

На правах рукописи



Зар Ни Ньейн

**ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ  
ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПА  
ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА  
ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

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

Комсомольск-на-Амуре - 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» на кафедре «Электромеханика»

**Научный руководитель:** Сериков Александр Владимирович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электромеханика» ФГБОУ ВО «КНАГУ».

**Официальные оппоненты:** Ким Константин Константинович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС)

Хлюпин Павел Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (ФГБОУ ВО «УГНТУ»)

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет» (ОмГТУ), г. Омск

Защита диссертации состоится «28» декабря 2020 г. в 12-00 часов на заседании диссертационного совета Д 999.086.03 в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, ауд. 201-3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» и на официальном сайте [https://sovet.knastu.ru/diss\\_defense/show/115](https://sovet.knastu.ru/diss_defense/show/115). Отзыв на автореферат присылать в двух экземплярах, заверенных печатью организации по адресу: Россия, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, ученому секретарю диссертационного совета Д 999.086.03, e-mail: [etf@knastu.ru](mailto:etf@knastu.ru).

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 999.086.03  
кандидат технических наук, доцент

 А.С. Гудим

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время на нужды теплоснабжения в России расходуется более 30 % всего добываемого топлива. Вследствие нарастающей изношенности оборудования, около 50 % объектов теплоснабжения и инженерных сетей требует ремонта или замены, при этом потери теплоты в отдельных сетях достигают 30 %. Кроме этого, в условиях резко меняющихся погодных условий централизованные системы не позволяют быстро реагировать на эти изменения, что приводит к нарушению теплового режима помещений. В сложившихся условиях системы теплоснабжения и методы регулирования отпуска теплоты зачастую не обеспечивают потребителей, особенно удаленных от источников тепловой энергии, необходимым количеством тепла.

В условиях децентрализованного теплоснабжения с источниками энергии на твердом, жидком и газообразном топливе требуются большие затраты на приобретение, доставку и хранение топлива, кроме этого, имеются определенные сложности с безопасностью, экологичностью и автоматизацией процесса получения и распределения тепловой энергии. Для обеспечения требований энергосбережения и энергоэффективности перспективным является применение локальных источников теплоснабжения различных объектов на базе электротехнического комплекса, который позволяет легко автоматизировать процесс теплообеспечения с учетом индивидуальных требований потребителей.

Широко используемые в таких комплексах электронагревательные элементы трубчатого типа (ТЭН) имеют ряд существенных недостатков (небольшой срок службы, низкая надежность, низкий класс электробезопасности, ограниченная мощность). Устранить перечисленные недостатки позволяют электронагревательные элементы трансформаторного типа, конструкция которых имеет много общего с конструкцией силовых трансформаторов. Принципиальным отличием является наличие вторичной замкнутой обмотки, которая одновременно является нагрузкой и тепловыделяющим элементом. Такие электронагревательные элементы имеют более высокие пороговые значения мощности.

Диссертационная работа посвящена разработке электронагревательного элемента трансформаторного типа (ЭНЭТТ) и исследованию особенностей его работы в составе электротехнического комплекса децентрализованного теплоснабжения с целью получения рекомендаций по энергосберегающим режимам.

Работа выполнялась в рамках приоритетного направления развития науки, технологий и техники в Российской Федерации – критическая технология согласно перечню (Указ Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 года № 899): Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная

энергетика; Технология создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии.

**Степень проработанности темы исследования.** Диссертационная работа выполнена с учетом ранее полученных результатов учеными в области разработки и исследования новых электронагревательных элементов и устройств, а также в области децентрализованных систем энергообеспечения. В работах ученых В.М. Кузьмина, А.И. Елшина, В.М. Казанского, А.В. Серикова, А.В. Пяталова, В.А. Размыслова, В.П. Романюка, А.В. Янченко, Т.В. Герасименко, А.А. Вакулюк, В.И. Костюченко, В.А. Карпенко, С.Л. Собина и других показаны результаты исследований в области создания новых конструкций электронагревательных элементов трансформаторного типа, электромагнитных и тепловых процессов, затронуты вопросы управления и проектирования таких устройств и их использования в различных системах электронагрева. Перспективные пути развития теплогенерирующих комплексов с использованием принципов построения нагревательных элементов с короткозамкнутыми обмотками обоснованы в исследованиях и работах ученых С.Н. Иванова, К.К. Кима и др. Результаты известных работ хорошо согласуются с практической реализацией. При использовании ЭНЭТТ в системах децентрализованного теплоснабжения появляются перспективные пути энергосбережения за счет использования новых способов управления и оптимальных температурных режимов при теплообеспечении автономных объектов. На наш взгляд, вопросам совместной работы теплогенерирующего оборудования, основой которого является ЭНЭТТ, и теплопотребляющего оборудования с возможностью как автоматического, так и ручного регулирования теплоснабжением уделено недостаточно внимания. Кроме того, взаимное влияние электромагнитных, гидравлических и тепловых процессов, как на ЭНЭТТ, так и на теплообменное оборудование мало изучены, что не позволяет дать рекомендации по наиболее целесообразным режимам работы теплогенерирующего оборудования и всего комплекса в целом. Поэтому настоящие исследования с целью получения рекомендаций по энергосберегающим режимам и режимам, обеспечивающим высокие показатели надежности и долговечности электрооборудования в электротехнических комплексах децентрализованного теплообеспечения, являются актуальными.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования является электротехническое оборудование систем энергообеспечения бытовых, промышленных и сельскохозяйственных потребителей тепловой энергии. Предметом исследования являются электромагнитные, тепловые и гидравлические процессы в электротехническом комплексе децентрализованного теплоснабжения.

**Цели и задачи.** Целью работы является разработка ЭНЭТТ для электротехнического комплекса децентрализованного теплоснабжения.

Для достижения поставленной цели в работе определены и решены следующие задачи:

- сформировать структуру электротехнического комплекса децентрализованного теплоснабжения;
- разработать конструкцию ЭНЭТТ, обеспечивающую безопасность и надежность теплогенерирующего оборудования комплекса децентрализованного теплоснабжения;
- разработать математические и компьютерные модели электромагнитных и тепловых процессов, протекающих в ЭНЭТТ;
- выявить взаимосвязь между электромагнитными, тепловыми и гидравлическими процессами в электротехническом комплексе;
- создать рекомендации по проектированию теплогенерирующего электрооборудования и по энергоэффективным режимам работы электротехнического комплекса децентрализованного теплоснабжения.

**Научная новизна.** В результате выполнения исследований получены следующие новые научные результаты:

- с помощью разработанной математической модели растекания электрического тока во вторичной обмотке ЭНЭТТ, получена зависимость электрического сопротивления проводника сложной формы от его геометрических размеров и размерных соотношений;
- выявлено влияние геометрических соотношений, обмоточных данных и частоты питающего напряжения на массогабаритные и стоимостные показатели ЭНЭТТ с пространственной магнитной системой призматической формы;
- выявлено взаимное влияние тепловых и гидравлических процессов в ЭНЭТТ с пространственной магнитной системой призматической конструкции и вторичной обмоткой в виде корпуса с переключками, которое позволило обосновать допустимые режимы работы теплогенерирующего электрооборудования с учетом его конструктивных особенностей;
- на основе анализа тепловых и гидравлических процессов, получены новые данные по влиянию тепловой нагрузки на энергосберегающие режимы работы электротехнического комплекса децентрализованного теплоснабжения.

**Практическая значимость результатов работы.** В результате выполнения исследований получены результаты, имеющие практическую значимость:

- разработана новая конструкция трехфазного ЭНЭТТ с пространственной магнитной системой призматической формы, которая позволяет использовать ЭНЭТТ в проточных и емкостных нагревательных блоках, а также работать с переменным расходом теплоносителя;
- разработана методика электромагнитного расчета ЭНЭТТ с учетом особенностей электромагнитных и тепловых процессов;

– получены практические рекомендации по проектированию ЭНЭТТ минимальной стоимости;

– получены рекомендации по энергосберегающим режимам работы электротехнического комплекса децентрализованного теплоснабжения.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Новая конструкция ЭНЭТТ, позволяющая обеспечить безопасность и надежность теплогенерирующего оборудования электротехнического комплекса децентрализованного теплоснабжения.

2. Математическая модель трехмерного температурного поля ЭНЭТТ, учитывающая режимы работы нагревательного блока.

3. Методика электромагнитного расчета с учетом неравномерного распределения тока во вторичной обмотке ЭНЭТТ.

