

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н. Э. БАУМАНА**

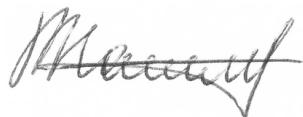
**На правах рукописи**

**Нагимов Руслан Рафаэльевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ  
НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ  
ГЕЛИЕВОГО ОЖИЖИТЕЛЯ/РЕФРИЖЕРАТОРА  
СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ**

**05.04.03 – Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной  
техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения**

**АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**



**Москва – 2016**

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н. Э. Баумана)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Архаров Иван Алексеевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
Прилуцкий Игорь Кирович, профессор кафедры  
криогенной техники, Санкт-Петербургский  
национальный исследовательский университет  
информационных технологий, механики и оптики

кандидат технических наук, доцент  
Козлов Александр Валерьевич, начальник  
24 кафедры криогенной техники, систем  
кондиционирования и метрологического  
обеспечения, Военный учебно-научный центр  
Военно-воздушных сил «Военно-воздушная  
академия им. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»

Ведущая организация: ОАО «Научно-производственное объединение  
Гелиймаш»

Защита состоится «30» ноября 2016 г. в 16 ч. 30 мин. на заседании Диссертационного совета Д 212.141.16 при Московском Государственном Техническом Университете им. Н. Э. Баумана, расположенному по адресу: г. Москва, Лефортовская наб., д. 1, корпус «Энергомашиностроение», ауд. 314-Э (конференц зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н. Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высыпать по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-ая Бауманская, д. 5 на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.141.16.

Автореферат разослан «\_\_\_» 2016 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета Д 212.141.16,  
кандидат технических наук, доцент

Колосов М. А.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

Развитие физики высоких энергий неразрывно связано с внедрением современных физических инструментов, использующих сверхпроводящее состояние вещества. Основными объектами применения эффекта сверхпроводимости в современных проектах ускорителей заряженных частиц являются сверхпроводящие магниты и сверхпроводящие резонаторные структуры. Сверхпроводящие магниты, используемые для достижения высоких магнитных полей, являются основными элементами циклических ускорителей. Для повышения энергии заряженных частиц в циклических ускорителях необходимо увеличение напряженности магнитного поля для фокусировки и возврата пучка на круговую траекторию, что обусловило переход к сверхпроводящим магнитам для снижения затрат электрической мощности и уменьшения поперечного сечения проводников в обмотках магнитов. Сверхпроводящие высокочастотные резонаторы являются ускорительными структурами как линейных, так и циклических ускорителей. Такие преимущества сверхпроводящих резонаторов, как более высокий ускоряющий градиент, большая апертура резонатора и значительно меньшие тепловые потери на электрическое сопротивление определили их использование во всех современных проектах линейных ускорителей заряженных частиц.

Для криостатирования сверхпроводящих элементов ускорителей используются крупные криогенные системы с затратами электрической мощности от сотен киловатт до десятков мегаватт. Системы с подобной производительностью обусловлены большими размерами сверхпроводящих систем и соответствующими им теплопритоками из окружающей среды, а также высокой динамической нагрузкой от диссипации энергии в резонаторных структурах.

Повышение общей энергетической эффективности подобных криогенных систем производится как с позиции понижения статических и динамических тепловых нагрузок к криогенной системе, так и совершенствованием самих криогенных систем. Понижение статических тепловых нагрузок, обусловленных теплопритоками из окружающей среды, осуществляется, главным образом, применением более совершенных методов термической изоляции и имеет эффективные пределы применимости. Снижение динамического тепловыделения в ускорителях частиц, использующих сверхпроводящие ускоряющие резонаторы, достигается повышением качества токонесущей поверхности сверхпроводников. Современные методы исследования поверхностного слоя, технологий

обработки и контроля качества поверхности ниобиевых резонаторов обеспечивают добротность на уровне  $10^{10}$ , близкой к теоретически достижимому пределу. Ограниченнная эффективность методов снижения статических и динамических тепловых нагрузок к криогенным системам обуславливает важность другого направления повышения энергетической эффективности — совершенствования самих криогенных систем, в том числе уже существующих гелиевых охлаждающе-рефрижераторных комплексов. Современные методы математического моделирования криогенных систем с использованием средств вычислительной техники позволяют значительно повысить энергетическую эффективность криогенных установок.

Существующие гелиевые охлаждающие и рефрижераторные системы спроектированы и построены с учетом особенностей работы сверхпроводящих систем только для основных стационарных режимов работы и по этой причине не оптимизированы для функционирования во всем диапазоне эксплуатационных параметров, что и определяет необходимость настоящей работы. Обеспечение высокой энергетической эффективности и повышение ресурса систем криостатирования требует теоретического и экспериментального исследования методов их оптимизации.

Используемые в настоящее время методы проектирования криогенных систем используют математические модели стационарных и квазистационарных процессов в машинах и аппаратах, в то время как для оптимизации рабочих параметров криогенных систем и снижения затрат электрической мощности необходим переход к математическому моделированию нестационарных процессов.

### **Цель диссертационной работы**

Целью настоящей научной работы является исследование методов оптимизации гелиевых криогенных систем для криостатирования сверхпроводящих элементов ускорителей заряженных частиц с целью повышения их энергетической эффективности и снижения потребления электрической мощности.

### **Задачи работы:**

1. Проанализировать методы математического моделирования криогенных систем с учетом нестационарности рабочих процессов, определить структурную схему математической модели исследуемой криогенной системы.
2. Для неявно заданной математической модели криогенной системы определить набор необходимых экспериментальных данных и создать модели ее структурных элементов.
3. Разработать программный комплекс для автоматизированного

определения требуемых экспериментальных характеристик с использованием стандартной системы управления гелиевым охладителем/рефрижератором.

4. Создать математическую модель криогенной системы линейного ускорителя ARIEL с учетом нестационарности рабочих процессов и проверить корректность данной модели.
5. Определить целевые функции и провести оптимизационный анализ и оценку эффективности различных методов оптимизации в рамках математической модели.
6. Проверить достоверность результатов оптимизации с использованием экспериментальных данных исследуемой системы.
7. Сформировать методику оптимизационного анализа нестационарных процессов гелиевых криогенных систем на базе математической модели с использованием расчетных и экспериментальных данных.

