

На правах рукописи



Навалихина Екатерина Юрьевна

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЛОЖНОГО
ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В КАБЕЛЬНОМ КАНАЛЕ**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель: Труфанова Наталия Михайловна,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Скульский Олег Иванович,
доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории механики термопластов ФГБУН «Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук»

Тарунин Евгений Леонидович,
доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной математики и информатики ФГБОУ ВПО «Пермского государственного национального исследовательского университета»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Защита состоится «22» сентября 2015 года в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 212.188.08 на базе ФГБОУ ВПО «Пермского национального исследовательского политехнического университета» по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29, ауд. 423б

С текстом диссертации можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «Пермского национального исследовательского политехнического университета» (www.pstu.ru)

Автореферат разослан «01 » июля 2015года.

Ученый секретарь диссертационного совета Д
212.188.08, кандидат физико-
математических наук, доцент



Швейкин А.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время в современном мире возрастает интерес к использованию силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, которые находят широкое применение в системах распределения электрической энергии всех классов напряжения. Эта тенденция обусловлена возрастающими требованиями к эксплуатационным характеристикам кабелей. В России показатель использования кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена составляет на данный момент 10-15%, в то время в европейских странах этот показатель вырос до 90%.

Прокладка таких кабелей осуществляется различными способами, но для территорий с плотной инфраструктурой в стесненных городских условиях зачастую единственной альтернативой передачи больших мощностей электрической энергии являются линии, проложенные в подземном канале. Однако при распределении электрической энергии в большинстве случаев внутреннее пространство подземных сетей используется неэффективно и в ряде случаев не соответствует правилам безопасности при эксплуатации. В связи с этим практический интерес представляют собой задачи повышения энергоэффективности существующих и проектируемых систем передачи электрической энергии с учетом безопасных условий эксплуатации.

Величина номинальной токовой нагрузки силовых кабелей зависит от ряда факторов: геометрических параметров кабельных линий и подземного канала, теплофизических характеристик конструктивных элементов кабелей и окружающей среды, условий теплообмена, индуцированных токов в металлических экранах кабелей.

Систематическим исследованиям тепловых и электродинамических процессов, протекающих в кабельных линиях и в кабельных каналах и, как следствие, определению оптимальной токовой нагрузки, посвящено большое количество работ как отечественных авторов, так и зарубежных. Существующие инженерные методики по определению пропускной способности кабельных линий не позволяют учесть в полной мере влияние вышеперечисленных факторов и, следовательно, адекватно описать рассматриваемые процессы.

В тоже время практически отсутствуют работы, описывающие подходы к решению задач на основе математических моделей, одновременно учитывающих влияние теплофизических свойств материалов, условий эксплуатации, лучистой энергии, электромагнитного поля, нестационарности процессов на процессы теплопереноса в кабельном канале и, как следствие, на пропускную способность.

Таким образом, представляет научный интерес и является весьма **актуальным** разработка комплексных математических моделей, одновременно учитывающих сложный тепломассоперенос в кабельном канале, процессы электро – и магнитодинамики для определения тепловых потерь в экранах силовых кабелей, многослойную конструкцию силовых кабелей, температурные зависимости теплофизических и электрических характеристик используемых в конструкции силовых кабелей материалов.

Цель и задачи. Целью настоящей работы является разработка нестационарных математических моделей процессов тепломассопереноса и электро - магнитодинамики, протекающих в кабельных каналах, с учетом теплового излучения в условиях естественной конвекции для определения рациональной величины токовой нагрузки и обеспечения безопасной эксплуатации силовых кабелей.

Для достижения поставленной цели необходимо поставить и решить следующие **задачи:**

1. Разработать математическую модель нестационарных процессов тепломассобмена кабельных линий, проложенных в кабельных каналах, с учетом зависимостей теплофизических свойств используемых материалов от температуры.

2. Разработать математическую модель электро – и магнитодинамики для учета тепловых потерь в элементах конструкции кабельных линий.

3. Разработать алгоритмы для численной реализации совместного решения задач тепломассобмена и электродинамики и определения температурного поля в кабельном канале. На основе предложенных алгоритмов создать комплекс вычислительных программ для реализации разработанных математических моделей.

4. Проверить адекватность предложенных математических моделей сравнением численных результатов, полученных на основе методик других ученых и с натурными процессами.

5. На основе численных исследований определить рациональные режимы эксплуатации силовых кабельных линий, проложенных в подземном кабельном канале.

Научная новизна.

- Построена новая нестационарная математическая модель процессов тепломассопереноса с учетом зависимостей теплофизических свойств от температуры, теплового излучения в условиях естественной конвекции при номинальном режиме работы и в условиях вынужденной перегрузки.

- Разработана математическая модель процессов электро - и магнитодинамики для нахождения тепловых потерь в металлических экранах за счет наведенных электрических полей.