4. Рекомендации по проектированию ЭНЭТТ минимальной стоимости.

5. Рекомендации по энергосберегающим режимам работы электротехнического комплекса децентрализованного теплоснабжения.

**Апробация результатов исследования.** Основные положения и результаты исследования докладывались и обсуждались:

– на 46-й и 47-й научно-технической конференции студентов и аспирантов, ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2016 и 2017 год;

– на 14-й международной научно-практической конференции по проблемам экологии и безопасности «Дальневосточная весна – 2016», ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2016 год;

– в рамках IV российской молодежной научной школы-конференции «Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи», г. Томск, ТПУ, 2016 год;

– на международной научно-практической конференции «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению», ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2017 и 2018 год;

– на Международной мультидисциплинарной конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon-2018», г. Владивосток, 2018 год.

**Степень достоверности результатов:** подтверждается как использованием апробированных теоретических положений и математического аппарата, так и согласованными результатами вычислительных и физических экспериментов, испытаниями опытных образцов.

**Личный вклад автора.** Личный вклад автора непосредственно связан с разработкой и реализацией на ЭВМ математических моделей трехмерного температурного поля, распределения электрического потенциала в проводнике сложной формы, описании тепловых и гидравлических процессов в электротехническом комплексе децентрализованного теплоснабжения, проведении вычислительного эксперимента для получения вариан-

та ЭНЭТТ минимальной стоимости. Так же автор принимал активное участие в обработке результатов исследований, их анализе и получении рекомендаций и выводов.

**Структура и объем работы.** Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит 127 страниц машинописного текста, 2 приложения и список литературы из 116 наименований.

**Публикации по теме диссертации.** Основные положения и результаты выполненных исследований отражены в 11 публикациях, из них 2 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 проиндексированы в базах Web of Science и Scopus, получено свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, дана общая характеристика научной проблемы, поставлены цель и задачи, показаны научная новизна и практическая значимость работы, апробация выполненных исследований, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведен анализ существующих систем теплоснабжения, выявлены их основные недостатки и приведены пути повышения энергоэффективности теплоснабжения.

Для обеспечения требований энергосбережения и энергоэффективности перспективным является применение локальных источников теплоснабжения различных объектов на основе электротехнического комплекса получения и распределения тепловой энергии. Такой комплекс (рисунок 1) включает в себя: коммутатор, теплогенератор (ТГ), систему аккумуляции тепла (САТ), систему теплообмена (СТО), систему управления нагревом и микроклиматом помещений (СУН), датчики сбора необходимой информации для системы управления, исполнительные устройства для обеспечения циркуляции и распределения теплоносителя (ИУЦРТ). Питание электротехнический комплекс может получать из централизованной сети электропитания предприятий и бытовых потребителей, либо от децентрализованных источников энергии (ветрогенератор, микроГЭС, солнечные батареи и т.п.).

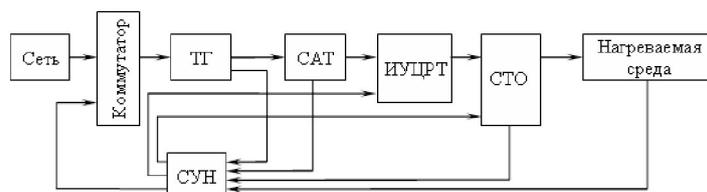


Рисунок 1 – Электротехнический комплекс децентрализованного теплоснабжения

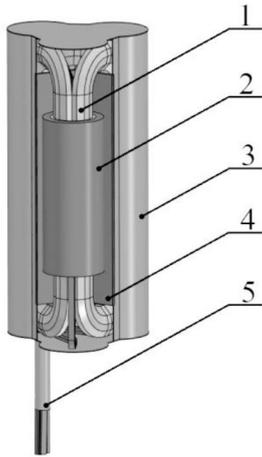


Рисунок 2 – Электронагревательный элемент

В качестве электронагревательного элемента перспективно использовать трансформатор с вторичной обмоткой, выполненной в виде короткозамкнутого витка. Исследуемый ЭНЭТТ (рисунок 2) состоит из трехфазного магнитопровода пространственной конструкции 1. Первичная обмотка 2 размещена на стержнях магнитопровода. Вторичная обмотка состоит из корпусной оболочки 3 и звездобразной перемычки 4. Концы проводов первичной обмотки для подключения к источнику электрической энергии выведены через трубку 5.

Во второй главе рассмотрены вопросы совершенствования ЭНЭТТ с учетом взаимного влияния разнородных процессов. Приведена методика электромагнитного расчета ЭНЭТТ, учитывающая особенности его конструкции и режимов работы, проанализированы факторы, влияющие на стоимость ЭНЭТТ, и даны рекомендации по проектированию исследуемого устройства минимальной стоимости.

Алгоритм электромагнитного расчета (рисунок 3) состоит из блока ввода исходных данных, блока определения основных электрических величин, блоков расчета первичной и вторичной обмоток, расчета магнитной системы, теплового расчета и расчета массогабаритных и стоимостных показателей.

Основные размеры электронагревательного элемента связаны геометрическим коэффициентом  $\beta$ , который определяется как отношение средней длины витка первичной обмотки к ее высоте  $l_1$

$$\beta = \pi \frac{D_{1В} + D_{1Н}}{2l_1},$$

где  $D_{1В}$ ,  $D_{1Н}$  – внутренний и наружный диаметры первичной обмотки.

При расчете вторичной обмотки, необходимо учесть степень неравномерности распределения тока по высоте листа корпуса, которая приводит к уменьшению электрического сопротивления  $R_k$

$$R_k = k_R R_{кб},$$

где  $k_R$  – коэффициент, учитывающий уменьшение электрического сопротивления при растекании тока по высоте корпуса;  $R_{кб}$  – базовое значение сопротивления прямоугольного участка корпуса, расположенного между перемычками, без учета растекания тока.

Сопротивление  $R_k$  определялось в результате моделирование электрического поля для элемента вторичной обмотки по величине тока  $I$ , протекающего между линиями  $abcd$  и  $efgh$  (рисунок 4, а).

