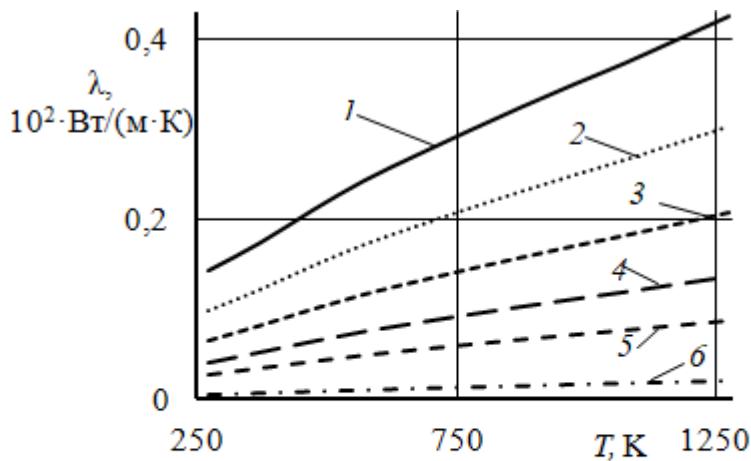


Рис. 17. Зависимости от температуры теплопроводности гелий-ксеноновых смесей с молярными массами (кг/кмоль): 1 – 4,003; 2 – 20,2; 3 – 39,95; 4 – 60; 5 – 81,3; 6 – 131,3

компрессора вызывает значительные затруднения, связанные как с характером течения с положительным градиентом давления, так и с существенно большим влиянием зазора между концами рабочих лопаток и корпусом, чем у центро斯特ремительной турбины. Исследования центробежного компрессора выполнены

вначале с приводом от воздушной центро斯特ремительной турбины, а затем от высокочастотного высокоскоростного электродвигателя с ротором на постоянных магнитах, что повысило стабильность измерений характеристик центробежного компрессора, представляющих собой зависимости степени повышения давления π_k^* и КПД η_k^* от расхода рабочего тела, отнесенного к номинальному \dot{m}/\dot{m}_0 , как это представлено на Рис. 18.

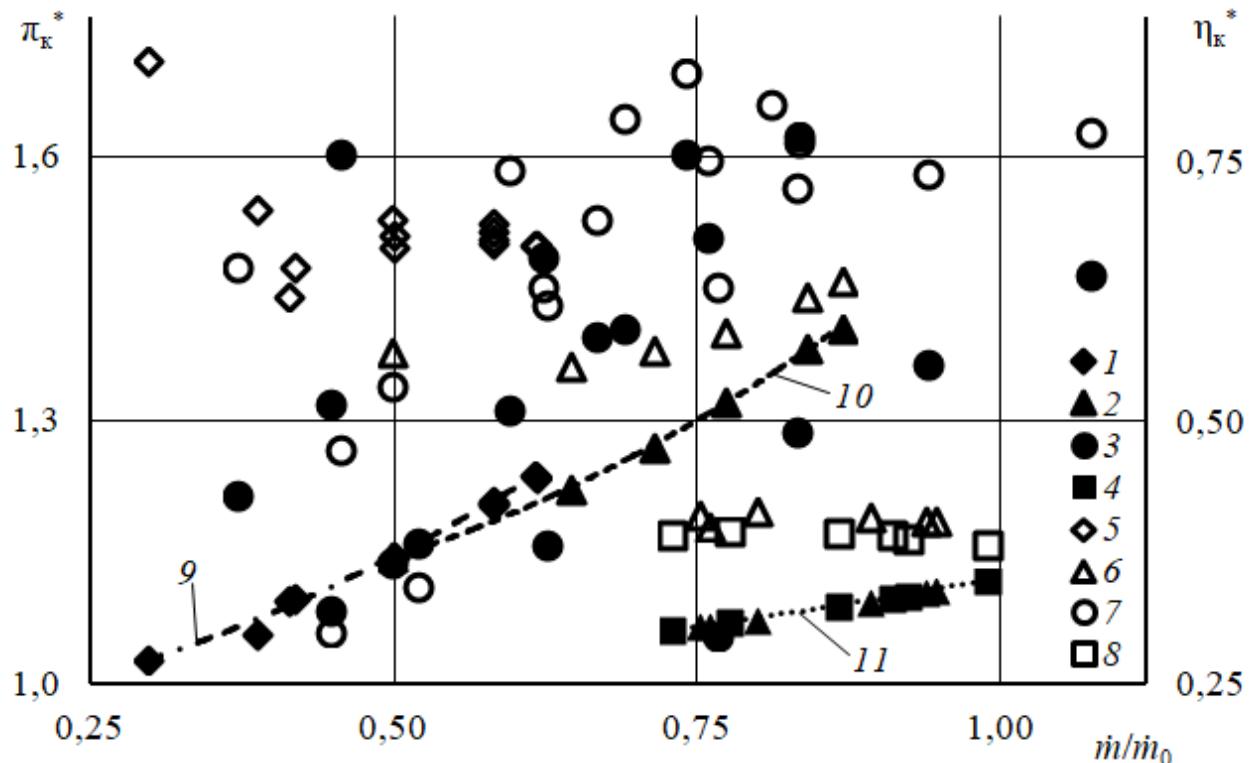


Рис. 18. Экспериментальные зависимости степени повышения давления (1, 2, 3, 4, 9, 10, 11) и коэффициента полезного действия (5, 6, 7, 8) от относительного расхода при работе на: 1, 5, 9 – неоне; 2, 6, 10 – аргоне; 3, 7 – криptonе и 4, 8, 11 – гелий-ксеноновой смеси с молярной массой 39,95 кг/кмоль; 9, 10, 11 – аппроксимации

Аппроксимационные зависимости получены для неизменной геометрии проточной части стенда путем изменения частоты вращения рабочего колеса.

Полученные результаты показали возможность достижения коэффициента полезного действия малоразмерного центробежного компрессора на уровне 0,78...0,84 при степенях повышения давления в пределах 1,67...1,80.

В результате экспериментальных исследований, выполненных в отделе В.Л. Самсонова, получены характеристики центро斯特ремительной турбины при работе на воздухе, аргоне, криptonе, гелий-ксеноновой смеси с молярной массой 83,8 кг/кмоль, которые подтвердили достижимость коэффициента полезного действия на уровне 0,88...0,90.

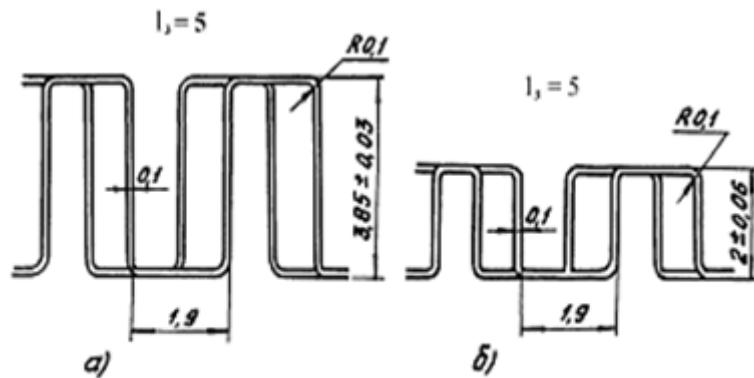


Рис. 19. Геометрия пластинчато-ребристых поверхностей: а) МВТУ №9 и б) МВТУ №10

Стремление к достижению высокой степени регенерации потребовало использования пластинчато-ребристых матриц с короткими смещеными ребрами типа МВТУ №9 и №10, технология изготовления которых разработана на кафедрах обработки давлением и технологии ракетно-космического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана (Рис. 19). Зависимости числа Нуссельта $Nu(Re)$ и коэффициента сопротивления $\xi(Re)$ от числа Рейнольдса, полученные на стенде нестационарного теплообмена, представлены на Рис. 20.