### **Научная новизна**

Новизна исследований, выполненных при решении этих задач, заключается в следующем:

1. Проверена применимость математического моделирования криогенных систем с учетом нестационарности рабочих процессов для оптимизационного анализа.
2. Получена новая научная информация о полезных эффектах различных методов оптимизации криогенных систем с использованием математической модели и их корреляции с экспериментальными данными криогенной системы линейного ускорителя проекта ARIEL.
3. Представлен универсальный метод автоматизированного определения экспериментальных характеристик криогенной системы с использованием данных со стандартной системы управления гелиевого охладителя/рефрижератора.

### **Практическая значимость**

1. Разработанная в рамках настоящей научно-исследовательской работы математическая модель криогенной системы линейного ускорителя проекта ARIEL позволяет производить моделирование различных режимов работы криогенной системы (в т. ч. нештатных) без остановки линейного ускорителя частиц и связанного с этим прерывания работы экспериментальных установок, а также без опасности повреждения существующего оборудования.
2. Разработанное в рамках настоящей работы программное обеспечение позволяет значительно ускорить экспериментальное определение характеристик различных элементов гелиевых

ожижителей/рефрижераторов, сокращая затраты на построение их математических моделей.

3. Полученная экспериментальная и аналитическая информация позволяет произвести оптимизацию как существующих, так и проектируемых криогенных систем, снизить их потребляемую электрическую мощность и сократить эксплуатационные затраты.
4. Представленная методика автоматического определения экспериментальных характеристик гелиевого охладителя/рефрижератора с использованием данных с системы управления показывает возможность более глубокой интеграции систем управления криогенных систем и их математических моделей.
5. Разработанный алгоритм оптимизационного анализа является удобным инструментом анализа и оптимизации криогенных систем с учетом нестационарности рабочих процессов.

#### **На защиту выносятся следующие результаты и положения:**

- Разработанный программный комплекс, производящий автоматическую обработку данных с приборов криогенной системы для определения характеристик элементов криогенной системы в режиме реального времени.
- Математическая модель криогенной системы линейного ускорителя частиц проекта ARIEL, позволяющая моделировать работу установки в нестационарных режимах.
- Полученные на базе математической модели данные об эффективности различных методов оптимизации нестационарных процессов криогенной системы и их корреляция с экспериментально полученными результатами.
- Предложенная методика оптимизационного анализа нестационарных процессов криогенных систем с использованием инструмента математического моделирования и разработанного программного комплекса для автоматизированного определения экспериментальных характеристик элементов криогенной системы.

#### **Апробация работы**

Основные результаты и положения диссертации были представлены:

- Тринадцатая международная конференция «Cryogenics-2014» (Чешская Республика, г. Прага, 2014 г.).
- Двадцать пятая объединенная международная криогенная инженерная конференция и международная конференция по криогенным материалам «ICMC 25 – ICMC 2014» (Нидерланды, г. Энсхеде, 2014 г.).
- Шестая международная конференция по ускорителям частиц

«IPAC-2015» (США, г. Ричмонд, 2015 г.).

- Двадцатая объединенная криогенная инженерная конференция и международная конференция по криогенным материалам «SEC/ICMC-2015» (США, г. Чикаго, 2015 г.).
- Конференция «SRF-2015» («Superconducting Radio Frequency-2015») (Канада, г. Вистлер, 2015 г.).
- Доклад-выступление в Национальной лаборатории физики элементарных частиц и ядерной физики «TRIUMF» (Канада, г. Ванкувер, 2015 г.).
- Двадцать шестая международная криогенная инженерная конференция и международная конференция по криогенным материалам «ICMC 26 – ICMC 2016» (Индия, г. Нью-Дели, 2016 г.).
- Доклады-выступления на кафедре «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н. Э. Баумана (Россия, г. Москва, 2016 г.).
- Симпозиум «Workshop on Cryogenic Operations-2016» (США, г. Чикаго, 2016 г.).

### **Достоверность результатов**

Достоверность данных, полученных в результате математического моделирования, подтверждается согласованностью результатов моделирования с экспериментальными данными. Представленная автором математическая модель криогенной системы базируется на фундаментальных законах и уравнениях термодинамики и динамики текущих сред. Достоверность полученных экспериментальных данных подтверждается использованием аттестованных измерительных средств и апробированных методик измерений, а также хорошей воспроизводимостью экспериментальных данных о работе криогенной системы линейного ускорителя проекта ARIEL в течение трех лет.

### **Личный вклад автора**

Автором диссертации проведен поисково-сравнительный обзор литературы, выполнена постановка проблемы исследования нестационарных процессов криогенных систем, разработана математическая модель криогенной системы для моделирования нестационарных режимов ее работы, разработан программный комплекс для обработки данных с приборов криогенной системы для автоматизированного определения экспериментальных характеристик ее элементов, проведено математическое моделирование работы данной криогенной системы на различных нестационарных режимах. Автором разработана методика оптимизационного анализа нестационарных процессов криогенных систем с использованием

инструмента математического моделирования и разработанного программного комплекса и произведена оптимизация нестационарных процессов стандартного охладителя/рефрижератора в составе криогенной системы ускорителя заряженных частиц. Эксплуатация исследуемого охладителя/рефрижератора производилась совместно с Д. С. Киши в Национальной Лаборатории Физики Элементарных Частиц и Ядерной Физики «TRIUMF». Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами в Национальной Лаборатории Физики Элементарных Частиц и Ядерной Физики «TRIUMF» и в Московском Государственном Техническом Университете им. Н. Э. Баумана, причем вклад докторанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

### **Публикации**

Материалы диссертации опубликованы в 4 научных статьях, 4 из которых в журналах, рекомендуемых ВАК РФ, 2 из которых в изданиях, индексируемых в международной цитатно-аналитической базе данных «Scopus», опубликованы тезисы 4 докладов.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, общих выводов, списка обозначений и сокращений, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации составляет 161 страницу, включая 52 рисунка и 10 таблиц. Список литературы включает 96 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** «Выбор метода исследования. Постановка задач и цели исследования» описаны основные факторы, приводящие к снижению эффективности современных криогенных систем, осуществлен выбор методов исследования, и поставлены цель и задачи научной работы.