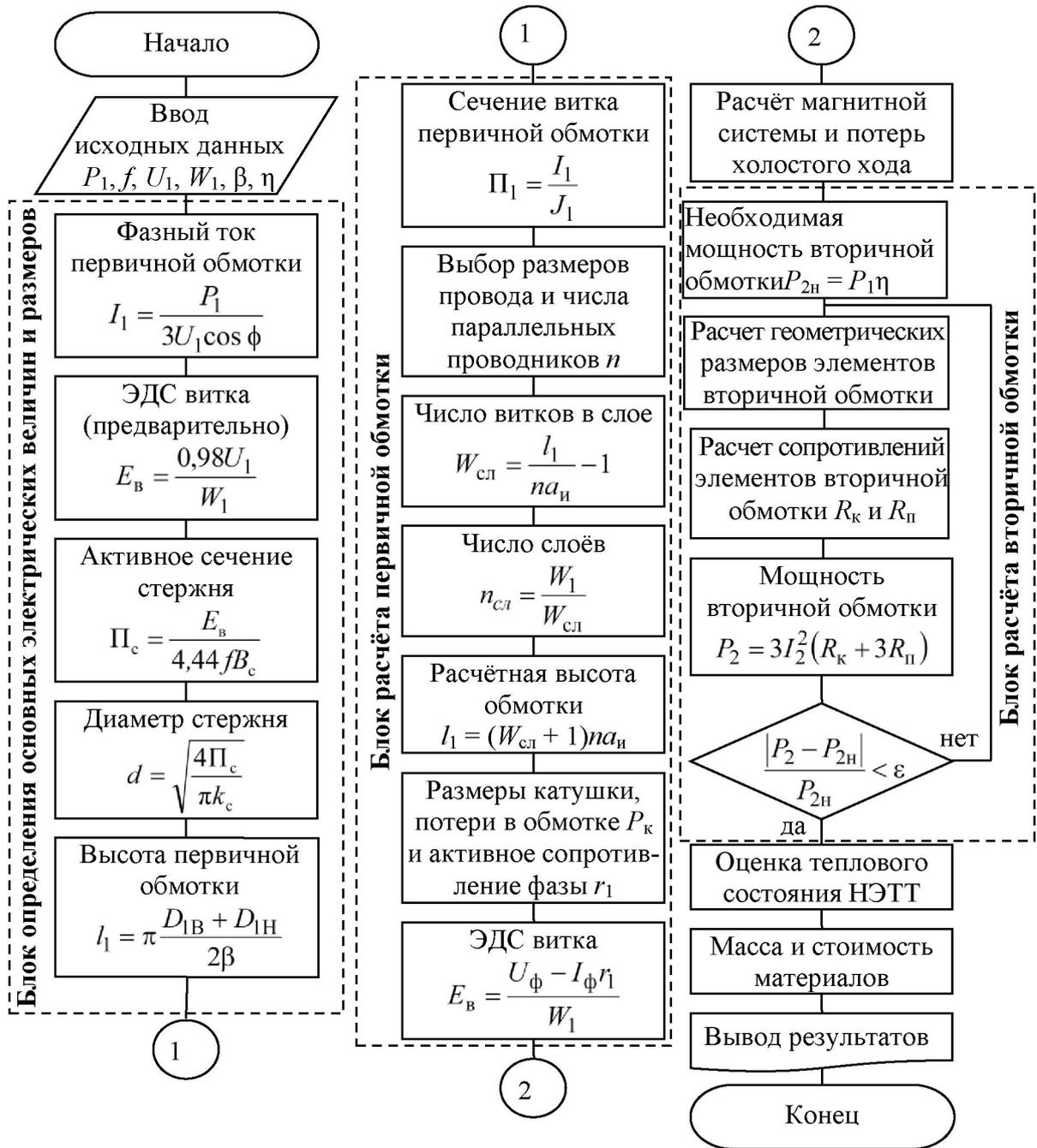


Рисунок 3– Алгоритм электромагнитного расчёта ЭНЭТТ

Электрическое поле в области исследования относительно электрического потенциала  $U$  описывается двумерным уравнением в прямоугольной системе координат  $x, y$ :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \gamma \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \gamma \frac{\partial U}{\partial y} \right) = 0,$$

где  $\gamma$ – удельная электрическая проводимость материала.

На линии  $abcd$  справедливы граничные условия первого рода  $U = U_0 = 1$ , а на линии  $efgh$  –  $U = 0$ . На остальных границах области справедливы граничные условия второго рода  $\partial U / \partial n = 0$ , где  $n$  – нормальная составляющая к поверхности.

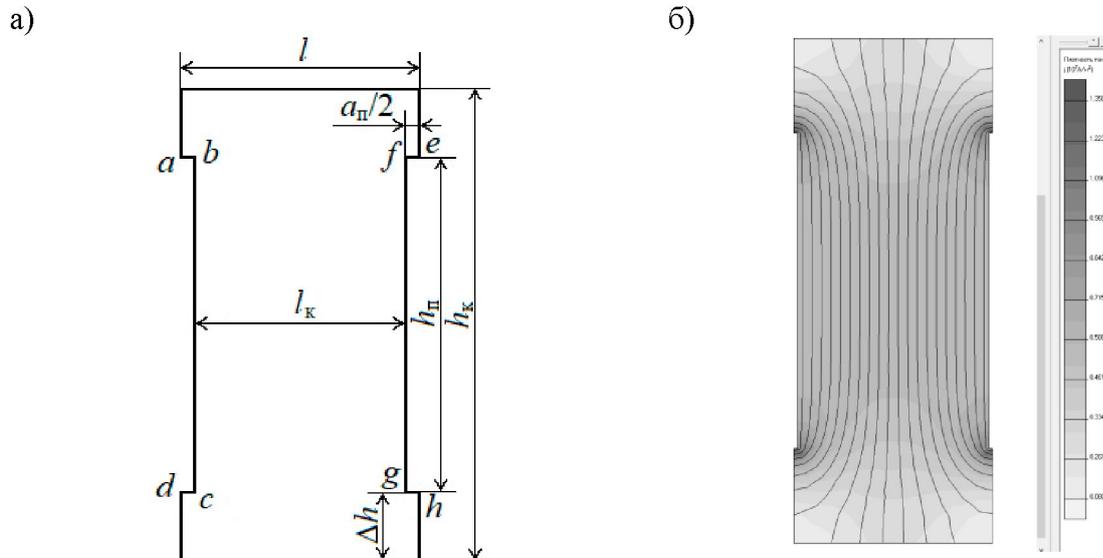


Рисунок 4 – Область исследования (а) и результаты моделирования (б)

В результате моделирования с помощью программы ELCUT получено распределение электрического потенциала (рисунок 4, б). Активное электрическое сопротивление  $R_k$  определялось по формуле

$$R_k = \frac{U_0}{I \Delta_k},$$

где  $\Delta_k$  – толщина материала.

Коэффициент уменьшения активного сопротивления

$$k_R = \frac{R_k}{R_{кб}} = \frac{R_k \gamma h_{п} \Delta_k}{l_k},$$

где  $h_{п}$ ,  $l_k$  – геометрические размеры области исследования.

Выявлено, что на коэффициент  $k_R$  оказывают сильное влияние размеры  $h_{п}$ ,  $l_k$  и  $\Delta h$  (рисунок 5). Целесообразно коэффициент  $k_R$  выразить не через линейные размеры проводника  $h_{п}$  и  $l_k$ , а через их отношение  $h_{п} / l_k$ . Для удобства расчета активного электрического сопротивления элемента вторичной обмотки получена зависимость (рисунок б), которая аппроксимируется выражением

$$k_R = 0,98 \left( 1 - 0,54 e^{-1,13 \frac{h_{п}}{l_k}} \right).$$

В диапазоне наиболее часто встречающихся соотношений  $h_{п} / l_k$  от 0,7 до 3 погрешность при расчете по аппроксимирующему выражению не

превышает 3 % от результатов расчета  $k_R$  с помощью моделирования электрического поля.

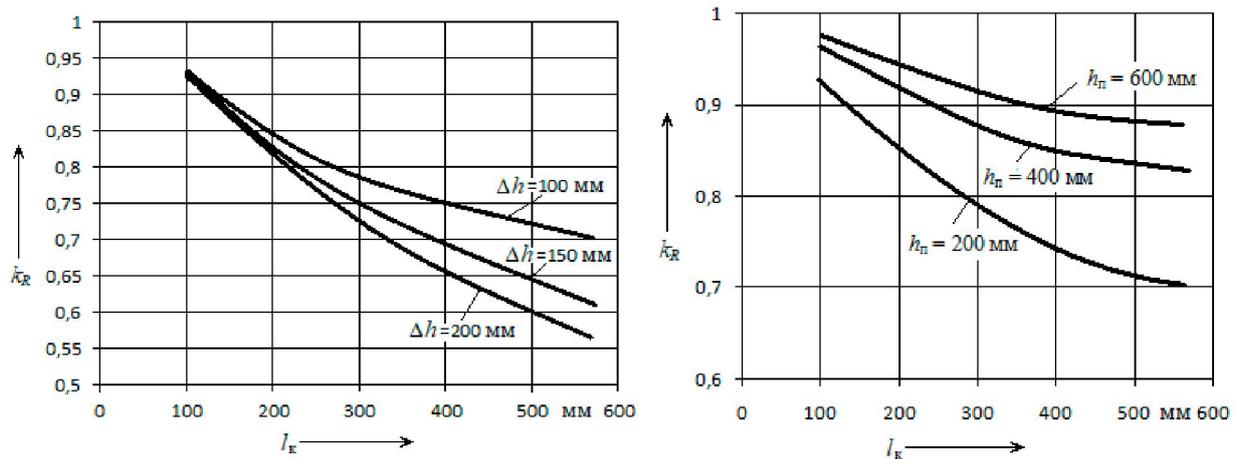


Рисунок 5 – Зависимости коэффициента  $k_R$  от геометрических размеров

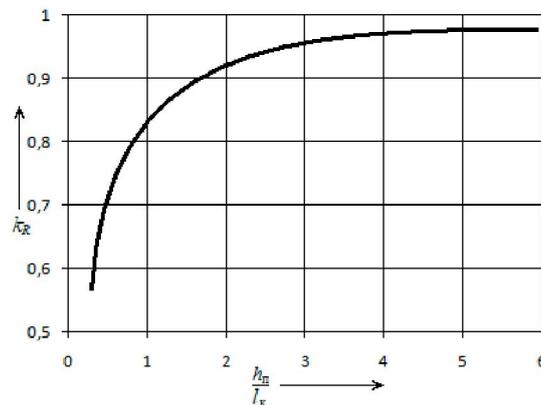


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента  $k_R$  от соотношения  $h_{\pi} / l_k$

На массогабаритные и стоимостные показатели ЭНЭТТ значительное влияние оказывают количество витков в первичной обмотке  $W_1$ , значение геометрического коэффициента  $\beta$  и частота питающей сети  $f$ . Исследования показали, что  $W_1$ ,  $f$  и  $\beta$  оказывают также существенное влияние на толщину листа вторичной обмотки  $\delta_2$  и на удельную поверхностную мощность тепловыделений  $W_{\pi}$ . Причем  $\delta_2$  по технологическим и механическим ограничениям не может быть менее 1 мм, а значение  $W_{\pi}$  по условиям образования накипи не должна превышать величину 10 Вт/см<sup>2</sup>.