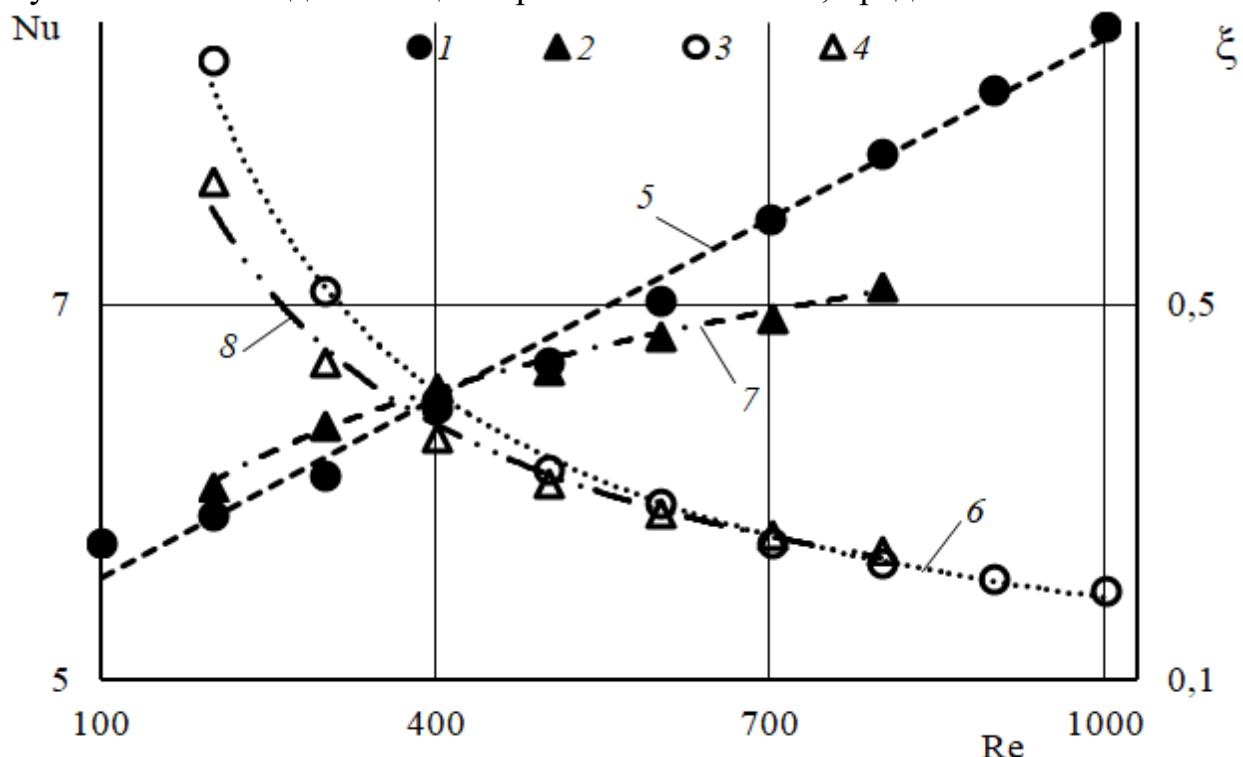


Рис. 20. Зависимости от числа Рейнольдса: 1, 2, 5, 7 – числа Нуссельта $Nu(Re)$; 3, 4, 6, 8 – коэффициента сопротивления $\xi(Re)$; 5, 6, 7, 8 – аппроксимации для поверхностей МВТУ №9 (1, 3, 5, 6) и №10 (2, 4, 7, 8)

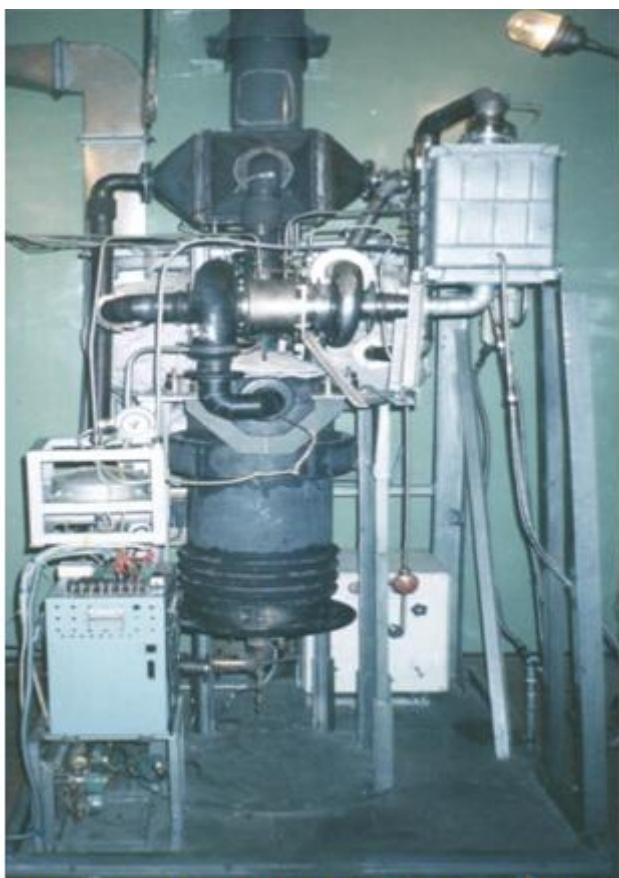


Рис. 21. Макетный образец замкнутой газотурбинной установки, работающей на природном газе

Характеристики всех основных узлов, полученные в результате выполненных исследований, позволили скорректировать методики их расчета и разработать методику проектирования замкнутой газотурбинной установки в целом.

В результате разработки, создания и экспериментальных исследований макетных образцов замкнутой газотурбинной установки мощностью 1...3 кВт, один из которых представлен на Рис. 21, получены их основные характеристики: влияние отношения температур в цикле на выходную мощность и частоту вращения ротора (Рис. 22), коэффициент сохранения полного давления в контуре (Рис. 23) и зависимости удельных работ турбомашин от частоты вращения ротора (Рис. 24), а также влияние выходной мощности на клеммах генератора на КПД установки (Рис. 25).