- Разработан и реализован многоуровневый алгоритм процедур для совместного решения задач тепломассопереноса и электродинамики и определения суммарного температурного поля в кабельном канале.

- Выявлены закономерности влияния геометрических особенностей кабельных линий, свойств окружающей среды, потерь в экранах кабелей, лучистого и конвективного теплообмена, условий эксплуатации на температурное поле в канале и величину пропускной способности силовых кабелей. Приведены рекомендации по рациональному распределению нагрузки в кабельных линиях канала при номинальном режиме работы и в условиях вынужденной перегрузки.

Теоретическая и практическая значимость работы. Работа выполнена как в интересах предприятий, специализирующихся на разработке и промышленном выпуске кабельной продукции, так и предприятий энергоснабжения, распределяющих электрическую энергию для оценки возможной нагрузочной способности кабельных линий, проложенных в подземном кабельном канале в зависимости от реальных потребностей.

Разработанные методики расчета тепловых полей в кабельных линиях и индуцированных токов в металлических экранах при номинальном режиме работы кабельного канала, а также в условиях вынужденной перегрузки применялись для расчета пропускной способности реальных кабельных каналов.

Методы исследования. Для решения перечисленных задач использовалась теория тепломассопереноса и электромагнитодинамики, методы математического моделирования, численные методы, натурные и численные эксперименты.

Положения, выносимые на защиту.

1. Нестационарная математическая модель процессов тепломассопереноса с учетом зависимостей теплофизических свойств от температуры, теплового излучения в условиях естественной конвекции в кабельном канале.

2. Математическая модель процессов электро - и магнитодинамики, позволяющая определять тепловые потери в металлических экранах и учитывать их влияние на распределение температуры в кабельном канале, температуру изоляции кабелей.

3. Алгоритм решения связанной задачи тепломассопереноса и задачи электромагнитодинамики для нахождения суммарного теплового поля в кабельном канале.

4. Результаты численного исследования влияния различных механизмов теплообмена, условий теплообмена с окружающей средой, теплофизических свойств материалов, условий эксплуатации, геометрии каналов и кабельных конструкций на закономерности процессов тепломассобмена в кабельном канале и его пропускную способность.

Степень достоверности результатов подтверждается удовлетворительным согласованием с результатами экспериментальных исследований и численными решениями, полученными с помощью других методов.

Внедрение результатов работы. По результатам работы, проведенной автором, на ПО «Пермские городские электрические сети» приняты к использованию:

- режимы работы кабельных линий в номинальном режиме в режиме перегрузки;
- рекомендации по токовым нагрузкам кабельной линии в зависимости от конструкции силового кабеля;
- рекомендации по оценке работоспособности силовых кабельных линий при различных условиях прокладки, нагружения и эксплуатации в подземном кабельном канале и условий теплообмена.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены на следующих конференциях: III Международной Интернет - конференции «Инновационные технологии: теория, инструменты, практика» (г. Пермь, 2011 г.); I Международной научной конференции «Инновационные процессы в исследовательской и образовательной деятельности» (г. Пермь, 2012 г.); IV Всероссийской научно-практической конференции «Современные наукоемкие инновационные технологии» (г. Самара, 2012 г.); 18-ой Зимней школе по механике сплошных сред (г. Пермь, 2013 г.); 10-ой Международной конференции пользователей ANSYS (г. Санкт - Петербург, 2013 г.); 18-ой Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (г. Алушта, 2013 г.); 6-й Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии» (г. Томск, 2013 г.); I Всероссийской научно-технической Интернет - конференции молодых ученых «Прикладная математика, механика и процессы управления» (г. Пермь, 2013 г.); 11th World Congress on Computational Mechanics (Barcelona, 2014 г.); 19-ой Зимней школе по механике сплошных сред (г. Пермь, 2015 г.); 19-ой Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным системам (г. Алушта, 2015 г.). Результаты диссертации использованы при выполнении НИР в рамках гранта РФФИ 13-08-96034 p_урал_a.

Диссертационная работа в целом докладывалась на семинарах Института механики сплошных сред УрО РАН (рук. академик РАН В.П. Матвеев), кафедры «Математическое моделирование систем и процессов» ПНИПУ (рук. д.ф.-м. н, проф.

П.В. Трусов) и кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций» ПНИПУ (рук. д.ф.-м.н., проф. Ю.В. Соколкин).

Публикации. Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 14 печатных работах, из них 8 в изданиях, входящих в Перечень ВАК рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук (в том числе – 3 в изданиях, входящих в базу Scopus).

Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015610612 от 14.01.2015.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 129 наименований. Общий объем работы 109 страниц, в том числе 55 рисунков и 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы, отражены ее научная новизна и практическая значимость, перечислены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор литературного материала, посвященного особенностям и проблемам математического моделирования процессов теплопереноса и электро- и магнитодинамики в подземном кабельном канале.