Решение многокритериальной задачи по поиску варианта с наименьшей стоимостью активных материалов  $C_{ам}$  ЭНЭТТ осуществлялось с помощью метода планирования эксперимента, который позволил установить связь между функциями цели ( $C_{ам}$ ,  $W_{\pi}$  и  $\delta_2$ ) и факторами варьирования ( $W_1$ ,  $f_1$  и  $\beta$ ) за минимальное количество вариантов проведенных расчетов. Расчеты проводились в соответствии с ортогональным центральным композиционным планом второго порядка. Электромагнитные

нагрузки при расчетах определялись по критерию допустимого нагрева активных материалов электронагревательного элемента и в многофакторном эксперименте не изменялись. В результате обработки расчетных данных получены полиномиальные зависимости целевых функций для ЭНЭТТ мощностью 25 кВт. Полученные выражения имеют следующий вид

$$\begin{aligned}
 C_{\text{ам}} &= 9,073 + 0,411\beta + 0,887W_1 - 3,959f + 0,693\beta W_1 + \\
 &+ 0,456\beta f + 0,411W_1 f - 0,138\beta^2 + 0,182W_1^2 + 2,2f^2; \\
 W_{\text{п}} &= 10,41 + 1,714\beta + 0,389W_1 + 3,039f - 0,057\beta W_1 + \\
 &+ 0,268\beta f - 0,119W_1 f + 0,119\beta^2 - 0,191W_1^2 - 0,761f^2; \\
 \delta_2 &= 1,286 + 0,388\beta + 0,479W_1 + 0,071f + 0,159\beta W_1 + \\
 &+ 0,027\beta f + 0,039W_1 f - 0,004\beta^2 + 0,068W_1^2 - 0,004f^2.
 \end{aligned}$$

В этих выражениях значения варьируемых факторов необходимо задавать в кодированных единицах. В факторном пространстве поверхности отклика (рисунок 7) имеют точку, соответствующую минимальной стоимости. Используя метод сканирования факторного пространства, эта точка имеет следующие координаты в кодированных (именованных) единицах:  $W_1 = +0,3$  (136 витков);  $f_1 = +0,44$  (122 Гц);  $\beta = -1$  (0,5). В этой точке стоимость активных материалов  $C_{\text{ам}} = 7,54$  тыс. руб., удельная поверхностная мощность тепловыделений  $W_{\text{п}} = 10$  Вт/см<sup>2</sup>, толщина листа вторичной обмотки  $\delta_2 = 1$  мм.

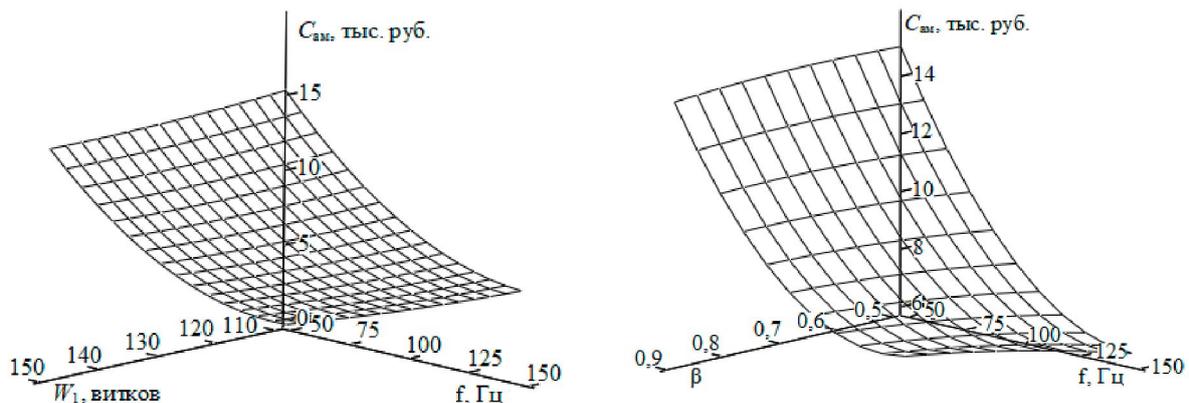


Рисунок 7 – Результаты планирования эксперимента

При количественном регулировании переданной потребителю тепловой энергии за счет изменения расхода теплоносителя меняется тепловой режим работы всех элементов электротехнического комплекса, в том числе и ЭНЭТТ. Нестационарный тепловой режим работы изменяет условия тепловой нагрузки на элементы конструкции ЭНЭТТ, что может привести к локальному перегреву электрической изоляции и досрочному выходу из строя дорогостоящего устройства. Для оценки теплового состояния ЭНЭТТ с пространственной магнитной системой призматической формы построена конечно-элементная модель области исследования (рисунок 8).

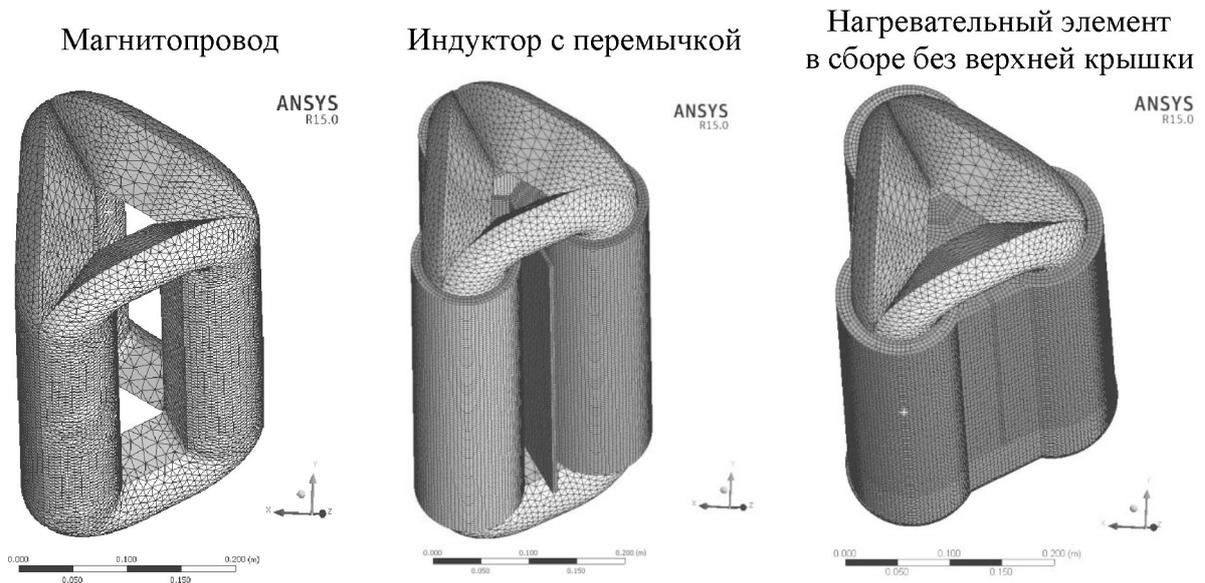


Рисунок 8 – Конечно-элементная модель

Температурное поле в области исследования описывается трехмерным уравнением теплопроводности

$$\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q_V = 0,$$

где  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  – коэффициенты теплопроводности сред по осям  $x, y, z$ , соответственно;  $T$  – температура в узлах сетки;  $q_V$  – удельная мощность источников тепла в активных элементах конструкции.

На поверхности корпуса и крышек справедливы граничные условия конвективной теплоотдачи

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} l_x + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} l_y + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} l_z + \alpha(T - T_B) = 0,$$

где  $l_x, l_y, l_z$  – направляющие косинусы внешней нормали к граничной поверхности;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности теплообмена в воду;  $T_B$  – температура теплоносителя.

Коэффициент теплоотдачи определяется по формуле

$$\alpha = \text{Nu} \frac{\lambda_B}{D_h},$$

где  $\text{Nu}$  – безразмерное число Нуссельта;  $\lambda_B$  – коэффициент теплопроводности воды;  $D_h$  – гидравлический диаметр канала.