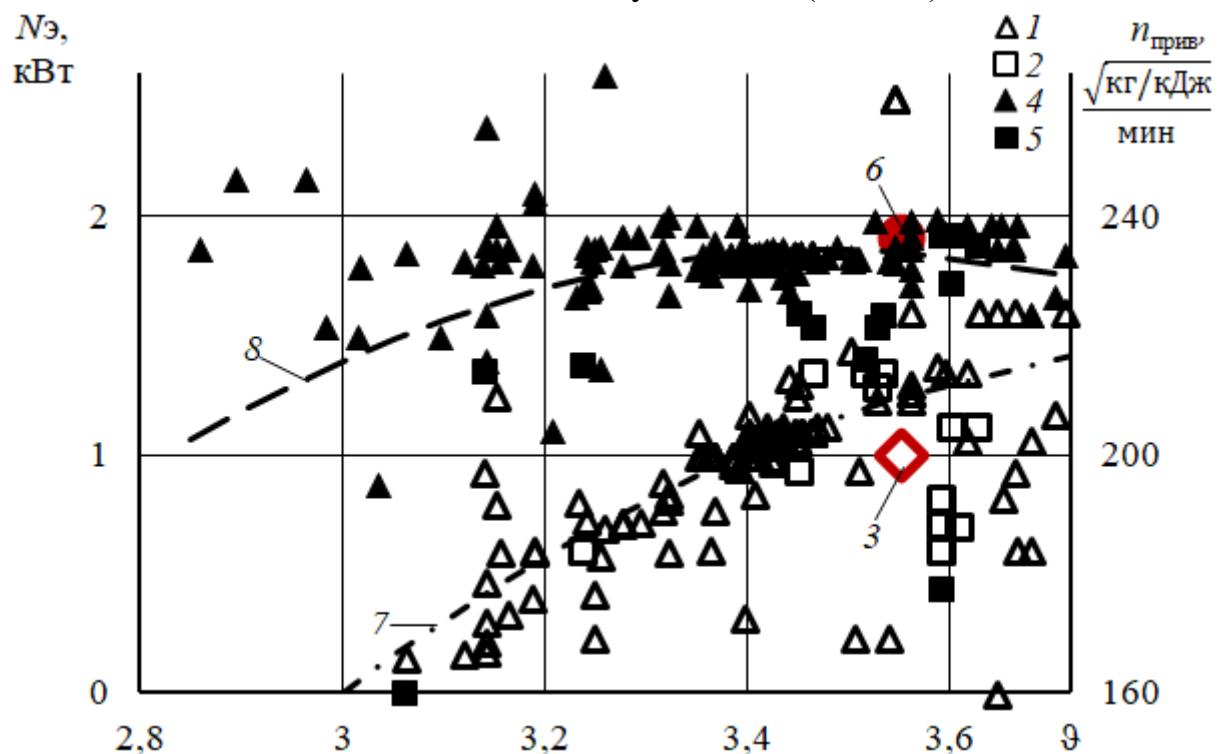


Рис. 22. Влияние отношения температур на частоту вращения ротора (1, 2, 3, 7) и мощность на клеммах генератора (4, 5, 6, 8); 1, 4 – криpton, 2, 5 – гелий-ксеноновая смесь; 3, 6 – расчетная точка; 7, 8 – аппроксимация

Из представленных на Рис. 22 данных видно, что отношение температур в цикле $\vartheta = 3,55 \pm 0,10$ обеспечивает устойчивое поддержание мощности на уровне 1 кВт при приведенной частоте вращения $200 \sqrt{\text{кг/кДж}}/\text{мин}$.

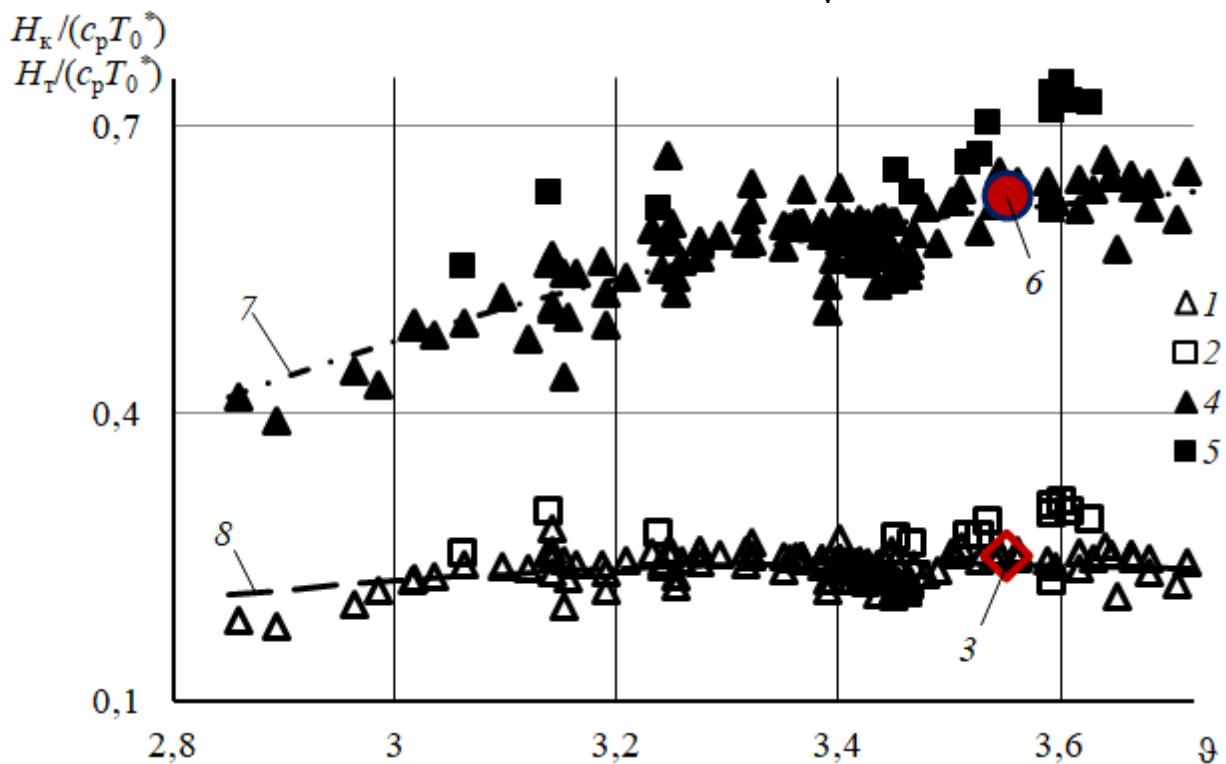


Рис. 23. Влияние отношения температур на напор ЦБК (1, 2, 3, 8) и теплоперепад ЦСТ (4, 5, 6, 7); 1, 4 – криpton; 2, 5 – гелий-ксеноная смесь; 3, 6 – расчетная точка; 7, 8 – аппроксимация

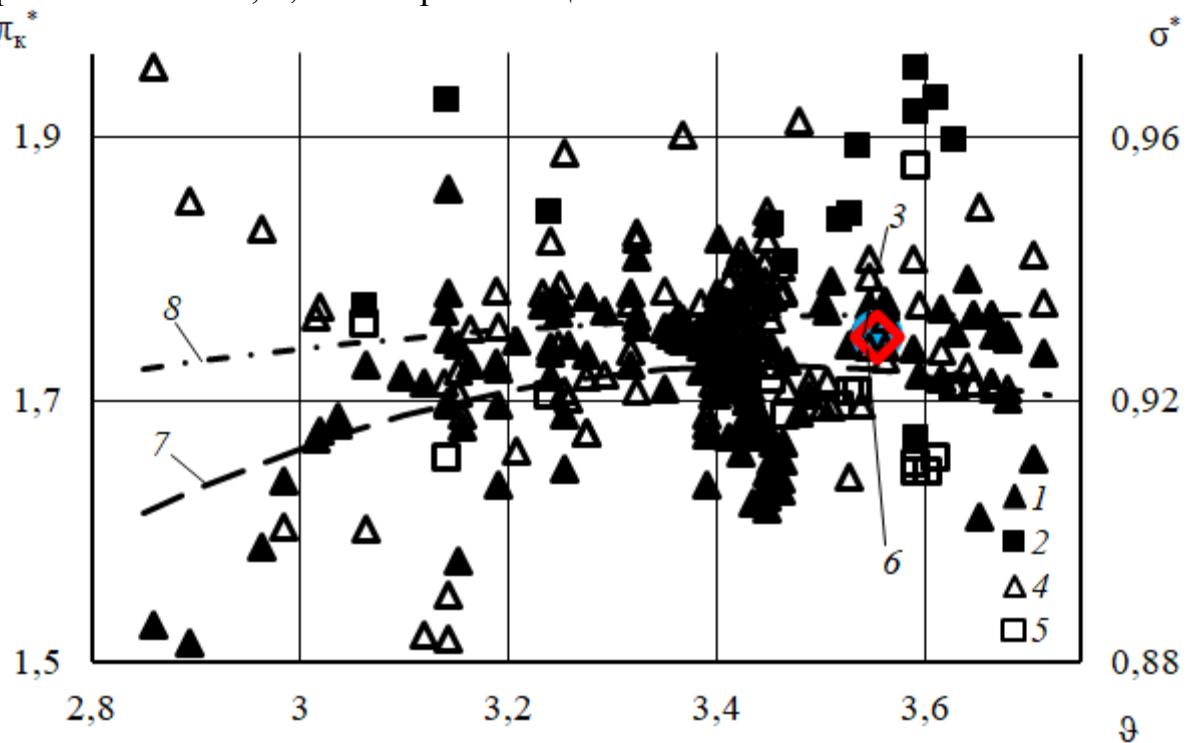


Рис. 24. Влияние отношения температур на степень повышения давления (1, 2, 3, 7) и коэффициент сохранения полного давления (4, 5, 6, 8); 1, 4 – криpton; 2, 5 – гелий-ксеноная смесь; 3, 6 – расчетная точка; 7, 8 – аппроксимация