Различный характер тепловой нагрузки при криостатировании сверхпроводников постоянного и переменного тока определяет различные требования к условиям их криостатирования. Большинство современных ускорителей заряженных частиц, использующих принцип радиочастотного ускорения, основаны на эллиптических ускоряющих структурах, работающих

на частоте 1,3 ГГц. Ряд преимуществ от использования сверхтекучего гелия для криостатирования данных ускоряющих структур определил температурный уровень криостатирования ниже 2,1 К, требующий наличия системы суб-атмосферной откачки паров гелия. Некоторые из современных проектов с использованием сверхпроводящих систем характеризуются нестационарным характером тепловой нагрузки в течение всего периода эксплуатации.

Стандартные коммерчески доступные гелиевые охладители/рефрижераторы являются основным элементом систем криогенного обеспечения крупных комплексов ускорителей заряженных частиц. Унификация охладителей/рефрижераторов, снижающая производственные затраты, отрицательно сказывается на эксплуатационных затратах систем криогенного обеспечения, особенно при высокой степени нестационарности рабочих режимов. Оптимизация работы гелиевых охладителей/рефрижераторов осуществляется производителями изолированно от объектов криостатирования, поэтому не может учитывать всех особенностей систем криогенного обеспечения.

Существующие практики разработки и оптимизации криогенных систем включают математическое моделирование рабочих процессов установившихся режимов без учета их нестационарности. Около четверти существующих гелиевых криогенных систем спроектированы с использованием «переразмеренных» охладителей/рефрижераторов (коэффициент запаса более 30 %) для криостатирования при пиковых тепловых нагрузках, что понижает эффективность при пониженной холодопроизводительности вне пиковых нагрузок. Режимы переменных охладительно-рефрижераторных тепловых нагрузок, характеризующие около 30 % существующих систем, также не являются номинальными с точки зрения производителей данных систем.

В опубликованных ранее работах исследования нестационарных рабочих процессов криогенных систем ограничены крупными установками сверхпроводящих комплексов. Вопросы адаптации стандартных коммерчески доступных охладителей/рефрижераторов в состав проектируемых систем с учетом нестационарности рабочих процессов не рассмотрены. Влияние стандартизации гелиевых охладителей/рефрижераторов на эффективность существующих систем криогенного обеспечения не изучалось.

Обзор используемых методов математического моделирования показал, что наиболее подходящим методом для моделирования криогенной системы с учетом нестационарности рабочих процессов является использование универсального математического пакета для моделирования химических систем «Hysys Dynamics». В опубликованных ранее работах моделирование криогенных систем с учетом нестационарности рабочих

процессов производилось как с использованием низкоуровневых и высокоуровневых языков программирования, так и специализированных средств для математического анализа. Применение универсального пакета для моделирования химических систем, позволяющего разработать методику оптимизации нестационарных процессов криогенных систем, имеет более широкую применимость с позиции использования результатов работы для оптимизационного анализа существующих и проектируемых систем.

**Во второй главе** «Описание экспериментальной установки» представлено описание экспериментальной криогенной системы, используемых первичных преобразователей, цепей управления и контроля автоматизированных процессов, разработанного программного комплекса для определения характеристик элементов криогенной системы в режиме реального времени, произведен анализ необходимости экспериментального определения ряда параметров элементов системы.

В качестве экспериментального стенда в рамках проводимого исследования использован гелиевый охладитель/рефрижератор «HELI AL LL» производства Air Liquide Advanced Technologies (Рисунок 1) в составе системы криогенного обеспечения линейного ускорителя заряженных частиц (Рисунок 3) проекта ARIEL (Национальная Лаборатория Физики Элементарных Частиц и Ядерной Физики «TRIUMF», Ванкувер, Канада). Данная установка имеет нижнюю температуру криостатирования 4,2 К, производительность 350 л/ч в охладителе и 850 Вт в рефрижераторном режимах. Комбинированная охладительно-рефрижераторная тепловая нагрузка гелиевого охладителя/рефрижератора обусловлена наличием ступеней окончательного дросселирования в составе криогенных модулей для получения жидкого гелия при температуре 2,0 К (Рисунок 2).

В рамках проводимого исследования было разработано программное обеспечение для определения характеристик элементов гелиевого охладителя/рефрижератора в режиме реального времени. В качестве первичных преобразователей давления использованы пьезорезистивные датчики давления, преобразователи температуры — платиновые термометры сопротивления номиналом 100 Ом и никель-манганиновые линейные датчики температуры. Выборка данных с первичных преобразователей производится системой автоматического управления гелиевым охладителем/рефрижератором и сохраняется для дальнейшей обработки. Экспериментальные данные автоматически обрабатываются вычислительным комплексом, разработанным в среде Python 3.

**В третьей главе** «Математическое моделирование нестационарных процессов» приведены основные уравнения для моделирования аппаратов и агрегатов криогенных систем, показана структурная схема математической модели гелиевого охладителя/рефрижератора, основано используемое



Рисунок 1. Внешний вид гелиевого охладителя/рефрижератора



Рисунок 2. Внешний вид объектов криостатирования – криогенных модулей

уравнение состояния гелия в форме Peng-Robinson-Stryjek-Vera (PRSV).

Для регулирующих вентилей и турбодетандеров криогенной системы показана необходимость экспериментального определения рабочих характеристик для их использования в составе математической модели. Определение расходных характеристик регулирующих вентилей (Рисунок 4), характеристики КПД турбодетандеров (Рисунок 5), характеристики степени реактивности турбодетандеров (Рисунок 6) и рабочих характеристик тормозных ступеней турбодетандеров (Рисунок 7) произведено с использованием разработанного программного комплекса.