Отмечено, что в настоящее время, несмотря на большой объем выполненных исследований по проблеме теплопереноса в кабельном канале, существует ряд нерешенных задач, имеющих важное научное и практическое значение. В настоящее время не разработано математического описания сложного теплообмена в кабельном канале совместно с процессами электромагнитодинамики в кабельных линиях с учетом зависимостей теплофизических и электрических свойств используемых материалов от температуры.

Во второй главе приводится математическое описание процессов теплопереноса в кабельном канале с учетом энергии излучения в условиях естественной конвекции, которое основывается на законах сохранения энергии, массы и количества движения и электромагнитодинамики.

Объектом численного моделирования являются трехфазные кабельные линии, проложенные в полиэтиленовых трубах в подземном бетонном кабельном канале (см. рис. 1). Силовой кабель представляет собой многослойную конструкцию (рис. 2). При создании математической модели процессов теплопереноса в канале сделаны следующие допущения: кабельные линии считаются бесконечно длинными, что позволяет рассматривать процесс в двумерной постановке и не учитывать диффузионные потоки в продольном направлении; в трубе

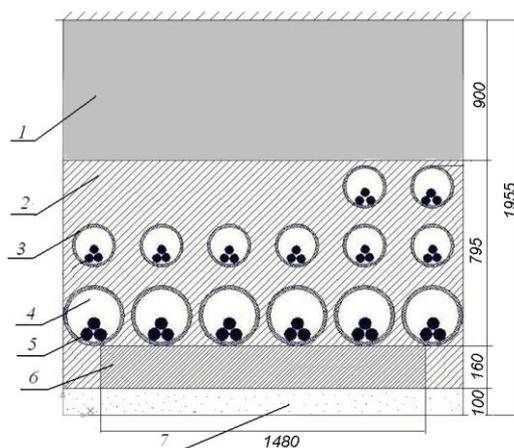


Рис. 1. Схематичное изображение канала: 1 – земля; 2 – бетонный монолит; 3 – полиэтиленовая труба; 4 – воздушное пространство; 5 – кабельные линии; 6 – плита; 7 – подсыпка.

реализуется ламинарный режим движения воздуха; воздух, заполняющий полость трубы, удовлетворяет приближению Буссинеска; воздушная среда считается прозрачной, а твердые поверхности, участвующие в теплообмене – серыми поверхностями; на границах раздела разнородных сред реализуется условие идеального теплового контакта; градиент температуры в массиве земли на удаленном расстоянии от кабельного канала равен нулю; солнечная радиация на поверхности земли пренебрегается; теплофизические характеристики массива земли и конструктивных элементов канала постоянны.

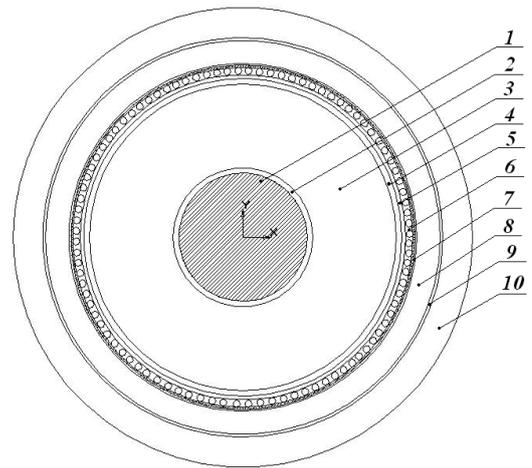


Рис. 2. Конструкция силового кабеля: 1 – жила; 2,4 – экран из полупроводящего сшитого полиэтилена; 3 – изоляция из сшитого полиэтилена; 5 – обмотка; 6 – медный экран; 7,9 – слой из стеклоленты; 8,10 – внутренняя и внешняя оболочки из поливинилхлоридного пластика

С учетом перечисленных допущений система дифференциальных уравнений имеет вид:

$$\text{Уравнение неразрывности: } \frac{\partial \rho_4}{\partial t} + \vartheta_i \frac{\partial \rho_4}{\partial x_i} = -\rho_4 \frac{\partial \vartheta_i}{\partial x_i}, \quad (1)$$

$$\text{Уравнение движения: } \rho_4 \left(\frac{\partial \vartheta_i}{\partial t} + \vartheta_j \frac{\partial \vartheta_i}{\partial x_j} \right) = \mu_4 \Delta \vartheta_i + \beta (T - T_0) g, \quad (2)$$

$$\text{Уравнение энергии: } c_4 \rho_4 \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vartheta_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = \lambda_4 \Delta T, \quad (3)$$

Плотность воздуха определяется законом Буссинеска:

$$\rho_4(T) = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)], \quad (4)$$

Для массива земли, бетона, полиэтиленовой трубы, железобетонной плиты и песчаной подсыпки уравнения теплопроводности имеют вид:

$$c_k \rho_k \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_k \Delta T, \quad k = 1, 2, 3, 6, 7 \quad (5)$$

Здесь k – номер элемента в исследуемой области (рис.1).