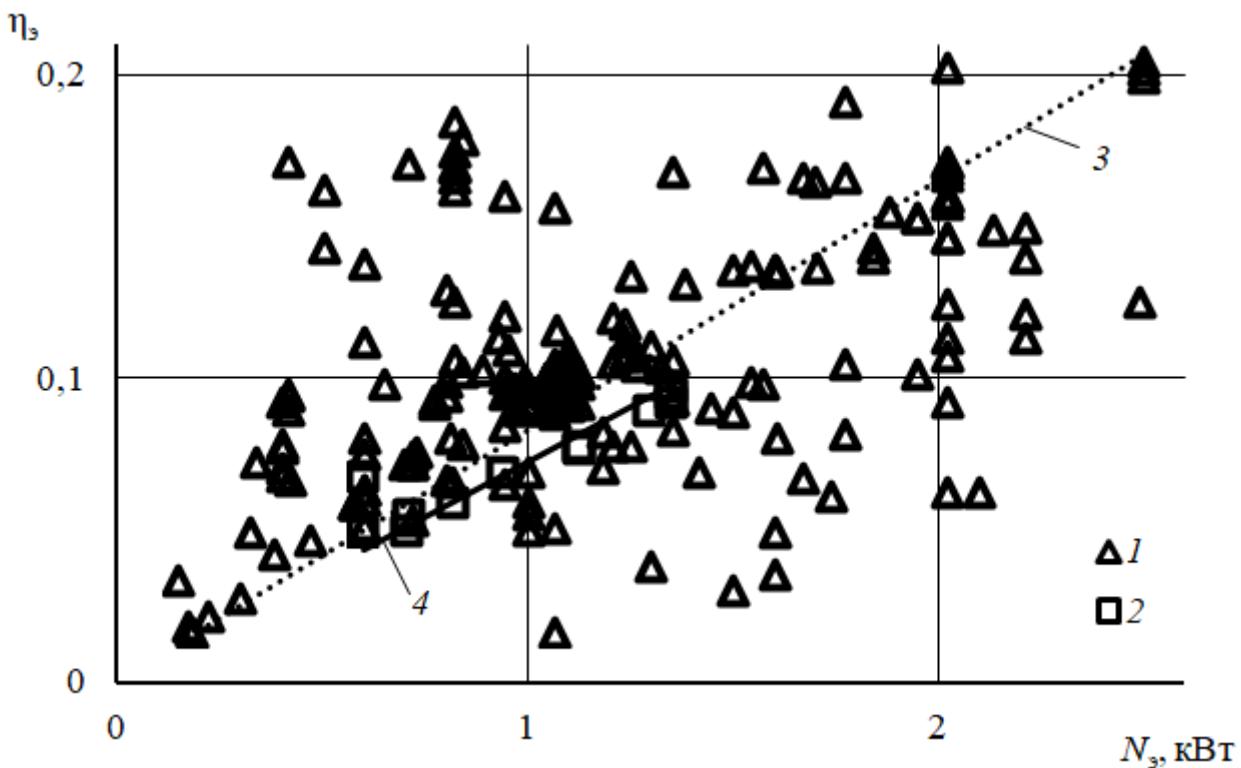


Рис. 25. Влияние выходной мощности на КПД установки при работе на: 1, 3 – криптоне; 2, 4 – гелий-ксеноновой смеси; 3, 4 – аппроксимации

Полученные экспериментальные результаты, в основном, показали соответствие параметрам, заложенным при проектировании макетных образцов, и позволили уточнить их значения, необходимые для моделирования.

В четвертой главе представлен обобщенный метод проектирования замкнутой газотурбинной установки для наземных и космических применений. Метод основан на термогазодинамическом расчете установки, учитывающем неравновесность процессов в основных узлах путем определения прироста энтропии (уменьшения эксергии) с учетом имеющихся экспериментальных данных. Особое место в процессе проектирования замкнутой газотурбинной установки, обеспечивающей потребителя электричеством, теплом и холодом в разных сочетаниях, занимает выбор рабочего тела и его начальных параметров. Ограничения на выбор рабочего тела связаны с необходимостью нахождения его в газовой фазе на всех режимах работы установки. С другой стороны, серьезным ограничением является работа сжатия компрессора и расширения турбины. Их величины определяют частоту вращения ротора, которая, в свою очередь, влияет на напряжения растяжения в рабочих колесах турбомашин, пяте осевого подшипника и роторе электрогенератора. На выбор параметров замкнутой газотурбинной установки влияет также компоновка блока турбогенератора-компрессора (количество опор, взаимное расположение турбомашин и электрогенератора, тип и способ охлаждения обмоток последнего).

Для энергохолодильных замкнутых газотурбинных установок выполнено сравнение параллельной и последовательной схем, которое показало, что для высоких холодопроизводительностей и температуры кондиционируемого

объекта, близкой к температуре окружающей среды, возможно использование последовательной схемы, в остальных случаях целесообразно использовать параллельную. Обе схемы могут быть реализованы и в предельном случае производства только холода.

Предложенные подходы были реализованы при проектировании ряда замкнутых газотурбинных установок для конкретных применений, а также для оценки возможности создания двухконтурной тригенерационной газотурбинной установки на базе авиационного двигателя Д30.

В пятой главе рассмотрены основные режимы работы замкнутых газотурбинных установок для наземных и космических применений, к которым относятся режимы: номинальный, форсированный, собственных нужд и самовращения. Представлена методика оценки параметров замкнутой газотурбинной установки на этих режимах. Рассмотрены количественные и качественные методы регулирования.

Количественное регулирование мощности замкнутой газотурбинной установки (регулирование расхода) осуществляется изменением давления p в контуре, в зависимости от которого изменяются работа цикла $L_{\text{ц}}$, мощность установки N , коэффициент полезного действия цикла $\eta_{\text{ц}}$, подводимая Q_{2-3} , отводимая Q_{5-0} и возвращаемая в цикл Q_{1-2} теплота, степень регенерации ε , температурный напор ΔT , коэффициент теплопередачи k и коэффициент сохранения полного давления σ^* . На Рис. 26, 27 представлены их величины в виде долей от номинальных значений, обозначенных индексом «0», в зависимости от отношения текущего давления p к номинальному p_0 .