Выбор формулы для вычисления критерия Нуссельта зависит от вида конвекции и определяется характером движения жидкости. При искусственной конвекции для ламинарного и турбулентного режимов течения соответственно используются следующие выражения:

$$Nu = 1,86 \sqrt[3]{(Re Pr) \frac{D_h}{L_k} \cdot \left(\frac{\mu_b}{\mu_s}\right)^{0,14}} ; Nu = 0,036 Re^{0,8} \sqrt[3]{Pr} \cdot \left(\frac{D_h}{L_k}\right)^{0,055},$$

где  $Re$ ,  $Pr$  – безразмерные числа Рейнольдса и Прандтля;  $D_h$ ,  $L_k$  – гидравлический диаметр и длина канала;  $\mu_b$ ,  $\mu_s$  – коэффициенты динамической вязкости жидкости при среднемассовой температуре и температуре теплоотдающей поверхности.

Число Нуссельта при естественной конвекции определяется по формуле

$$Nu = 0,54 (Gr Pr)^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_b}{Pr_{II}}\right)^{0,25},$$

где  $Pr$ ,  $Pr_b$ ,  $Pr_{II}$  – безразмерные числа Прандтля при средней температуре пограничного слоя  $T_{cp}$ , температуре теплоносителя  $T_b$  и температуре теплоотдающей поверхности  $T_{II}$ .

Критерий Грасгофа определяется по формуле

$$Gr = \left(\frac{g\beta}{\nu^2}\right) \cdot (T_{II} - T_b) l^3,$$

где  $\frac{g\beta}{\nu^2}$  – коэффициент критерия Грасгофа при температуре  $T_{cp}$ .

Физические свойства воды, сильно зависящие от температуры, вычисляются по аппроксимирующим выражениям:

$$\lambda_b = 0,551 + 0,00254 T_b - 0,0000123 T_b^2 ;$$

$$\frac{g\beta}{\nu^2} = (-3,57 + 0,8T_{cp} + 0,00725T_{cp}^2 + 0,0007T_{cp}^3) \cdot 10^8 ;$$

$$Pr = \frac{1}{0,071 + 0,00337T + 0,0000168T^2} ;$$

$$\mu = \frac{1}{570 + 19,1T + 0,112 T^2}.$$

В случае, когда температура теплоотдающей поверхности превышала температуру кипения воды, для расчета коэффициента теплоотдачи использовалась формула

$$\alpha_k = \frac{44(T_{II} - 100)^3}{T_{II} - T_b} + \alpha.$$

Моделирование температурного поля выполнено с помощью программного комплекса ANSYS. Моделирование позволило выявить распределение температуры в элементах конструкции и определить точки перегрева. Расположение области с наибольшей температурой зависит от режима теплообмена с нагреваемой средой. Интенсивность теплообмена

определяется видом жидкого теплоносителя (вода, антифриз, раствор, минеральное масло и др.) и скоростью его течения. На рисунке 9, а показано распределение температуры в наиболее нагретом среднем сечении ЭНЭТТ при различных расходах теплоносителя (воды). Анализ результатов позволил выявить взаимосвязь между максимальной потребляемой мощностью ЭНЭТТ  $P$  и скоростью протекания теплоносителя  $V$  по условию допустимого теплового режима работы (рисунок 9, б).

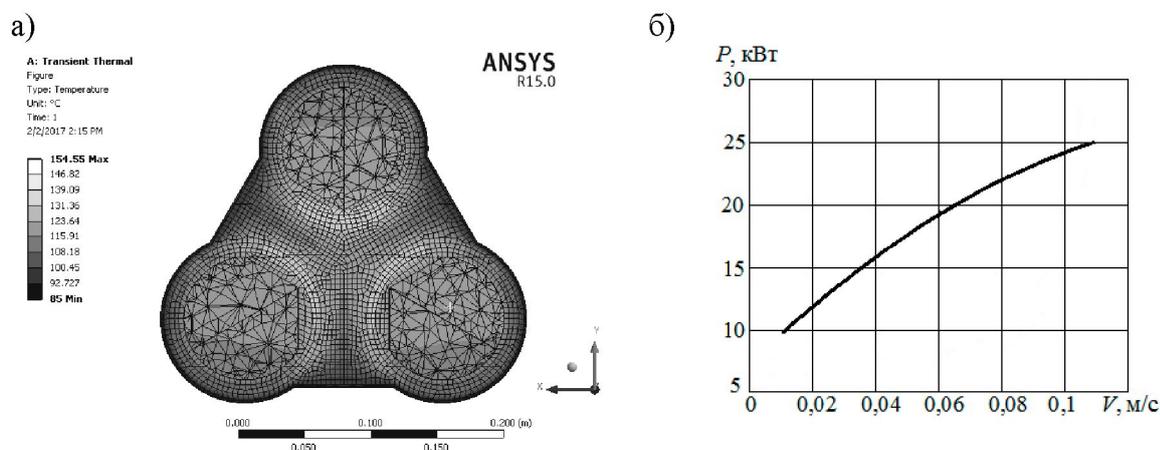


Рисунок 9 – Температурное поле в среднем сечении ЭНЭТТ (а), рекомендации по допустимой потребляемой мощности (б)

**В третьей главе** рассмотрены вопросы управления электротехническим комплексом децентрализованного теплоснабжения.

В децентрализованной системе теплоснабжения можно выделить три основных функциональных подсистемы: 1) подсистема генерации тепловой энергии, основным устройством которой является теплогенератор с ЭНЭТТ; 2) подсистема циркуляции (доставки) теплоносителя, основным устройством которой является циркуляционный насос, трубопроводы и арматура; 3) подсистема теплообмена, к которой относятся радиаторы и конвекторы отопления, запорные регулирующие вентили автоматического и (или) ручного действия, система теплый пол и т.п., обеспечивает необходимый температурный режим отдельно для каждого помещения. В каждой подсистеме имеется возможность регулирования потока тепловой энергии. Для выявления энергосберегающих режимов взаимодействующих между собой подсистем и определения характера взаимного их влияния друг на друга в работе математически описаны гидравлические и тепловые процессы, протекающие в этих подсистемах.

Тепловые процессы, протекающие в подсистеме теплообмена, описываются уравнением теплового баланса

$$Q_T = Gc(t_1 - t_2)\tau = k_{ТТ}S_T\Delta t_T\tau, \quad (1)$$

где  $Q_T$  – текущая тепловая нагрузка;  $G$  – массовый расход теплоносителя;  $c$  – удельная теплоемкость теплоносителя;  $t_1, t_2$  – температуры теплоноси-

теля на входе и выходе теплообменного аппарата или всей системы теплообмена;  $\tau$  – время;  $k_{\text{тг}}$  – коэффициент теплопередачи с поверхности теплообменного аппарата;  $S_{\text{т}}$  – площадь поверхности теплообмена;  $\Delta t_{\text{т}}$  – разность температур между поверхностью теплообменного аппарата и окружающей средой.

Теплообмен в нагревательном блоке между ЭНЭТТ и теплоносителем описывается уравнением

$$P_{\text{нэ}} = \rho c Q (t_1 - t_2) = k_{\text{тнэ}} S_{\text{тнэ}} \Delta t_{\text{нэ}}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{нэ}}$  – тепловой поток от ЭНЭТТ в нагреваемую среду равный потребляемой мощности;  $t_1, t_2$  – температуры теплоносителя на выходе и входе нагревательного блока;  $k_{\text{тнэ}}$  – коэффициент теплопередачи с поверхности ЭНЭТТ;  $S_{\text{тнэ}}$  – площадь поверхности теплообмена ЭНЭТТ;  $\Delta t_{\text{тнэ}}$  – температурный напор, т.е. разность температур поверхности электронагревательного элемента и окружающей среды.

Суммарные потери давления  $\Delta p$  в тепловом контуре

$$\Delta p = S \cdot G^2,$$

где  $G$  – расход теплоносителя;  $S$  – характеристика гидравлических сопротивлений местного характера и трения в контуре, эквивалентная уровню потерь давления при расходе теплоносителя  $G = 1$  кг/с.