Для неметаллических конструктивных элементов силового кабеля:

$$c_5^m \rho_5^m \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_5^m \Delta T, \quad m = 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10 \quad (6)$$

Здесь m – номер элемента в конструкции силового кабеля (рис.2).

Для токопроводящей жилы и металлического экрана силового кабеля:

$$c_5^1 \rho_5^1 \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_5^1 \Delta T + q_{v1}, \quad c_5^6 \rho_5^6 \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_5^6 \Delta T + q_{v2}, \quad (7)$$

где x_i – декартовы координаты; ϑ_i – компоненты вектора скорости воздуха в трубе ($м/с$); μ – динамическая вязкость воздуха ($Па \cdot с$); ρ_4, c_4, λ_4 – плотность, теплоемкость, коэффициент теплопроводности воздуха соответственно ($кг/м^3$, $Дж/(кг \cdot С)$, $Вт/(м \cdot С)$); ρ_k, c_k, λ_k – плотность, теплоемкость, теплопроводность массива земли, бетона, полиэти-

леновой трубы, песчаной подсыпки и железобетонной плиты соответственно; $\rho_5^m, c_5^m, \lambda_5^m, \rho_5^1, \lambda_5^1, c_5^1, \rho_5^6, c_5^6, \lambda_5^6$ – плотность, теплоемкость, теплопроводность конструктивных неметаллических элементов, токопроводящей жилы и металлического экрана силового кабеля соответственно; T – температура ($^{\circ}\text{C}$); q_{v1} – мощность внутренних источников тепла в токопроводящих жилах ($\text{Вт}/\text{м}^3$); q_{v2} – мощность внутренних источников тепла в металлических экранах ($\text{Вт}/\text{м}^3$); ρ_0 – плотность воздуха при равновесной температуре T_0 ($\text{кг}/\text{м}^3$); β – коэффициент объемного теплового расширения воздуха ($^{\circ}\text{C}^{-1}$); t – время процесса (сек); g – ускорение свободного падения ($\text{м}/\text{с}^2$).

Система дифференциальных уравнений (1) – (7) дополняется начальными и граничными условиями. В начальный момент времени в рассматриваемой области температура принималась равной 20°N , скорость воздуха равна нулю. Граничные условия для компонент скоростей определялось из допущения о непротекании к твердым и непроницаемым стенкам. На поверхности земли задается граничное условие конвективного теплообмена; на других границах исследуемой области задаются адиабатические условия теплообмена; на твердых границах контакта разнородных сред задаются условия 4-го рода и равенство температур; с учетом излучения на поверхности силового кабеля задается граничное условие радиационного теплообмена.

Мощность внутреннего источника тепла в токопроводящей жиле и в металлическом экране определяется согласно закону Джоуля Ленца по формуле:

$$q_{v1} = \iint_S \frac{I_1^2}{\sigma_5} dS, \quad q_{v2} = \iint_S \frac{I_6^2}{\sigma_5} dS, \quad (8)$$

где I_1, I_6 – номинальный ток жилы и металлического экрана силового кабеля (А); σ_5^1, σ_5^6 – коэффициент удельной электропроводности токопроводящей жилы и металлического экрана силового кабеля ($\text{См}/\text{м}$).

Для определения дополнительных потерь в экранах кабеля q_{v2} (8), необходимо рассматривать задачу электромагнитодинамики, при постановке которой были сделаны следующие допущения: кабель бесконечно длинный; электродинамические характеристики используемых материалов постоянны и изотропны; фазные токи синусоидальны и сбалансированы; все величины поля изменяются синусоидально во времени; электромагнитное поле является квазистационарным; электропроводностью массива земли и конструктивными элементами кабельного канала пренебрегаем; токи смещения пренебрегаются.

Математическая модель электродинамических процессов в кабельных линиях основывается на уравнениях Максвелла. Для векторного магнитного потенциала и плотности токи уравнения записываются в следующем виде:

$$\text{Для жилы силового кабеля: } \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_1} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_1} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) - j\omega\sigma^1 A_z + J^{1s} = 0 \quad (9)$$

$$-j\omega\sigma^1 A_z + J^{1s} = J^1 \quad \iint_{S^1} J^1 = I_h \quad h = a, b, c \quad (10)$$

$$\text{Для экрана силового кабеля: } \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_6} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_6} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) - j\omega\sigma^6 A_z + J^{6s} = 0 \quad (11)$$

$$-j\omega\sigma^6 A_z + J^{6s} = J^6 \quad \iint_{S^6} J^6 dS = I^6 \quad (12)$$

Для воздуха:
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_5} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_5} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = 0 \quad (13)$$

Для массива земли, бетона, трубы, песчаной подсыпки и железобетонной плиты:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_i} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_i} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = 0 \quad (14)$$