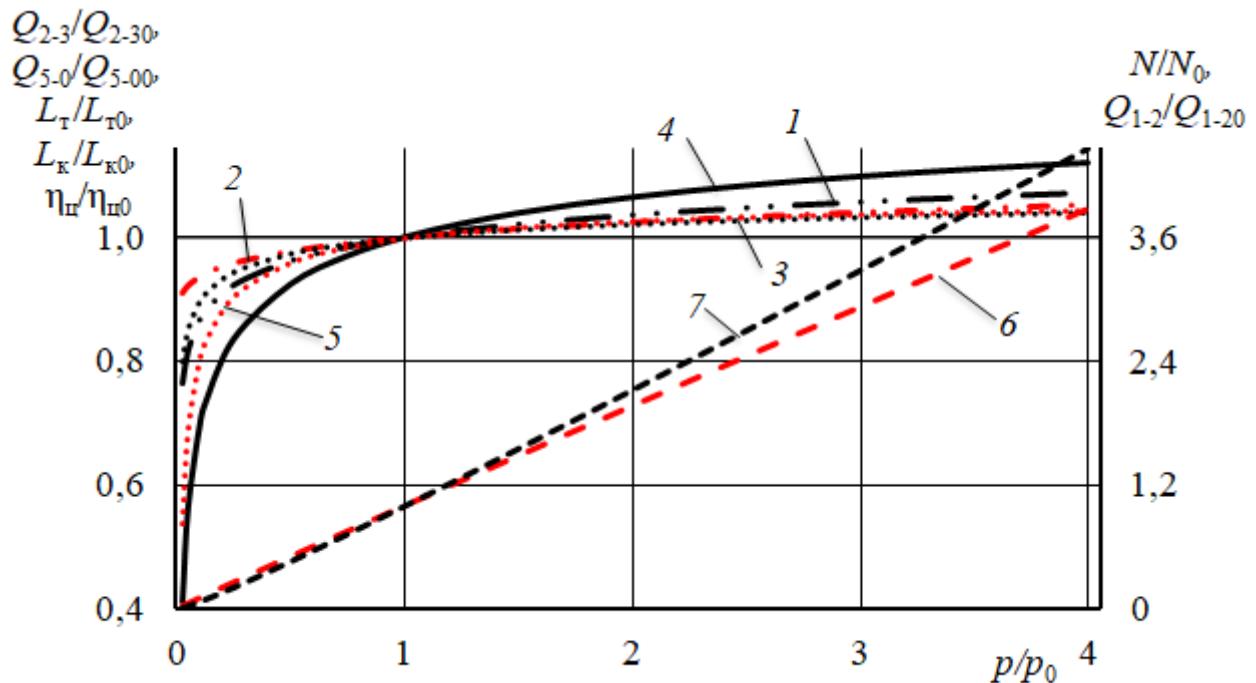


Рис. 26. Влияние отношения давления в контуре замкнутой газотурбинной установки на относительные значения: 1 – работы турбины; 2 – работы компрессора; 3 – подводимой теплоты; 4 – отводимой теплоты; 5 – коэффициента полезного действия; 6 – теплоты регенератора; 7 – мощности

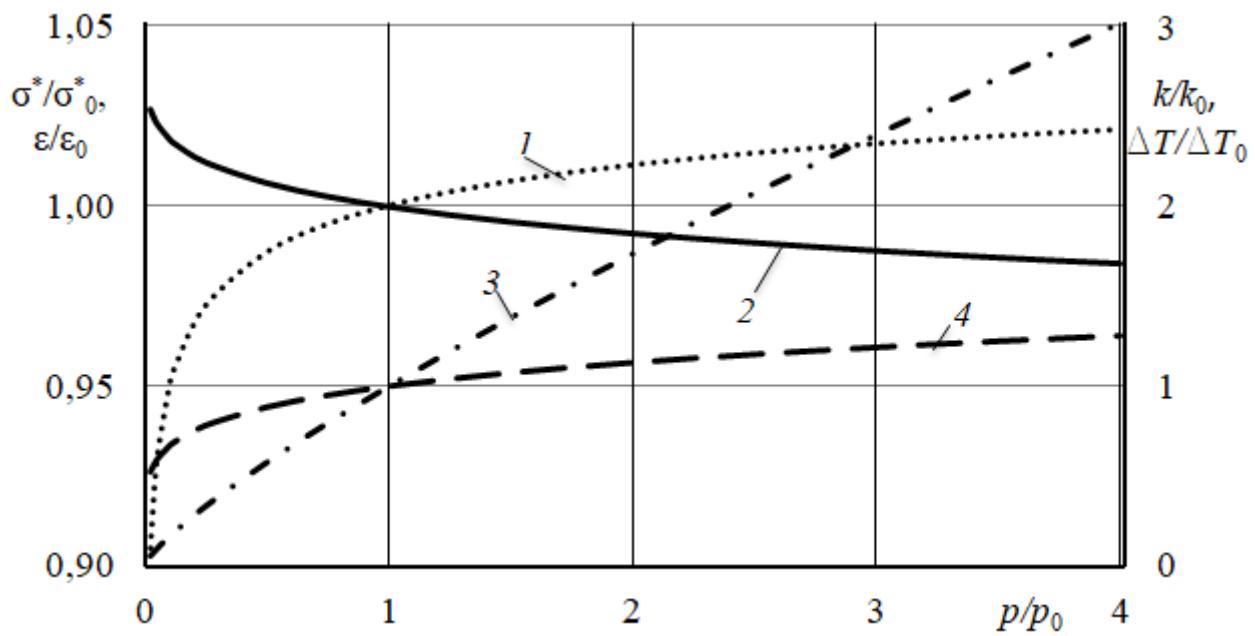


Рис. 27. Влияние отношения давления в контуре регенеративной замкнутой газотурбинной установки на относительные значения: 1 – коэффициента сохранения полного давления; 2 – степени регенерации; 3 – коэффициента теплопередачи; 4 – температурного напора

Применение такого подхода ограничено необходимостью значительного переразмеривания теплообменных аппаратов и электрического генератора. Альтернативой является количественно-качественное регулирование путем изменения молярной массы смеси при пропорциональном снижении температуры при входе в компрессор, при котором наиболее заметны изменения удельной работы (1), коэффициента полезного действия (3) и мощности турбины (2), как показано на Рис. 28.

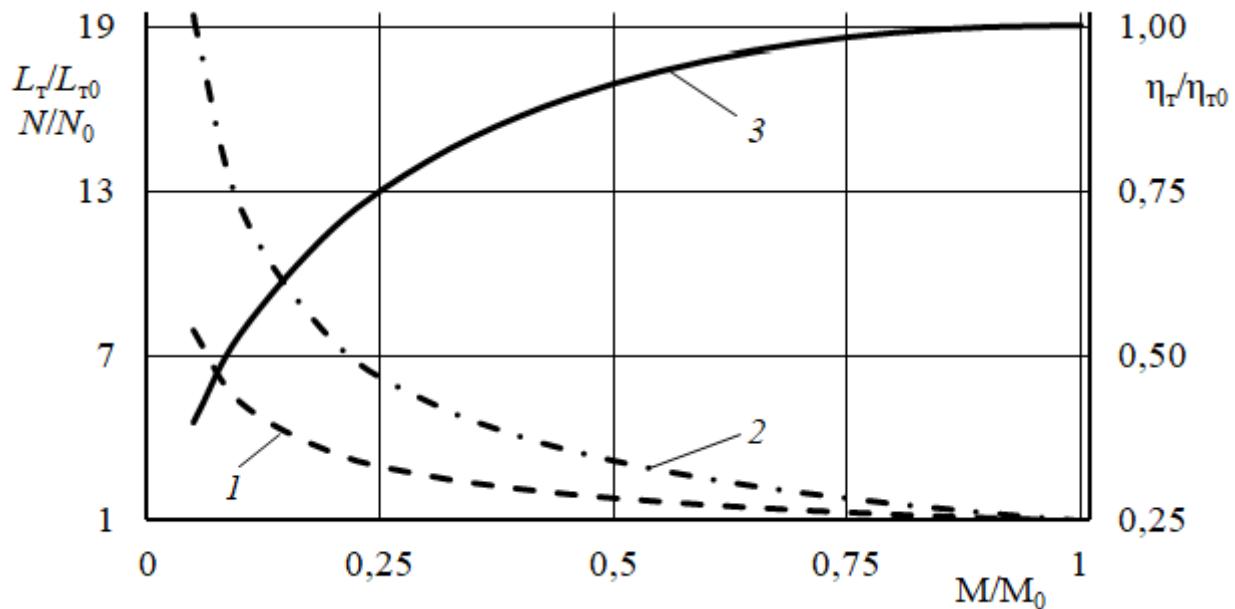


Рис. 28. Влияние относительной молярной массы на относительные величины: 1 – работу турбины; 2 – относительную мощность турбины; 3 – коэффициент полезного действия турбины