Проверка точности и достоверности результатов, получаемых с использованием математической модели, произведена при помощи сравнения экспериментально полученных данных процесса захолаживания криогенной системы с результатами математического моделирования (Рисунок 8). Статистический анализ погрешности математической модели показал максимальную погрешность, не превышающую 10 % для данного процесса.

**В четвертой главе** «Оптимизация нестационарных процессов криогенной системы» представлены результаты проведенной оптимизации нестационарных процессов гелиевого охладителя/рефрижератора.

В поставленной задаче оптимизации процесса захолаживания критерием оптимизации выбрана минимизация целевой функции – полного времени захолаживания. Значение целевой функции определяется при помощи численного эксперимента с использованием разработанной математической модели. Оптимизация процесса захолаживания выполнена для установки значения давления в сборнике жидкого гелия (Рисунок 9) и для программы управления перепускным вентилем нижней ступени (Рисунок 10). Полезный эффект данных оптимизаций позволяет сократить процесс захолаживания более чем на два часа. Результаты проведенных оптимизаций согласуются с экспериментально полученными результатами с расхождением менее 10 %.

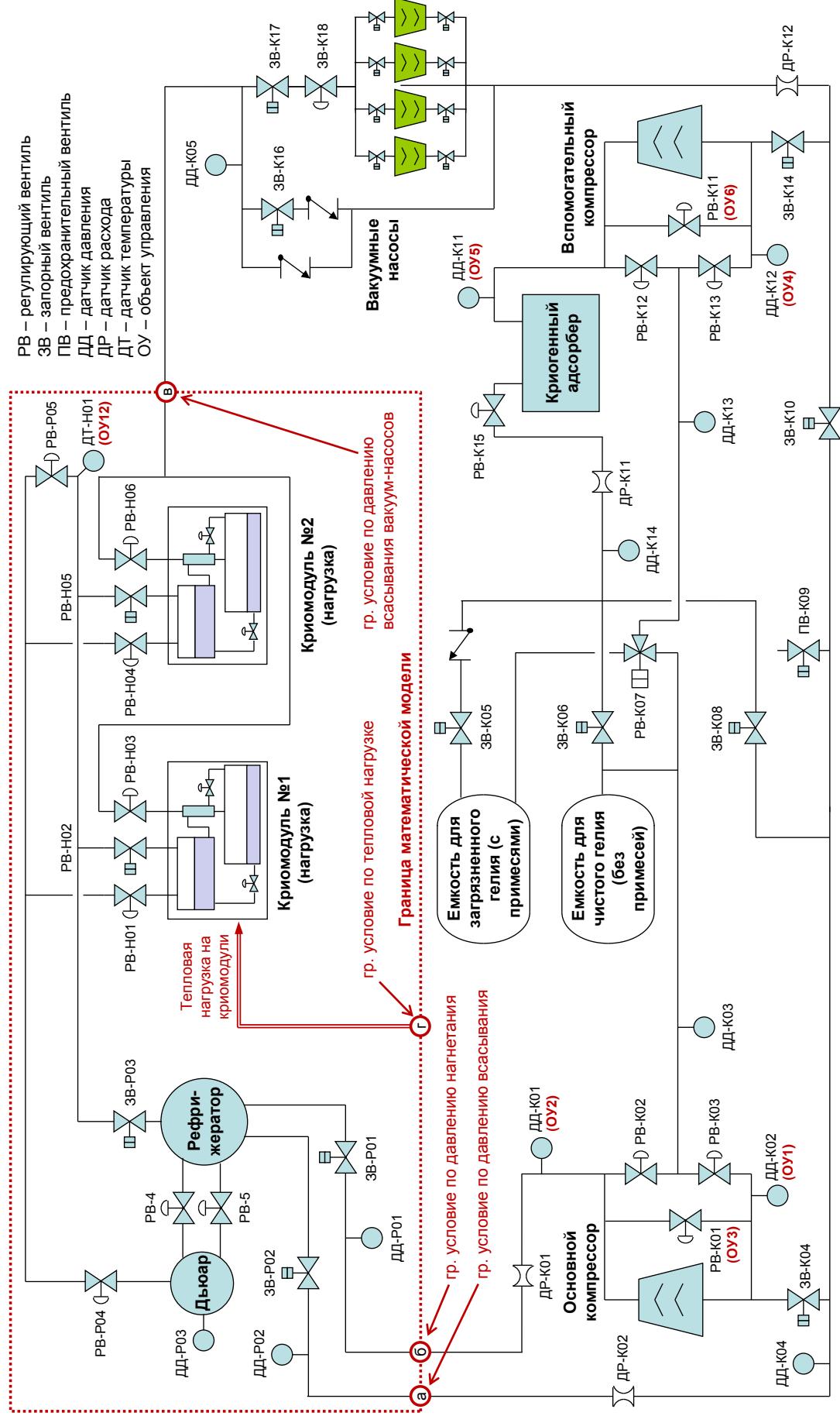


Рисунок 3. Принципиальная пневмо-гидравлическая схема криогенной системы проекта ARIEL и граничные условия математической модели