где x, y – декартовы координаты; j – мнимая единица; ω – круговая частота ($рад/сек$); A_z – компонента векторного магнитного потенциала ($Вб/м$); J^{1s}, J^{6s} – плотность тока в токопроводящей жиле и в экране силового кабеля соответственно ($А/м^2$); μ_1, μ_6, μ_5 – магнитная проницаемость токопроводящей жилы, экрана силового кабеля, воздуха соответственно ($Гн/м$); $h = a, b, c$ – фазы токопроводящих жил; σ^1, σ^6 – коэффициент удельной электропроводности токопроводящей жилы, металлического экрана кабеля ($См/м$); I_h, I^6 – ток в токопроводящей жиле кабеля и в металлическом экране соответственно ($А$); S^1, S^6 – площадь поперечного сечения токопроводящей жилы и экрана кабеля соответственно ($м^2$). На границах исследуемой области векторный магнитный потенциал равен нулю.

Решение полученной системы дифференциальных уравнений (1) – (14), замкнутой соответствующими граничными условиями, осуществлялось поэтапно в инженерном пакете ANSYS и в разработанном и зарегистрированном программном комплексе «Layers».

На первом этапе для нахождения мощности тепловых потерь в экране силового кабеля, возникающей за счет наведенных токов, решалась задача электромагнитодинамики. Результатом решения задачи электромагнитодинамики являлись распределение плотности тока и тепловые потери в металлических элементах конструкции кабеля.

На втором этапе с учетом найденного теплового потока в металлических элементах конструкции силового кабеля решалась задача тепломассопереноса. Процесс численного решения задачи процессов тепломассопереноса представляет собой цикл повторяющихся итераций.

Анализ зависимости показал, что для стабилизации решения достаточно использовать сетки с числом узлов 180 000 (рис.4) и ограничиться выполнением 400 счетных итераций (рис.3).

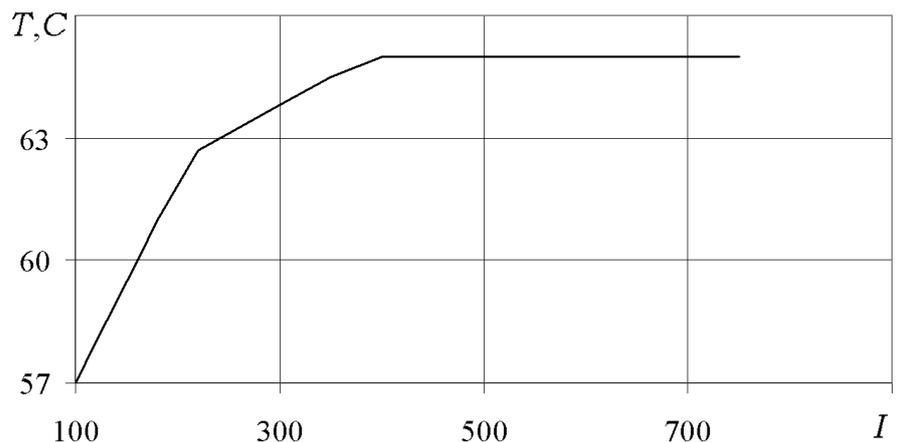


Рис.3. Изменение температуры на поверхности силового кабеля в зависимости от числа итераций

Поскольку конструкция силового кабеля представляет собой многослойный цилиндр, то для эффективности расчета температурных полей в кабеле был разработан и зарегистрирован программный комплекс «Layers», в котором реализована температурная задача многослойного цилиндра с теплофизическими характеристиками материалов, зависящими от температуры.

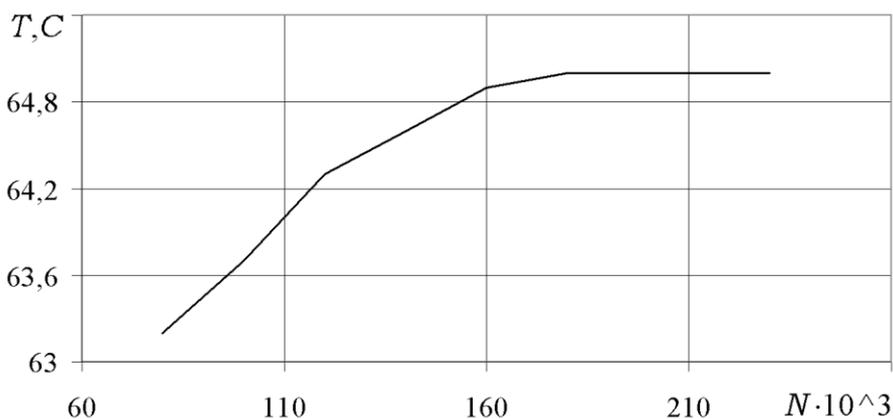


Рис. 4. Изменение температуры на поверхности кабеля в зависимости от числа узлов сетки

В программном комплексе «Layers» для упрощения численного расчета, были определены усредненные значения теплофизических характеристик используемых материалов в конструкции кабеля. На рис.5. представлено распределение температуры по сечению кабеля (кривая 1 - теплофизические характеристики зависят от температуры; кривая 2 - усредненные теплофизические характеристики).