Циркуляционный насос должен создать давление  $p$ , которое компенсирует потери давления  $\Delta p$  в тепловом гидравлическом контуре. Для трехскоростного циркуляционного насоса GRUNDFOS UPS 25-25 180 зависимость давления  $p$  от расхода  $Q$  для различных частот вращения аппроксимируются выражениями

$$p_1 = 18,86 - 2,368 \cdot Q - 4,515 \cdot Q^2, \text{ для скорости 1;}$$

$$p_2 = 17,68 - 7,785 \cdot Q - 3,887 \cdot Q^2, \text{ для скорости 2;}$$

$$p_3 = 14,59 - 23,06 \cdot Q + 6,071 \cdot Q^2, \text{ для скорости 3.}$$

Мощность  $P_{\text{дв}}$ , потребляемая двигателем для обеспечения циркуляции теплоносителя, определяется по формуле

$$P_{\text{дв}} = \frac{pQ}{\eta},$$

где  $p$  – давление в рабочей точке;  $Q$  – расход теплоносителя.

Для обеспечения стабильного температурного режима работы ЭНЭТТ в децентрализованных системах теплоснабжения целесообразно осуществлять количественное регулирование тепловой нагрузки потребителя за счет изменения расхода теплоносителя. Моделирование проводилось для различных значений тепловой нагрузки  $Q_{\text{т}}$  с учетом изменения гидравлического сопротивление контура. Результаты моделирования для различных частот вращения циркуляционного насоса  $n$  ( $n_1 < n_2 < n_3$ ) представлены на рисунке 10. Изменение расхода приводит к изменению скорости протекания теплоносителя в нагревательном блоке, что сказывается на

условии теплообмена и на температурном режиме ЭНЭТТ. Для обеспечения теплового баланса между подсистемами теплообмена и генерации тепловой энергии при изменении расхода теплоносителя и неизменном температурном режиме необходимо осуществлять регулирование мощности ЭНЭТТ  $P_{нэ}$  (рисунок 10, а). При этом мощность потребляемая электродвигателем насоса  $P_{дв}$  при выбранной частоте вращения крыльчатки  $n$  изменяется в небольших пределах (рисунок 10, б).

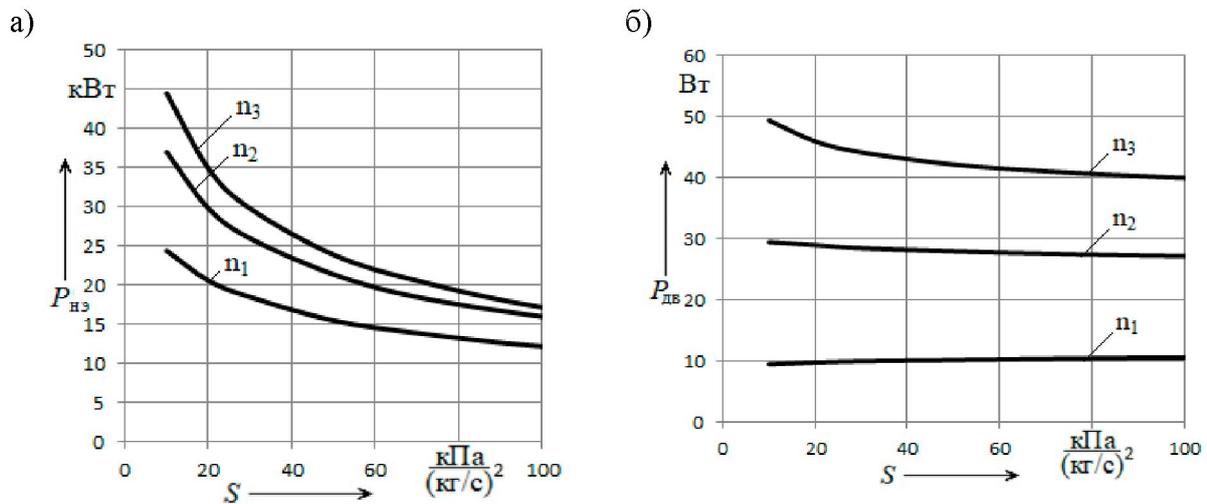


Рисунок 10 – Результаты моделирования при  $t_1 = 85 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $t_2 = 75 \text{ }^\circ\text{C}$

Для обеспечения баланса тепловой мощности в системе отопления тепловые потери объекта теплоснабжения компенсируются тепловой энергией, генерируемой в нагревательном блоке. Согласно уравнениям (1) и (2) массовый расход теплоносителя, его температурные параметры и мощность ЭНЭТТ в каждый момент времени взаимосвязаны. Получены зависимости, описывающие взаимное влияние тепловой мощности  $P_T = P_{нэ}$ , мощности потребляемой подсистемой циркуляции  $P_{ц}$  с учетом температурных параметров теплоносителя и его расхода  $Q$ . При моделировании температура теплоносителя  $t_1$  в прямом патрубке, то есть на выходе из нагревательного блока и на входе в подсистему теплообмена была принята равной  $85 \text{ }^\circ\text{C}$ , а температура  $t_2$  в обратном патрубке варьировалась в диапазоне от  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $75 \text{ }^\circ\text{C}$ . Анализ полученных результатов (рисунок 11) показывает, что потребляемая циркуляционным насосом мощность  $P_{ц}$  при максимальной тепловой нагрузке на систему отопления  $25 \text{ кВт}$  сильно зависит от температурных параметров теплоносителя ( $t_1/t_2$ ). При минимальной тепловой нагрузке  $5 \text{ кВт}$  мощность  $P_{ц}$  изменяется слабо. За счет изменения температурных параметров теплоносителя при максимальной тепловой нагрузке на систему отопления можно значительно снизить мощность потребляемую циркуляционным насосом. Так при тепловой мощности  $25 \text{ кВт}$  мощность, затрачиваемая на циркуляцию теплоносителя снижается более,

чем в 5 раз, с 42 Вт при температурных параметрах теплоносителя 85/75 °С до 8 Вт при температурных параметрах 85/60 °С.

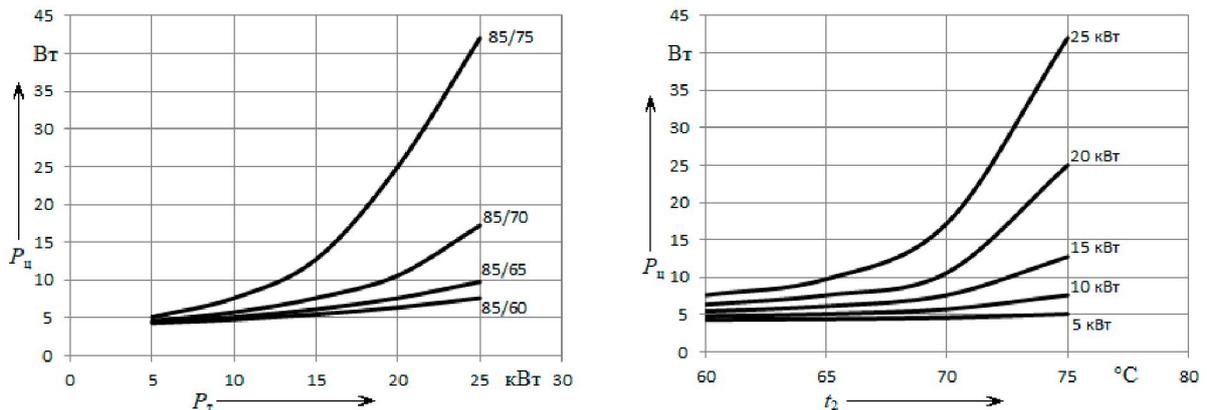


Рисунок 11 – Зависимость затрачиваемой на циркуляцию теплоносителя мощности  $P_{ц}$ , от тепловой нагрузки  $P_T$  и температуры теплоносителя  $t_2$

Температурные параметры теплоносителя при неизменной тепловой мощности системы отопления для обеспечения теплового баланса должны соответствовать определенному расходу. Так как теплоноситель проходит последовательно через теплообменные аппараты системы теплоснабжения, циркуляционный насос и нагревательный блок, следовательно, его расход будет определять температурные параметры не только в подсистеме теплообмена, но и в подсистеме генерации тепловой энергии, то есть в нагревательном блоке. Для повышения надежности и срока службы ЭНЭТТ необходимо соблюдать определенные температурные режимы, которые значительно зависят от потребляемой мощности и интенсивности теплообмена с нагреваемой средой. Интенсивность теплообмена зависит от температуры теплоносителя и скорости обтекания поверхности ЭНЭТТ, то есть от расхода жидкости.