Именно уменьшение коэффициента полезного действия турбины, вследствие невозможности эффективного срабатывания большого теплоперепада, приводит к существенно меньшему возрастанию коэффициента полезного действия замкнутой газотурбинной установки (кривая 3 на Рис. 29), чем это можно было бы предполагать из расчета цикла, а наступающее при дальнейшем уменьшении молярной массы снижение эффективной мощности после достижения максимума (кривая 2) показывает предел возможного форсирования замкнутой газотурбинной установки данным методом.

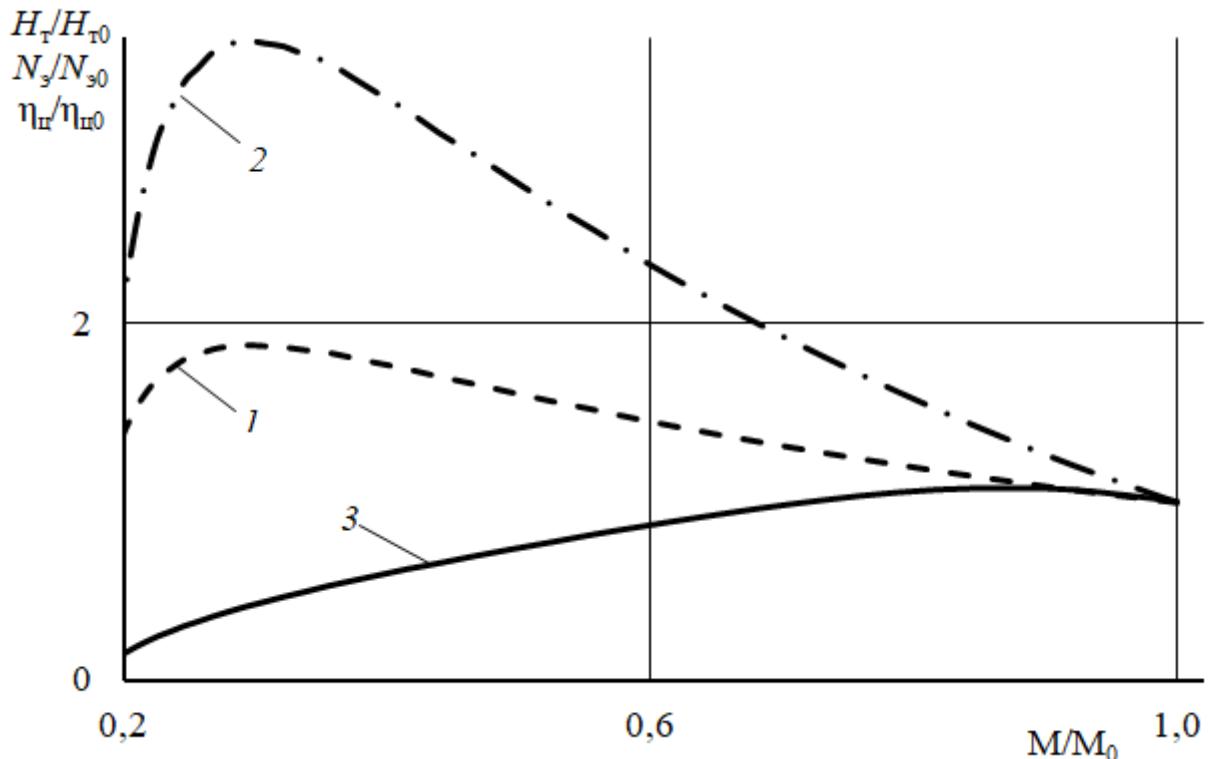


Рис. 29. Влияние молярной массы на относительные параметры замкнутой газотурбинной установки: 1 – работу турбины; 2 – мощность; 3 – коэффициент полезного действия цикла

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Разработан обобщенный метод термогазодинамического анализа замкнутых газотурбинных установок для наземных и космических применений при использовании параллельной, последовательной или комбинированной схемы соединения энергетической и холодильной частей в единый газовый контур. Научная новизна метода заключается в объединении подхода к выбору рабочего тела, рационального цикла и схемы замкнутой газотурбинной установки в зависимости от параметров цикла, видов и соотношений вырабатываемой энергии (электричество, тепло, холод), а также математического моделирования турбомашин и теплообменных аппаратов, термопрочностных ограничений в деталях ротора.

2. Предложена методика выбора рабочего тела замкнутой газотурбинной установки, находящегося в газофазной области во всем диапазоне параметров, для наземных и космических применений в зависимости от параметров цикла,

соотношений видов вырабатываемой энергии, особенностей подвода и отвода с учетом размеров проточных частей турбомашин, эффективности теплообменных аппаратов теплоты и термопрочностных ограничений. В частности, показано, что высокоэффективные полузакрытые рабочие колеса центростремительной турбины и центробежного компрессора могут быть сконструированы при молярных массах рабочего тела не менее 50 кг/кмоль и 20 кг/кмоль, соответственно.

3. Предложен подход к выбору эффективных циклов и схем замкнутых газотурбинных установок для наземных и космических применений в зависимости от видов вырабатываемой энергии, параметров рабочего тела, особенностей подвода и отвода теплоты. Показано, что в условиях ограниченного отношения температур в цикле, который находится в диапазоне от 2,5 до 3,5, целесообразно применение для энергетических замкнутых газотурбинных установок в диапазоне мощностей от единиц киловатт до 10 МВт регенеративного цикла с высокой степенью регенерации (не менее 0,9), который более эффективен (до двух раз), чем простой цикл Брайтона–Джоуля; позволяет выбрать степень повышения давления в диапазоне от 1,7 до 3,0, которому соответствуют умеренные (до 200...250 м/с) окружные скорости рабочих колес турбомашин и получать минимально возможные поверхности для отвода теплоты из контура (удельная поверхность излучателя от 0,06...0,07 $\text{м}^2\text{К}/\text{Вт}$).

4. Показано, что в области автомодельности по критериям Рейнольдса и Маха характер зависимостей расхода рабочего тела от степени повышения давления практически не зависит от молярной массы рабочего тела, что позволяет, варьируя последнюю изменять мощность замкнутой газотурбинной установки. Это позволяет, используя неизменную геометрию проточной части создавать мощностной ряд установок. В условиях жестких ограничений по массогабаритным характеристикам из всех возможных рабочих тел предпочтение следует отдавать гелий-ксеноновым смесям, имеющим аномально низкие числа Прандтля (0,20...0,30).

5. Разработаны и модернизированы методики экспериментальных исследований основных узлов замкнутой газотурбинной установки для наземных и космических применений, реализация которых на специально спроектированных и отлаженных герметичных стендах позволила получить характеристики центробежного компрессора, центростремительной турбины, регенератора рекуперативного типа и газонагревателя при работе на различных рабочих телах. Показана достоверность заявленных параметров исследованных узлов. Обобщены данные экспериментальных исследований основных узлов установки, что позволило скорректировать расчетные методики указанных узлов и верифицировать полученные результаты расчетов газотурбинной установки замкнутого контура.