Максимальное отклонение по температуре на поверхности токопроводящей жилы силового кабеля не превышает 3%, что может считаться достаточно хорошим согласованием. Полученные в программном комплексе «Layers» усредненные теплофизические характеристики силового кабеля использовались для

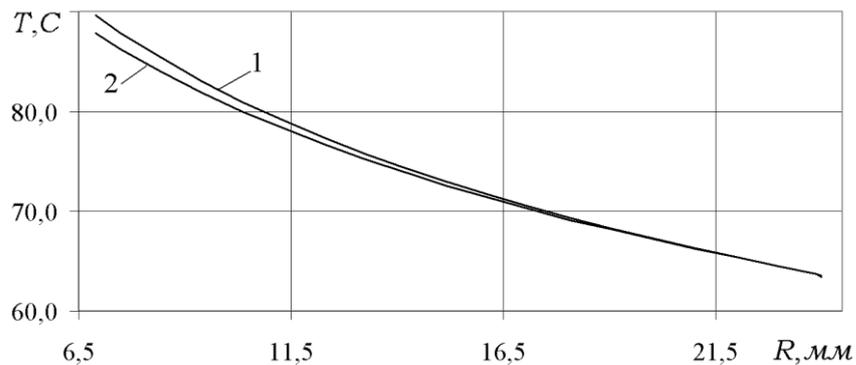


Рис. 5. Распределение температуры по сечению кабеля

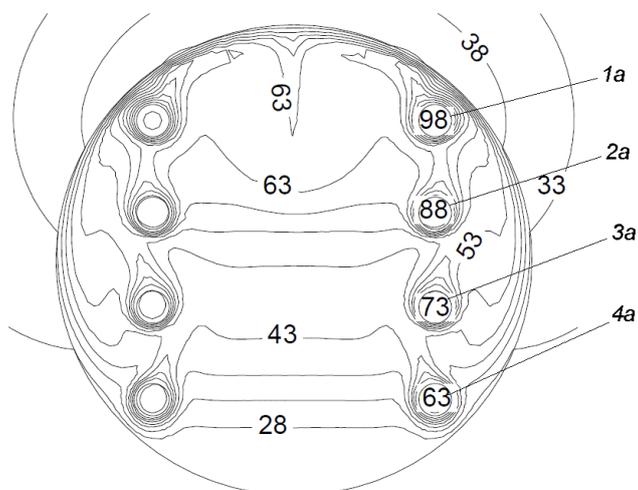
расчета температурного поля в кабельном канале в инженерном пакете ANSYS.

В третьей главе для проверки адекватности разработанных математических моделей проведено сравнение полученных численных результатов с результатами, в открытой литературе. На основе разработанной математической модели процессов тепломассообмена без учета энергии излучения в кабельном канале, для случая восьми кабелей были проведены численные исследования, результаты которых сопоставлены с результатами, имеющимися в литературе.

Сравнительный анализ температурных полей показал (рис.6 и рис.7), что результаты, полученные с помощью предложенной математической модели, достаточно хорошо согласуются с результатами, представленными в литературе. Максимальное отличие получено для поверхности жилы у третьего кабеля и не превышает 5%.

При рассмотрении кабельных линий, в конструкцию которых входит металлический экран, представляется важным сравнение предложенных в диссертации подходов по определению дополнительных тепловых потерь в металлических элементах конструкции кабеля, возникающих за счет наведенных токов, с подходами и результатами, изложенными в литературе. Была рассмотрена совместная задача электромагнитных и тепловых процессов, протекающих в кабельной линии, проложенной в грунте. Температур-

ные поля вблизи кабельной линии (рис. 8 и рис.9) в обоих случаях, близки: наибольшее отличие по температуре не превышает 2°C .



Temperature

Рис.6. Распределение температуры в кабельном канале: результаты, представленные в литературе