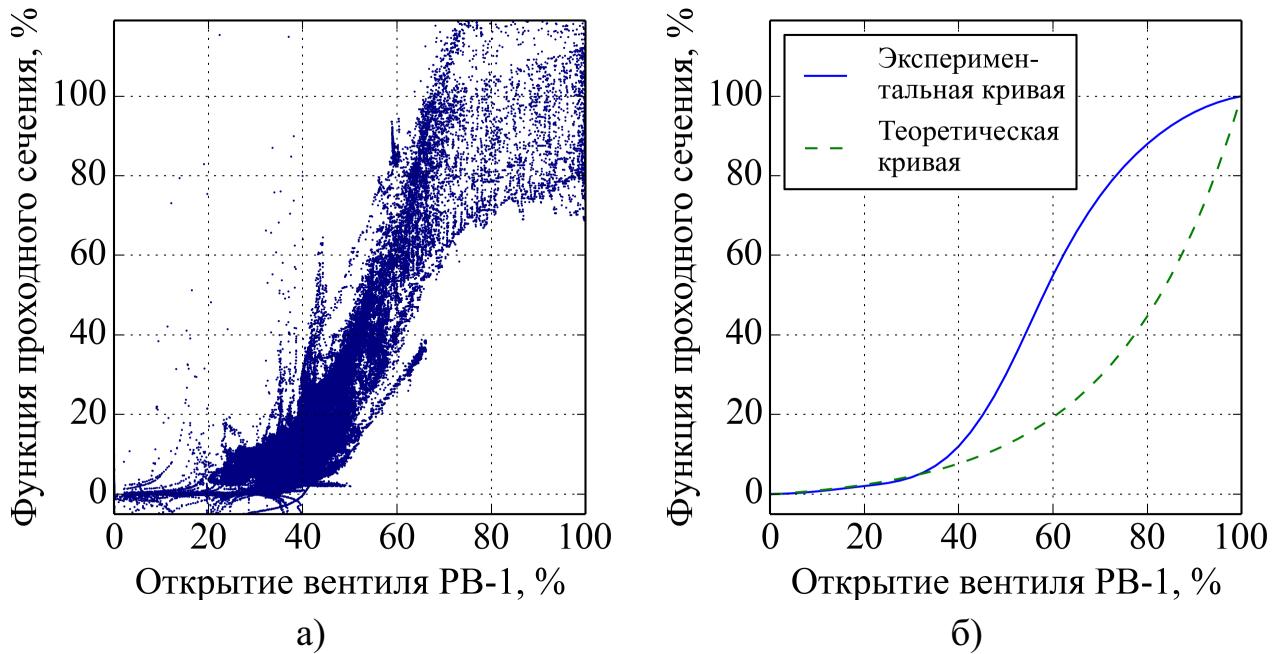
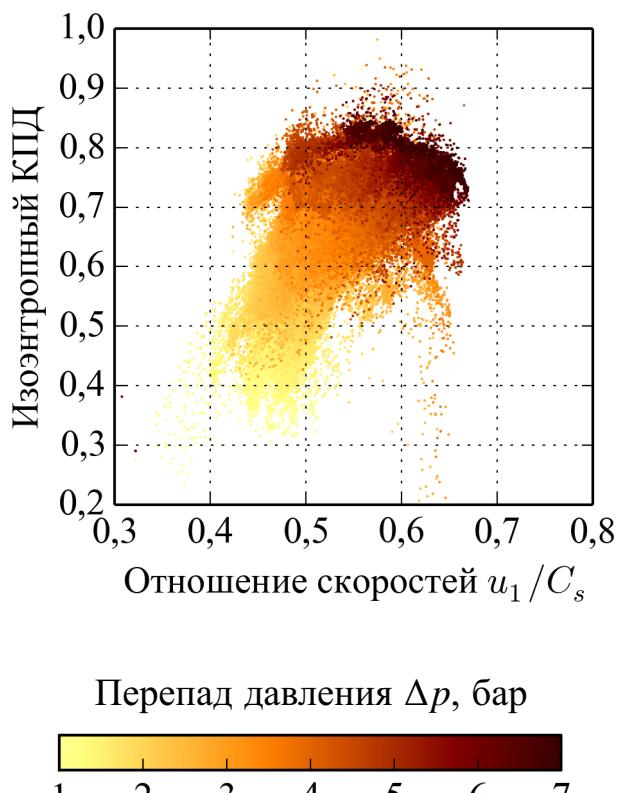


Рисунок 4. Экспериментальные данные зависимости открытия проходного сечения регулирующего вентиля РВ-1 от открытия вентиля (а) и сравнение полученных экспериментальной и теоретической характеристик (б)

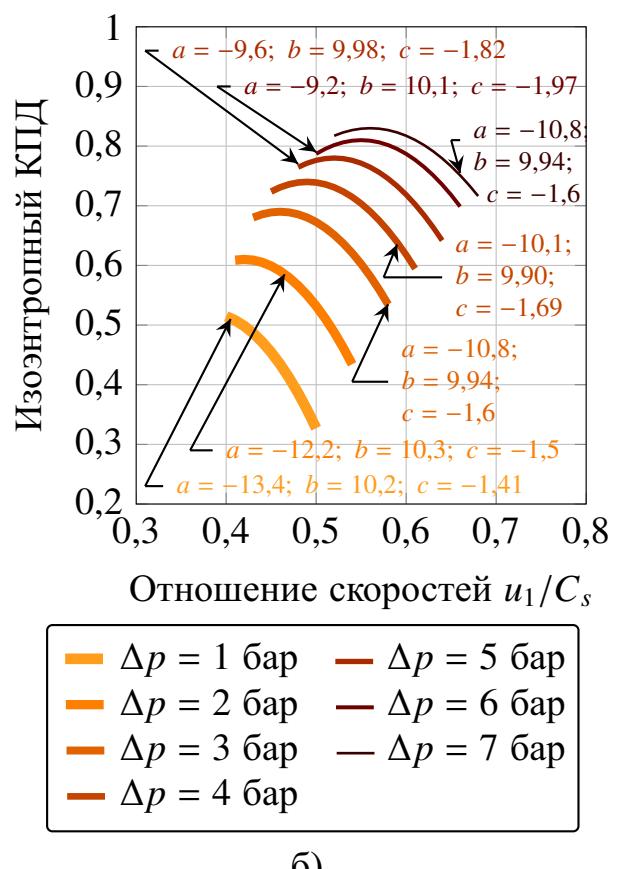
Исследование процесса управления холодопроизводительностью гелиевого охладителя/рефрижератора выполнено с целью понижения энергопотребления установки во время работы на режимах с пониженной тепловой нагрузкой. Предложенная к использованию модель управления холодопроизводительностью на базе цикла с плавающим давлением нагнетания проверена на реализуемость с использованием разработанной математической модели (Рисунок 11).

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Исследованы методы построения математических моделей криогенных систем с учетом нестационарности рабочих процессов.
2. Доказана применимость метода масштабирования параметров элементов криогенной системы при моделировании нестационарных процессов для упрощения математической модели без потери точности результатов моделирования.
3. Разработана математическая модель криогенной системы, произведена поверка ее корректности в рамках нестационарного рабочего процесса. Модель позволяет производить симуляцию различных режимов работы криогенной системы (в т. ч. нештатных) без остановки ускорителя заряженных частиц.