6. Обобщены результаты испытаний макетных образцов замкнутых газотурбинных установок мощностью 1...3 кВт с электрическим и газовым нагревом рабочего тела. Получены зависимости влияния отношения температур в цикле на работы турбомашин, выходную мощность на клеммах генератора и

чистоту вращения ротора. Показана возможность достижения высокого газодинамического совершенства тракта замкнутой газотурбинной установки (коэффициент сохранения полного давления на уровне 0,92...0,93).

7. Показано, что замкнутые газотурбинные установки космического и автономного применения, способные обеспечить потребителя теплотой и холодом, могут быть исполнены по параллельной, последовательной или комбинированной схемам. При проектировании энергохолодильных (в пределе чисто холодильных) замкнутых газотурбинных установок, рассчитанных на кондиционирование объекта при температуре, близкой к температуре окружающей среды, и высокой холодопроизводительности (больших расходах рабочего тела в холодильной части) предпочтение следует отдавать последовательной схеме, а при малых холодопроизводительностях и криогенных температурах параллельной схеме. При этом необходимо учитывать, что реализация замкнутой газотурбинной установки последовательной схемы требует больших степеней повышения давления, чем параллельной.

8. Предложен метод оценки параметров замкнутых газотурбинных установок для наземных и космических применений на режимах частичной мощности при количественном, качественном и количественно-качественном методах регулирования. Выявлены пределы регулирования мощности замкнутой газотурбинной установки при указанных методах. Показано, что основным недостатком количественного метода является необходимость переразмеривания электрического генератора и теплообменных аппаратов. Впервые показано, что использование в качестве рабочего тела замкнутых газотурбинных установок газовых смесей позволяет применить наиболее эффективное количественно-качественное регулирование, осуществляющее одновременным снижением температуры перед компрессором и молярной массы рабочего тела, что дает возможность повысить термодинамический коэффициент полезного действия и удельную работу замкнутой газотурбинной установки на форсированном режиме. Практическая ценность метода оценки параметров замкнутой газотурбинной установки заключается в определении ограничивающих факторов количественно-качественного метода регулирования, которыми являются уменьшение коэффициента полезного действия турбины и снижение эффективности теплообменных аппаратов, с одной стороны, и уровнем подогрева рабочего тела ракетного двигателя или сжиженного природного газа с другой. Указанные ограничения накладывает дополнительные условия на выбор молярной массы газовой смеси при работе на номинальном режиме.

9. Практическая ценность предложенного обобщенного метода выбора оптимальных параметров и эффективных тепловых схем замкнутых газотурбинных установок наземного и космического применения, входящих в него методик и полученных экспериментальных результатов, заключается в возможности его применения для решения ряда практических задач, примером которых служат: разработки автономной замкнутой газотурбинной установки, работающей на продуктах сгорания сжиженного природного газа, и криоэнергетической газотурбинной установки для Лунной базы, а также в

обосновании возможности конверсии двухконтурных турбореактивных двигателей с малой степенью двухконтурности ($m < 1$) в двухконтурные тригенерационные газотурбинные установки на примере двигателя Д30 III-й серии.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах.

1. Арбеков А.Н. Выбор рабочего тела для замкнутых газотурбинных установок мощностью от 6 до 12 кВт, работающих на органическом топливе (Версия: Selection of the working medium for 6- to 12-kw closed organic-fuel-powered gas-turbine plants) // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. № 1. С. 131-135. (0,4 п.л.)

2. Арбеков А.Н., Суровцев И.Г., Дермер П.Б. Эффективность теплопередачи в рекуперативных теплообменниках с высокоскоростными газовыми потоками при низких числах Прандтля (Версия: Efficiency of heat transfer in recuperative heat exchangers with high-speed gas flows at low Prandtl numbers) // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. № 3. С. 463-468. (0,4/0,13 п.л.)

3. Арбеков А.Н. Выбор термодинамического цикла замкнутой газотурбинной установки космического аппарата с целью минимизации поверхности холодильника-излучателя (Версия: Selecting a thermodynamic cycle for the closed gas-turbine power plant of spacecraft in order to minimize surface of the cooler-radiator) // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. № 4. С. 613-616. (0,25 п.л.)

4. Арбеков А.Н., Вараксин А.Ю., Иноземцев А.А. Влияние степени двухконтурности базового турбореактивного двигателя на возможность создания конверсионных тригенерационных двухконтурных энергетических установок (Версия: Influence of the bypass ratio of a basic turbofan engine on the possibility of creating aeroderivative trigeneration power plants) // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53. № 6. С. 928-933. (0,4/0,13 п.л.)

5. Арбеков А.Н., Вараксин А.Ю., Иноземцев А.А. Тригенерационный цикл как путь создания многоцелевых стационарных энергетических установок на основе конверсии двухконтурных турбореактивных двигателей (Версия: The trigeneration cycle as a way to create multipurpose stationary power plants based on conversion of aeroderivative turbofan engines) // Доклады Академии наук. 2014. Т. 458. № 5. С. 539-541. (0,2/0,07 п.л.)

6. Безъядерная энергетика пилотируемой экспедиции на Марс Арбеков А.Н. и др. // Известия РАН, сер. Энергетика, № 4, 2002 г. С. 3-12. (0,7/0,15 п.л.)

7. Арбеков А.Н., Голубев С.В., Круминг А.П. Оценка параметров ядерной замкнутой газотурбинной криоэнергетической установки для Лунной базы // Труды 5-й Российской национальной конференции по теплообмену. Т. 1. М.: Издательский дом МЭИ, 2010 г. С. 153-156. (0,25/0,08 п.л.)

8. Леонтьев А.И., Арбеков А.Н. Развитие космических газотурбинных установок в работах В.Л. Самсонова // Труды МАИ. 2011. № 43. С. 1-13. (0,9/0,45 п.л.)

9. Арбеков А.Н., Бурцев С.А. Исследование цикла замкнутой

газотурбинной тригенерационной установки параллельной схемы // Термические процессы в технике. 2012. № 7. С. 326-331. (0,5/0,25 п.л.)

10. Новицкий Б.Б., Арбеков А.Н. Определение характеристик малоразмерного центробежного компрессора // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 10 (10). С. 111-118. (0,5/0,25 п.л.)

11. Новицкий Б.Б., Колосов Н.Ф., Арбеков А.Н. Макетный образец двухпетлевой замкнутой газотурбинной энергетической установки мощностью 10 кВт // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 10 (10). С. 119-126. (0,45/0,15 п.л.)

12. Исследование возможности конверсии двухконтурных турбореактивных двигателей в тригенерационные стационарные энергетические установки / Арбеков А.Н. и др. // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2014. № 3 (38). С. 6-15. (0,7/0,17 п.л.)

13. Арбеков А.Н., Новицкий Б.Б. Разработка макетного образца космической замкнутой газотурбинной установки // Вестник СГАУ им. академика С.П. Королёва (НИУ). 2014. № 5-2 (47). С. 35-41. (0,44/0,22 п.л.)

14. Новицкий Б.Б., Арбеков А.Н. Экспериментальное исследование малорасходного центробежного компрессора замкнутой газотурбинной установки // Вестник СГАУ им. академика С.П. Королёва (НИУ). 2014. № 5-2 (47). С. 42-47. (0,4/0,2 п.л.)

15. Арбеков А.Н. Автономная долгоресурсная малообслуживаемая замкнутая газотурбинная установка, работающая на органическом топливе // Вестник СГАУ им. академика С.П. Королёва (НИУ). 2012. № 3-2 (34). С. 307-312. (0,4 п.л.)

16. Новицкий Б.Б., Арбеков А.Н. Исследование возможности создания макетного образца двухпетлевой замкнутой газотурбинной энергетической установки мощностью 6 кВт // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. № 13. С. 1-8. (0,5/0,25 п.л.)