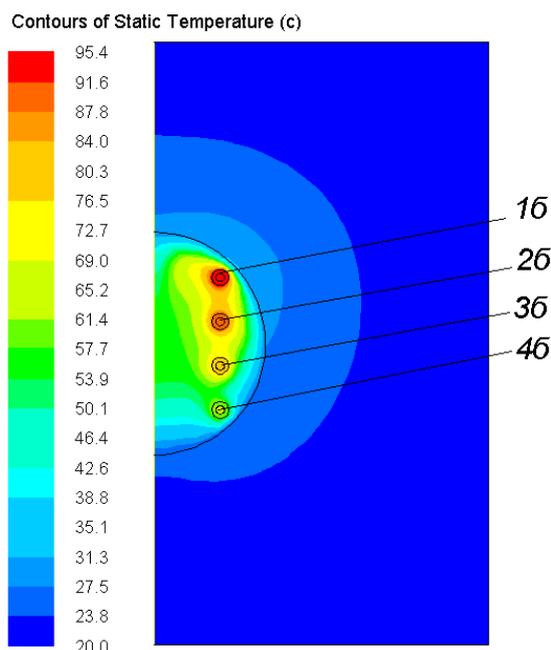


Рис.7. Распределение температурных полей в кабельном канале: данные расчета по модели главы 2

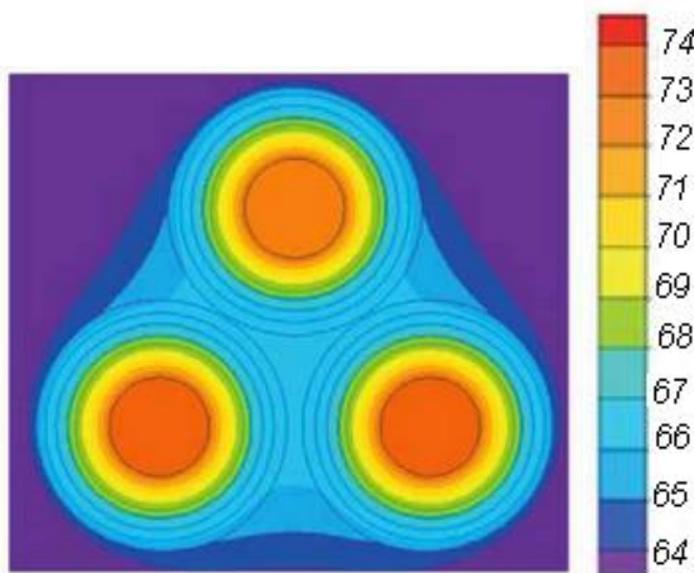


Рис.8. Температурное поле в кабельной линии, представленное в литературе

Для подтверждения достоверности полученных результатов численного моделирования были проведены экспериментальные исследования по измерению температурного поля в кабельном канале.

На рис. 10 показаны реальный кабельный канал и контрольные точки замера температуры (цифры «1» - «4»).

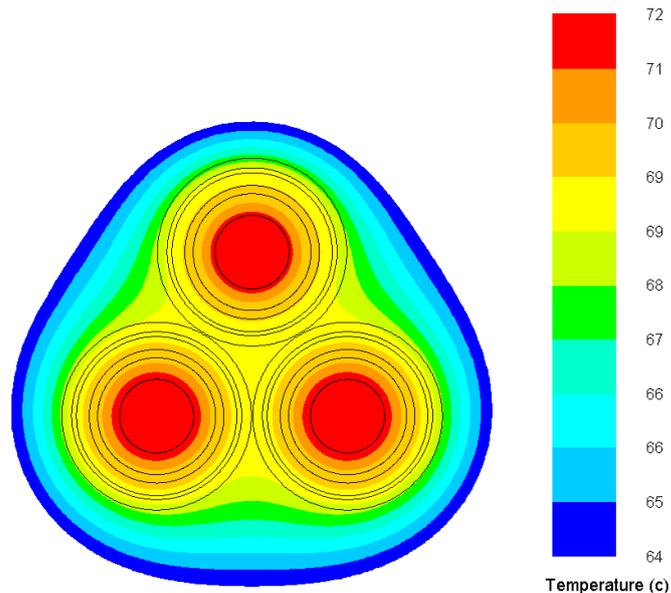


Рис.9. Температурное поле в кабельной линии, полученное из решения по модели главы 2.

Температура фиксировалась инфракрасным бесконтактным пирометром Raynger MX6. Измерение температуры в канале производилось на расстоянии 0,15 и 0,5 м от входа в канал. При сравнении результатов, полученных численно с помощью математической модели главы 2, с экспериментальными данными по температуре (рис. 11 и рис.12) видно, что наибольшее отклонение результатов в обоих случаях наблюдается в точке «3» (на поверхности линии [2]) и не превышает 7%.

Таким образом, предложенная в диссертационной работе математическая модель достаточно адекватно описывает процессы, происходящие в канале.



Рис. 11. Сравнение численных и экспериментальных результатов по температуре в точках «1» - «4» на расстоянии 0,15 м

Четвертая глава содержит результаты численных исследований процессов тепло-массопереноса и электромагнитодинамики в кабельном канале.

Для определения ряда закономерностей процессов тепло-массопереноса в канале рассмотрены процессы тепло-массопереноса для отдельной взятой кабельной линии. Были получены поля скоростей, температур, плотность тока в экранах и, как следствие, мощности дополнительных источников тепла. Анализируя поле скоростей воздуха в трубе (рис.14) видно, что скорости малы, критерий Рейнольдса при этом не превышает 900, что позволяет рассматривать ламинарный режим движения воздуха в трубе. Максимальная температура, достигаемая на жилах кабеля (равна 87,5°C) и не превышает допустимых значений (рис.13).