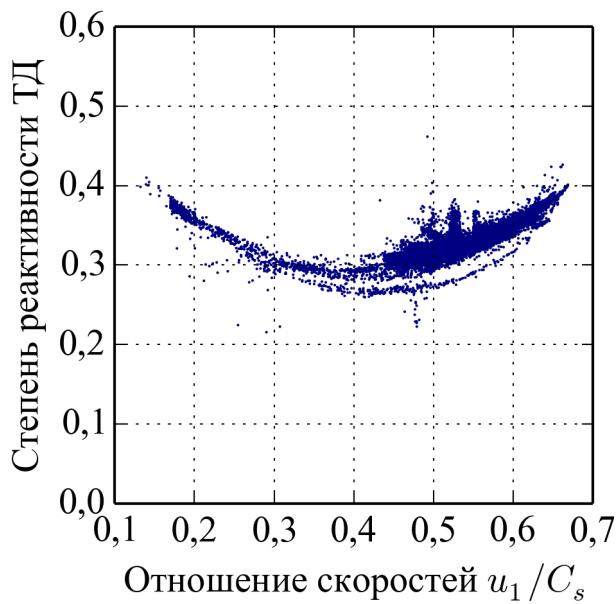
а)



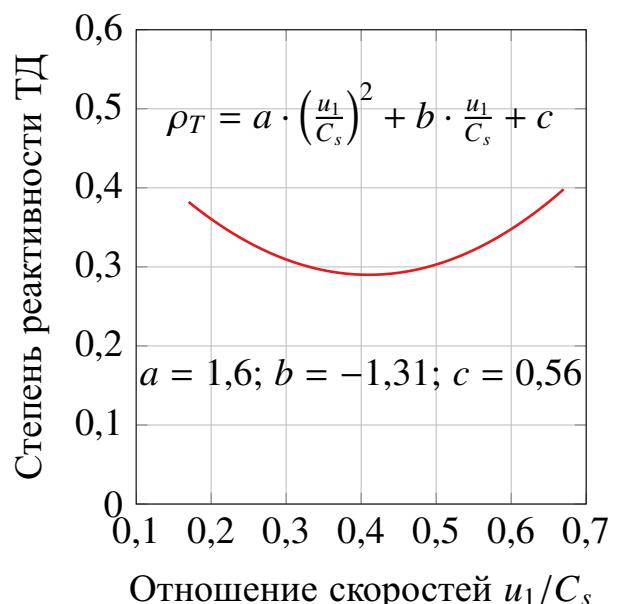
б)

Рисунок 5. Экспериментально определенные данные в координатах ( $u_1/C_s$ ,  $\eta_s$ ) первого турбодетандера (а) и аппроксимирующий набор кривых для различных перепадов давления (б)

4. Исследована эффективность методов оптимизации процесса захолаживания гелиевого охладителя/рефрижератора для программы управления перепускным вентилем нижней ступени и программы управления давлением в сборнике жидкого гелия. Данные математической модели хорошо согласуются с экспериментально полученными результатами с расхождением результатов менее 10 %.
5. Исследована возможность введения новой цепи управления давлением нагнетания для регулирования холодопроизводительностью криогенной системы. При использовании данного метода регулирования обеспечивается более экономичная работа установки на режимах работы с пониженной тепловой нагрузкой. Показана возможность настройки данной цепи управления с использованием регулирующего вентиля детандерного потока в качестве объекта управления.
6. Доказана необходимость экспериментального определения характеристик турбодетандеров для математического моделирования криогенной системы с учетом нестационарности рабочих процессов.
7. Разработан автоматизированный программный комплекс для



а)



б)

Рисунок 6. Экспериментальные данные зависимости степени реактивности первого турбодетандера от приведенной окружной скорости  $u_1/C_s$  (а) и аппроксимирующая кривая данной зависимости (б)

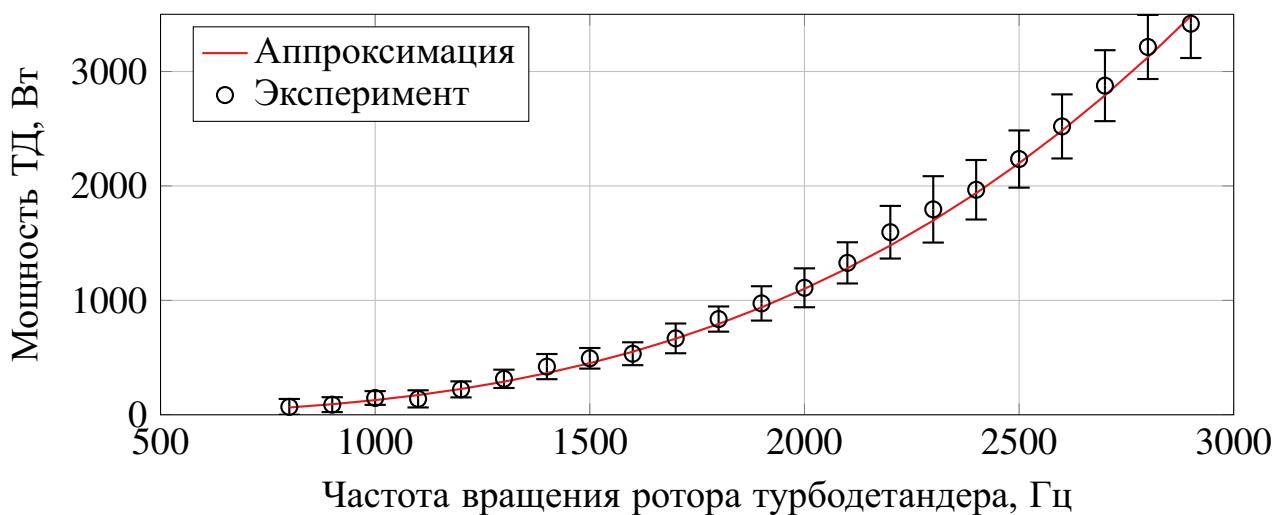


Рисунок 7. Экспериментально полученная зависимость холодопроизводительности первой ступени турбодетандера от скорости и соответствующая аппроксимирующая кривая

регистрации и обработки экспериментальной информации с использованием стандартизированной системы управления гелиевым охлаждителем. Данный программный комплекс позволяет значительно упростить экспериментальное определение характеристик различных элементов гелиевых охлаждителей, сокращая затраты на построение математических моделей.