17. Колосов Н.Ф., Новицкий Б.Б., Арбеков А.Н. Исследование возможности создания макетного образца двухпетлевой замкнутой газотурбинной энергетической установки мощностью 10 кВт // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 7. С. 333-344. (0,7/0,23 п.л.)

18. Новицкий Б.Б., Арбеков А.Н. Экспериментальное исследование характеристик ступени малоразмерного центробежного компрессора // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 8. С. 491-504. (0,9/0,45 п.л.)

19. Арбеков А.Н., Бурцев С.А. Исследование цикла замкнутой газотурбинной тригенерационной установки последовательной схемы // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 3. С. 1-14. (0,9/0,45 п.л.)

20. Суровцев И.Г., Арбеков А.Н. Применение сверхкритических углекислотных циклов в установках по утилизации промышленной теплоты // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 2. С. 335-346. (0,7/0,35 п.л.)

21. Безъядерная энергетика пилотируемой марсианской экспедиции. Арбеков А.Н. и др. // Тез. докл. Международной космической конф. «Космос без оружия – арена мирного сотрудничества в XXI веке». М., 2001 г. С. 137. (0,1/0,015 п.л.)
22. Исследование влияния газодинамической температурной стратификации на эффективность комбинированного цикла Брайтона. Арбеков А.Н. и др. // Труды 3-й Российской национальной конференции по теплообмену. Т. 1. М., МЭИ, 2002. С. 151-154. (0,25 /0,06 п.л.)
23. Ядерная замкнутая газотурбинная энергодвигательная установка пилотируемого марсианского космического аппарата. Арбеков А.Н. и др. // Тез. докл. 12-й Всерос. межвуз. н/т конф. «Газотурбинные комбинированные установки и двигатели». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 23-25 ноября 2004 г. С. 161-163. (0,25/0,03 п.л.)
24. Ядерная замкнутая газотурбинная энергодвигательная установка геостационарного высокоэнергетического спутника. Арбеков А.Н. и др. // Тез. докл. 12-й Всеросс. межвуз. н/т конф. «Газотурбинные комбинированные установки и двигатели». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 23-25 ноября 2004 г. С. 163-165. (0,25/0,05 п.л.)
25. Концептуальный проект солнечной замкнутой газотурбинной криоэнергетической установки КА «Кристалл-ВД». Арбеков А.Н. и др. // Тез. докл. 12-й Всеросс. межвуз. н/т конф. «Газотурбинные комбинированные установки и двигатели». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 23-25 ноября 2004 г. С. 165-167. (0,1/0,025 п.л.)
26. Еще раз об эксперименте на МКС с маломощной солнечной ЗГТЭУ. Арбеков А.Н. и др. // Тез. докл. 12-й Всерос. межвуз. н/т конф. «Газотурбинные комбинированные установки и двигатели». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 23-25 ноября 2004 г. С. 167-169. (0,1/0,025 п.л.)
27. Арбеков А.Н., Леонтьев А.И. Возможности использования газодинамического энергоразделения для повышения эффективности космических ЗГТУ // Тез. докл. 12-й Всеросс. межвуз. н/т конф. «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 23-25 ноября 2004 г. С. 171. (0,1/0,05 п.л.)
28. Обзор и анализ состояния разработки газодинамических опор роторов авиационных и космических турбомашин. Арбеков А.Н. и др. // Тез. докл. 12-й Всеросс. межвуз. н/т конф. «Газотурбинные комбинированные установки и двигатели», М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 23-25 ноября 2004 г. С. 179-181. (0,2/0,05 п.л.)
29. Расчет, проектирование, изготовление и испытание усовершенствованной ступени центробежного компрессора блока ТГК 1-го опытного образца ЗГТЭУ $N_e = 1\dots3$ кВт, работающей на органическом топливе. Арбеков А.Н. и др. // Тез. докл. 12-й Всеросс. межвуз. н/т конф. «Газотурбинные комбинированные установки и двигатели». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 23-25 ноября 2004 г. С. 188-189. (0,1/0,015 п.л.)
30. Эскизный проект перспективной ЗГТЭУ $N_e = 1\dots3$ кВт, работающей на органическом топливе, для радиорелейных станций систем связи. Арбеков

А.Н. и др. // Тез. докл. 12-й Всеросс. межвуз. н/т конф. «Газотурбинные комбинированные установки и двигатели». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 23-25 ноября 2004 г. С. 190-191. (0,1/0,015 п.л.)

31. Теплодинамический имитатор блока турбогенератор–компрессор перспективной ЗГТЭУ $N_e = 1\dots3$ кВт, работающей на органическом топливе. Арбеков А.Н. и др. // Тез. докл. 12-й Всеросс. межвуз. н/т конф. «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 23-25 ноября 2004 г. С. 192-193. (0,1/0,015 п.л.)

32. Арбеков А.Н. Особенности форсирования замкнутой газотурбинной установки космического аппарата // Сборник тезисов II Международной научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI века». Т. 1. М.: ЦИАМ, 2005. С. 259-260. (0,12 п.л.)

33. Леонтьев А.И., Арбеков А.Н., Бурцев С.А. Сравнение схем космических замкнутых газотурбинных холдоэнергетических установок // Труды XXXVI Уральского семинара. 2006. С. 125-135. (0,7/0,25 п.л.)

34. Арбеков А. Н. Оценка возможности отвода тепла от замкнутой газотурбинной установки космического аппарата // Труды 4 Российской национальной конференции по теплообмену. Т. 1. М.: МЭИ, 2006 г. С. 237-240. (0,25 п.л.)

35. Ядерная замкнутая газотурбинная установка мощностью 50 кВт для лунной базы. Арбеков А.Н. и др. / Тез. докл. 13-й Всерос. межвуз. н/т конф. «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели». М.: ГПНТБ, 2008. С.144-145. (0,1/0,015 п.л.)

36. Автономная замкнутая газотурбинная холдоэнергетическая установка мощностью 1–3 кВт, работающая на органическом топливе. Арбеков А.Н. и др. // Тез. докл. 13-й Всерос. межвуз. н/т конф. «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели». М.: ГПНТБ, 2008. С.147-148. (0,1/0,015 п.л.)

37. Арбеков А. Н. Особенности применения замкнутых газотурбинных установок для космических объектов // Сборник тезисов III Международной научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI века». Т. 1.- М.: ЦИАМ, 2010. С. 1037-1040. (0,25 п.л.)

38. Исследование теплогидравлических характеристик высококомпактных поверхностей теплообмена. Арбеков А.Н. и др. // Труды 5-й Российской национальной конференции по теплообмену. Т. 8. М.: Издательский дом МЭИ, 2010 г. С. 44-46. (0,2/0,04 п.л.)

39. Установки малой мощности с замкнутым газотурбинным циклом. Арбеков А.Н. и др. // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики т. 2. Под ред. Акад. РАН А. А. Саркисова — М.: Академ-Принт. 2015. С. 208-218. (0,8/0,12 п.л.)

40. Novitskiy B.B., Arbekov A.N. Calculation characteristics of centrifugal compressor operates on a mixture of gases // В сб.: AIP Conference Proceedings 18. Сеп. «International Conference on the Methods of Aerophysical Research, ICMAR 2016: Proceedings of the 18th International Conference on the Methods of Aerophysical Research». 2016. С.030089 (1-6). (0,45/0,22 п.л.)

41. Арбеков А.Н., Леонтьев А.И., Бурцев С.А., Голубев С.В.
Теплохладоэнергетический агрегат / Патент на полезную модель RUS 123069
24.07.2012. (0,1/0,025 п.л.)