С помощью трехмерного моделирования температурного поля ЭНЭТТ были выявлены зависимости максимальной температуры изоляции  $t_{из.мах}$  от температурных параметров теплоносителя и его расхода  $Q$  (рисунок 12). Данные для зависимости максимальной температуры изоляции  $t_{из.мах}$  от температуры теплоносителя на входе в нагревательный блок  $t_2$  получены при условии соблюдения теплового баланса, то есть при заданной температуре  $t_2$  при моделировании температурного поля определялся расход  $Q$  согласно выражению (2). Температура на выходе из нагревательного блока  $t_1$  задавалась 85 °С.

Анализ полученных графиков показывает, что максимальная температура изоляции ЭНЭТТ при номинальной мощности 25 кВт в некоторых режимах циркуляции теплоносителя превышает допустимые значения. Например, для класса нагревостойкости изоляционных материалов  $F$  допустимая температура составляет 155 С. То есть при мощности ЭНЭТТ

25 кВт расход теплоносителя должен составлять не менее 0,45 л/с, а его температура на входе в нагревательный блок – не менее 70 °С. Исключить ненормальные режимы работы нагревательного блока можно за счет уменьшения тепловыделений в элементах конструкции с помощью регулирования потребляемой мощности ЭНЭТТ или за счет интенсификации теплообмена, то есть увеличения расхода теплоносителя. Так как потребляемая мощность ЭНЭТТ должна соответствовать теплотерям обогреваемого объекта, то снижать максимальную температуру изоляции целесообразно путем увеличения расхода и, следовательно, изменения температурных параметров теплоносителя.

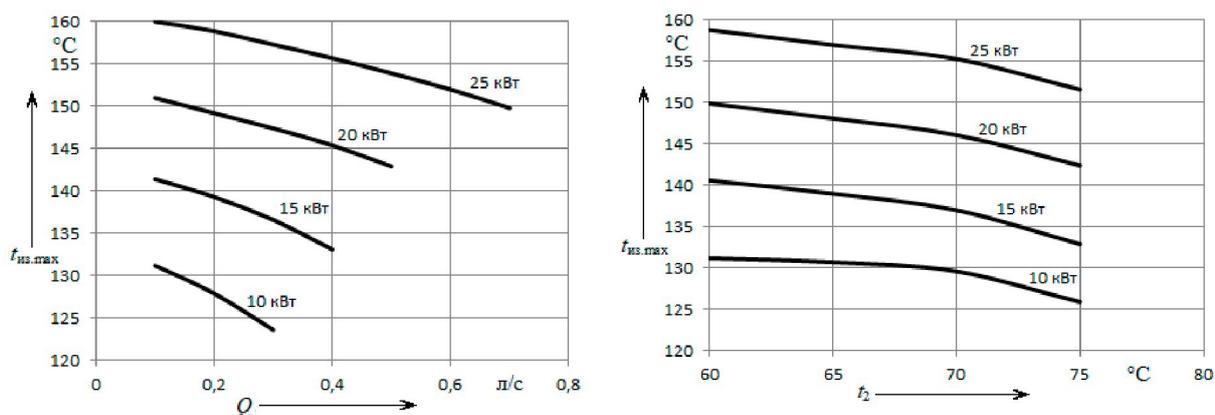


Рисунок 12 - Зависимость максимальной температуры изоляции  $t_{из.мах}$  от расхода теплоносителя  $Q$  и его температуры на входе в нагреватель  $t_2$

Таким образом, определены допустимые режимы работы теплогенератора при максимальной потребляемой мощности ЭНЭТТ. Производительность циркуляционного насоса в таком режиме должна составлять не менее 75 % от максимальной производительности. Для диапазона 80-100 % от номинальной тепловой мощности системы должен обеспечиваться режим максимальной производительности циркуляционного насоса. Для других диапазонов мощностей производительность насоса и температурные параметры теплоносителя должны соответствовать минимальной мощности, потребляемой циркуляционным насосом.

**В четвертой главе** приведены результаты практической реализации теоретических исследований. В соответствии с разработанной методикой и полученными рекомендациями по проектированию ЭНЭТТ выполнен расчет и изготовлен экспериментальный образец с вторичной обмоткой из сплава 12X18H10T с толщиной стенки 1,5 мм (рисунок 13). Для замера температуры нагрева элементов конструкции в предполагаемых местах с наибольшей температурой (внутренняя поверхность первичной обмотки, обращенная к перемычке) были установлены термопары типа ТХК. При испытании нагревательный блок был заполнен водой и подключен через измерительный комплект К-506 к регулируемому источнику трехфазного

напряжения. При номинальном фазном напряжении 220 В, фазные токи в первичной обмотке составили 2,9 А, потребляемая мощность одной фазы 621 Вт, трех фаз – 1863 Вт,  $\cos\varphi = 0,973$ .

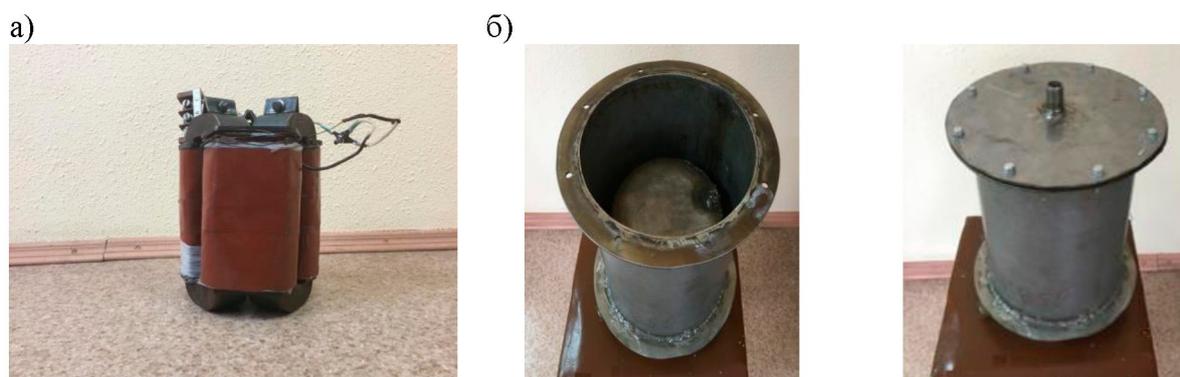


Рисунок 13 – Индуктор (а) и нагревательный блок (б)

Для экспериментального образца выполнена оценка точности расчета мощности тепловыделений в части вторичной обмотки, относящейся к цилиндрической стенке корпуса, с учетом эффекта растекания тока. С учетом потерь холостого хода 23 Вт, расчетных потерь в первичной обмотке 28,5 Вт и расчетных потерь в перемычке 216,8 Вт потери в цилиндрической части вторичной обмотки составили 1595 Вт. Отклонение от расчетного значения мощности тепловыделений 1576 Вт составило 1,2 %. Результаты расчетно-экспериментальной оценки подтверждают высокую точность учета растекания тока в цилиндрической области вторичной обмотки, расположенной между перемычками.

Для оценки нагрева первичной обмотки в различных режимах работы нагревательный блок подключен к испытательному стенду (рисунок 14). В гидравлическом контуре с нагревательным блоком 1 размещен циркуляционный насос (находится с обратной стороны стенда), электромагнитный расходомер 2, термопреобразователи 3 для замера температуры сетевого 4 и обратного 5 теплоносителя, запорно-регулирующие клапаны 6 и пластинчатые теплообменники 7. Эксперимент проводился при установившейся температуре теплоносителя, которая контролировалась с помощью комплектов термопреобразователей, установленных на выходе из нагревательного блока и на его входе. Регулирование скорости протекания теплоносителя относительно поверхности теплообмена ЭНЭТТ осуществлялась циркуляционным насосом. Регистрация расхода теплоносителя осуществлялась электромагнитным расходомером. Температура теплоносителя регулировалась с помощью теплообмена с контуром теплоснабжения посредством пластинчатого теплообменника.

Для оценки возможных режимов работы нагревательного блока были проведены эксперименты, в которых с помощью циркуляционного насоса осуществлялось регулирование расхода теплоносителя так, чтобы скорость

его протекания  $v$  в кольцевом канале между электронагревательным элементом и корпусом нагревательного блока составляла от 0,01 м/с до 0,06 м/с. При таких условиях расход теплоносителя регулировался в диапазоне от  $8,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$  до  $5,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ . Результаты эксперимента в виде зависимости температуры первичной обмотки  $t_1$  от  $v$  приведены на рисунке 15.