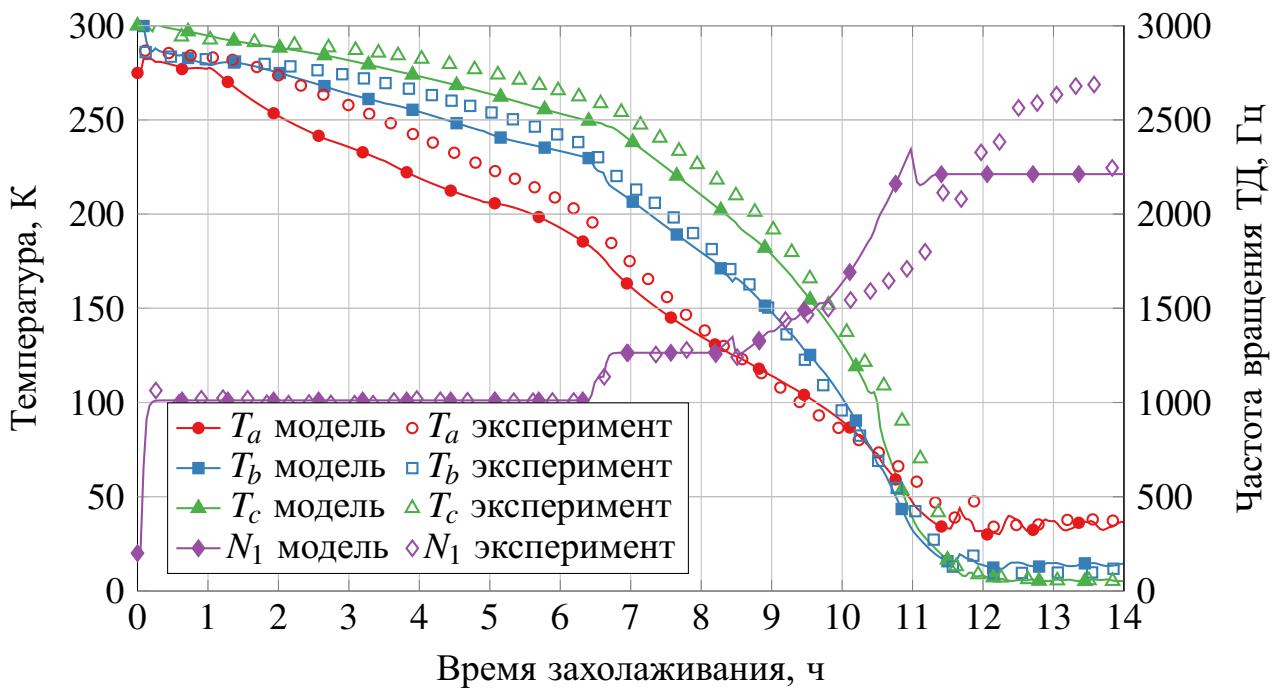


Рисунок 8. Сравнительные графики захолаживания криогенной системы и результатов моделирования

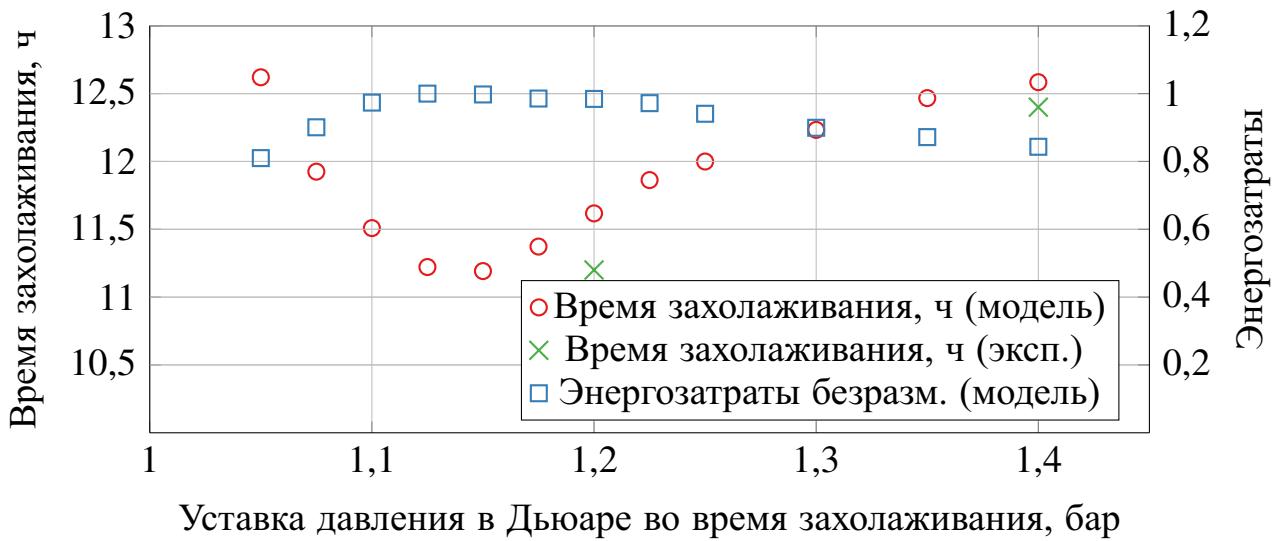


Рисунок 9. Зависимость общего времени захолаживания от уставки давления в сборнике жидкого гелия

8. На основе полученных экспериментальных, расчетных данных и их анализа сформирована методика построения рациональных гелиевых криогенных систем с использованием оптимизационного анализа нестационарных процессов, базирующая на следующих положениях:
  - Использовать более дешевые и простые в производстве стандартные гелиевые криогенные системы в качестве источника



Рисунок 10. Зависимость общего времени захолаживания от уставки начала регулирования перепускного вентиля PB-2

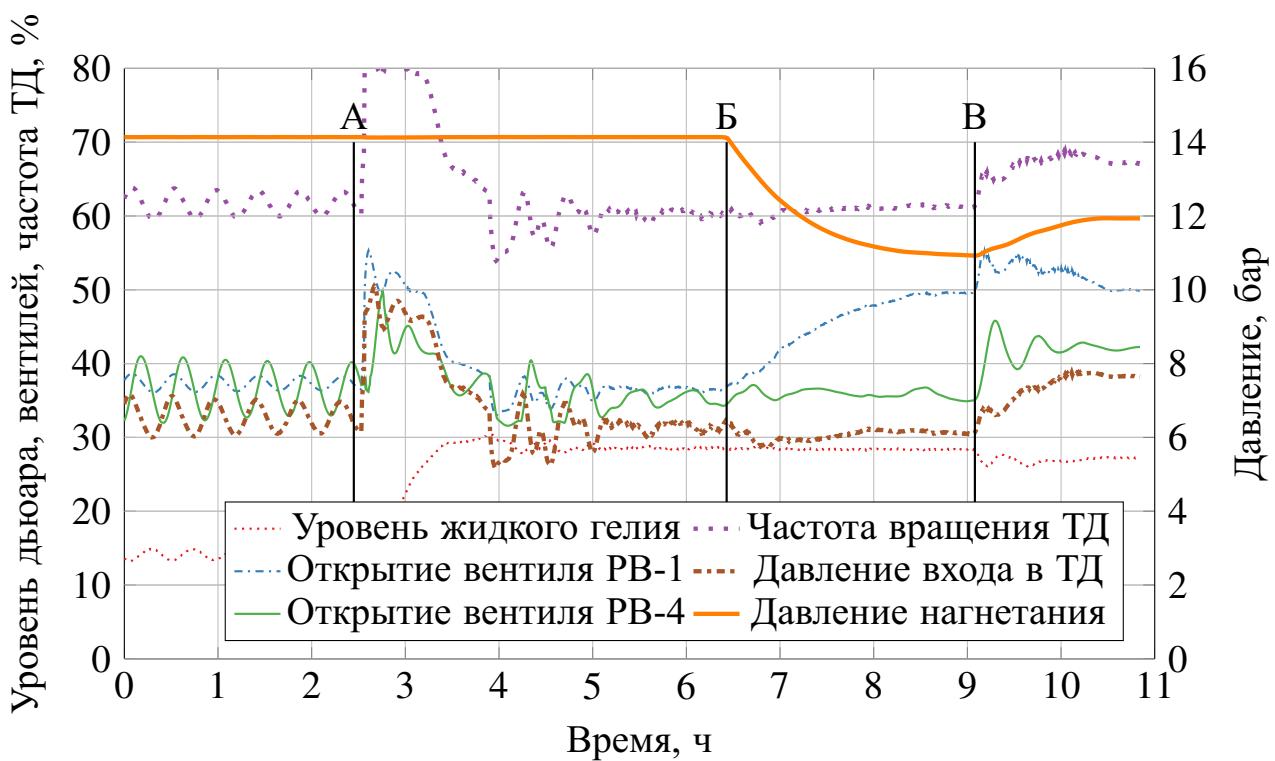


Рисунок 11. Регулирование холодопроизводительности гелиевого охладителя/рефрижератора методом изменения давления нагнетания (А: изменение уставки уровня жидкого гелия, Б: начало регулирования давлением нагнетания, В: повышение тепловой нагрузки)

холода для сверхпроводящих установок с системами контроля на базе универсальных программируемых логических контроллеров.

- Для ускорения процесса захолаживания осуществлять оптимизацию давления в сборнике жидкого гелия. Производить

оптимизацию прочих нестационарных процессов с использованием математических моделей для повышения энергетической эффективности работы гелиевых криогенных систем.

- Предусматривать возможность расширения стандартной системы сжатия и хранения гелия для использования внешней уставки давления в цепи управления давлением нагнетания.
- Производить моделирование совместной работы системы криогенного обеспечения и потребителя холода с учетом нестационарности рабочих процессов для определения потребной холодопроизводительности с учетом пиковых нагрузок и в качестве предварительного этапа пусконаладочных работ.

Результаты математического и экспериментального исследования могут быть использованы в научно-исследовательских лабораториях и производственных центрах, занимающихся разработкой и производством гелиевых криогенных систем: НПО Гелиймаш (г. Москва), ПАО Криогенмаш (г. Балашиха), Air Liquide Advanced Technologies (Сассенаж, Франция), Linde Kryotechnik AG (Пфунген, Швейцария), Air Products (г. Аллентаун, США), Praxair (г. Данбери, США), а также производителями современных программно-аппаратных комплексов для управления техническими системами: Siemens AG (г. Берлин, Германия), Schneider Electric (Рюэй-Мальмезон, Франция), Rockwell Automation (г. Милуоки, США), ООО ОВЕН (г. Москва).

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. К вопросу оптимизации затрат при проектировании современных криогенных комплексов крупных сверхпроводниковых систем / Р. Р. Нагимов [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2015. № 1. С. 19–22 (0,40 п. л. / 0,22 п. л.).
2. Нагимов Р. Р., Архаров И. А., Навасардян Е. С. Задачи и развитие методов динамического моделирования криогенных систем // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2016. № 7. С. 24–27 (0,51 п. л. / 0,35 п. л.).
3. Integration and Commissioning of the ARIEL e-Linac Cryogenic System at TRIUMF / R. Nagimov [et al.] // Physics Procedia. 2015. Vol. 67. P. 857–862 (0,37 п. п. / 0,25 п. п.).
4. ARIEL E-linac Cryogenic System: Commissioning and First Operational Experience / R. Nagimov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 101, no. 1. P. 1–8 (0,45 п. п. / 0,2 п. п.).