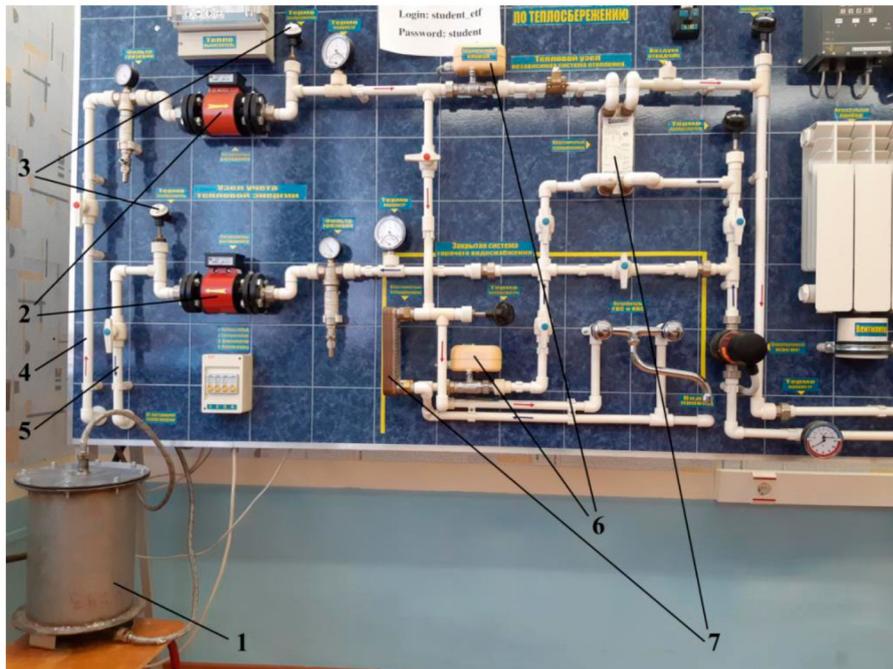


Рисунок 14 – Стенд для температурных испытаний нагревательного блока

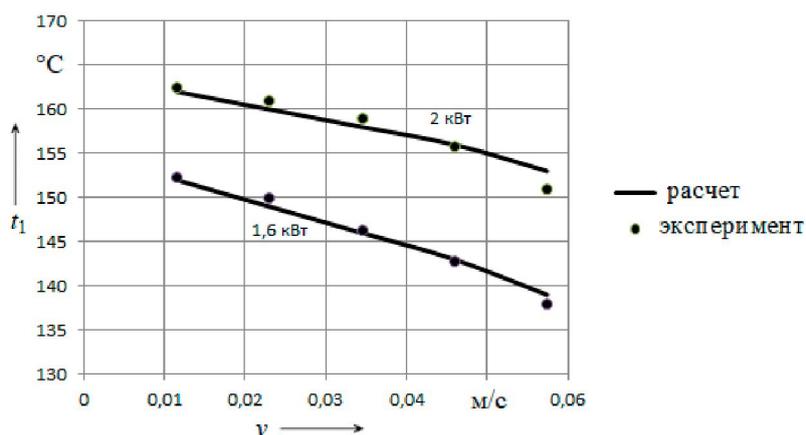


Рисунок 15 – Сравнение экспериментальных и расчетных данных

Анализ представленных результатов подтверждает наличие возможных режимов работы нагревательного блока в зависимости от расхода (скорости протекания) теплоносителя для различной потребляемой мощности. Для допустимой температуры изоляции  $155 \text{ }^\circ\text{C}$ , соответствующей классу нагревостойкости  $F$ , ЭНЭТТ может работать на полную мощность при скорости теплоносителя более 0,05 м/с. Этот режим соответствует наибольшей тепловой нагрузке на систему теплоснабжения. При уменьше-

нии этой нагрузки на 20 % и более возможны энергосберегающие режимы работы с минимальными затратами энергии на циркуляцию теплоносителя.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе выполнены комплексные исследования ЭНЭТТ направленные на выявление допустимых режимов работы в составе электротехнического комплекса децентрализованного теплоснабжения.

1. Сформирована структура электротехнического комплекса децентрализованного теплоснабжения, которая включает в себя три взаимосвязанные между собой подсистемы: генерирования тепловой энергии, циркуляции теплоносителя и теплообмена.

2. Разработана конструкция ЭНЭТТ с пространственной магнитной системой, обеспечивающая безопасность и надежность теплогенерирующего оборудования комплекса децентрализованного теплоснабжения.

3. Разработаны математические и компьютерные модели электромагнитных и тепловых процессов, протекающих в ЭНЭТТ, и получены рекомендации по регулированию мощности ЭНЭТТ в зависимости от режима циркуляции теплоносителя.

4. Выявлена взаимосвязь между электромагнитными, тепловыми и гидравлическими процессами в электротехническом комплексе децентрализованного теплоснабжения.

5. Получены рекомендации по проектированию теплогенерирующего электрооборудования и по энергоэффективным режимам работы электротехнического комплекса децентрализованного теплоснабжения.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах, включенных в перечень, утвержденный ВАК:

1. **Зар Ни Ньейн** Методика электромагнитного расчета нагревательного элемента трансформаторного типа с пространственной магнитной системой / Зар Ни Ньейн, А.В. Сериков, Л.С. Мшвениерадзе // Известия вузов. Электромеханика, Т. 61, № 2, 2018. – С. 59-64.

2. **Зар Ни Ньейн** Анализ теплового состояния нагревательного элемента трансформаторного типа / Зар Ни Ньейн, А.В. Сериков, В.А. Сериков // Электротехника, 2019, № 5. – С. 45-49.

Статьи, индексируемые в наукометрических базах Web of Science и Scopus:

3. **Zar Ni Nyein** Improving Design of Transformer Type Heater Element / Zar Ni Nyein, Litovets, A.V. Serikov, A.V. // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon-2018). – Владивосток, ДВФУ, 2018. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602660.

4. **N'ein, Z.N.** Analysis of the Thermal State of a Heating Element of Transformer Type / Z.N. N'ein, A.V. Serikov, V.A. Serikov // Russian Electrical Engineering, Volume 90, Issue 5, 2019. – PP. 397-401. DOI: 10.3103/S1068371219050110.

Прочие публикации:

5. **Зар Ни Ньейн** Электронагревательное устройство трансформаторного типа для энергосберегающего комплекса / Зар Ни Ньейн, А.В. Сериков // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов : материалы 46-й научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Комсомольск-н/А: ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2016. – С. 209-212.

6. **Литовец, А.В.** Разработка конструкции электробезопасного нагревательного устройства / А.В. Литовец, **Зар Ни Ньейн**, А.В. Сериков // Дальневосточная весна – 2016 : материалы 14-й Междунар. науч.-практ. конф. по проблемам экологии и безопасности. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2016. – С. 171-174.

7. **Зар Ни Ньейн** Повышение энергоэффективности систем теплоснабжения с использованием электротехнического комплекса / Зар Ни Ньейн, В.А. Сериков, А.В. Сериков // Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи: материалы IV российской молодежной научной школы-конференции. В 2 т. Т. 1. – Томск : Изд-во ООО «ЦРУ», 2016. – С. 126-129.

8. **Зар Ни Ньейн** Моделирование температурного поля в нагревательном элементе трансформаторного типа / Зар Ни Ньейн, А.В. Сериков // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов : материалы 47-й научно-технической конференции студентов и аспирантов, апреля 2017. – С.412-415.

9. **Зар Ни Ньейн** Перспективы применения нагревательных элементов трансформаторного типа / Зар Ни Ньейн, А.В. Сериков // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению материалы международной научно-практической конференции, г. Комсомольск-на-Амуре, 29-30 сентября 2017 г. – С.91-96.

10. **Зар Ни Ньейн** Классификация нагревательных элементов трансформаторного типа/ Зар Ни Ньейн, Сериков А.В // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению Материалы международной научно-практической конференции. 2018. – С. 83-87.

Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ:

11. **Свидетельство № 2020611895** об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета нагревательного элемента трансформаторного типа с пространственной магнитной системой / А.В. Сериков, Зар Ни Ньейн, В.С. Варова. – № 2019666831; заявл. 18.12.2019; опубл. 12.02.2020. Бюл. № 2.

**Зар Ни Ньейн**

**ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ  
ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПА  
ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА  
ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ**

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

Подписано в печать 26.10.2020.  
Формат 60 × 84 1/16. Бумага 80 г/м<sup>2</sup>. Ризограф EZ570E.  
Усл. печ. л. 1,40. Уч.-изд. л. 1,3. Тираж 100 экз.

Полиграфическая лаборатория  
Федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»  
681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.