Поскольку величины токов, индуцированных в экранах силового кабеля, могут быть сопоставимы со значением тока, протекающего в жиле, то была проведена оценка вклада источника тепла, возникающего в экранах кабелей. Сравнение результатов расчета с учетом и без учета q_{v2} (соотношение (8)) показало, что значение температуры в том и другом случае отличается на 12°C, что является существенным основанием для определения реальной электрической нагрузки.

Результаты исследования температурного поля в канале при общей нагрузке всех кабельных линий представлены на рис.15.

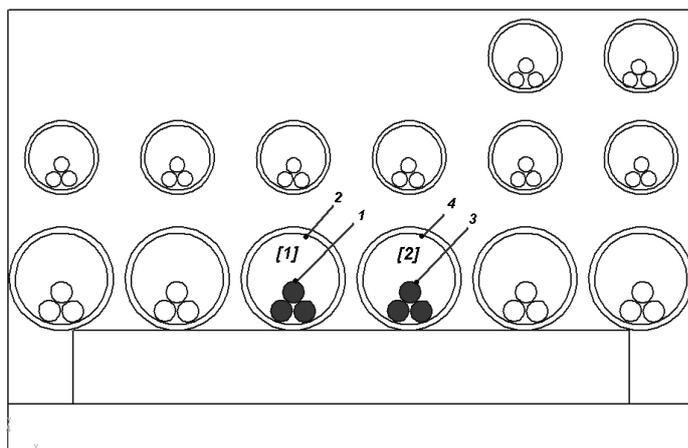


Рис. 10. Точки замера максимальной температуры в кабельном канале

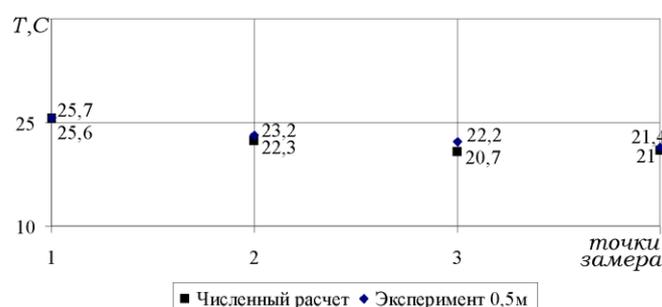


Рис. 12. Сравнение численных и экспериментальных результатов по температуре в точках «1» - «4» на расстоянии 0,5 м

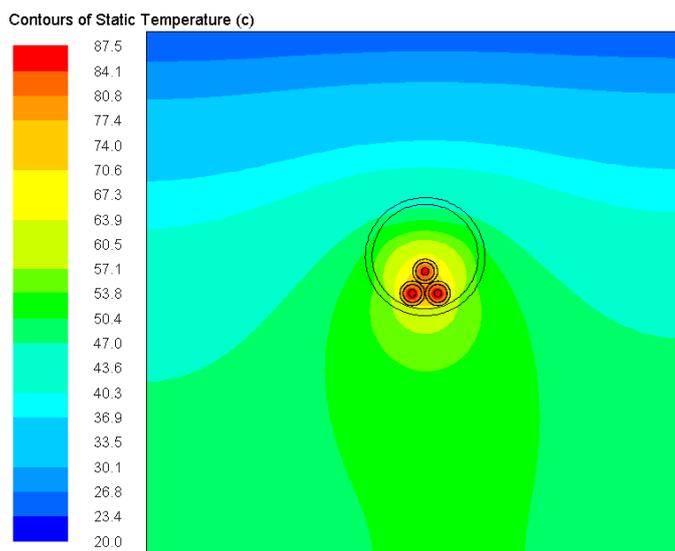


Рис.13. Температурное поле в кабельной трубе с учетом потерь в экране кабеля

Температурное поле в канале неоднородно. Максимальное значение температуры при полной равномерной загрузке всех линий достигает предельного значения 90°C .

Поскольку при реальной эксплуатации канала возможно нагружение только части кабельных линий, то ряд численных исследований позволил определить рациональные величины передаваемой мощности при различных режимах работы кабельных линий. С увеличением количества работающих линий значение суммарной мощности потерь в кабельных линиях возрастает, что, в свою очередь, приводит к увеличению температуры в канале и, как следствие, снижению значения тока (рис.16).

В зимнее время года возникает возможность увеличения передаваемой мощности на кабельные линии. Результаты численного исследования влияния климатических условий на температурное поле в кабельном канале показали, что при охлаждении грунта до отрицательных температур ток и, следовательно, передаваемая мощность могут быть увеличены на 20% (рис.17).

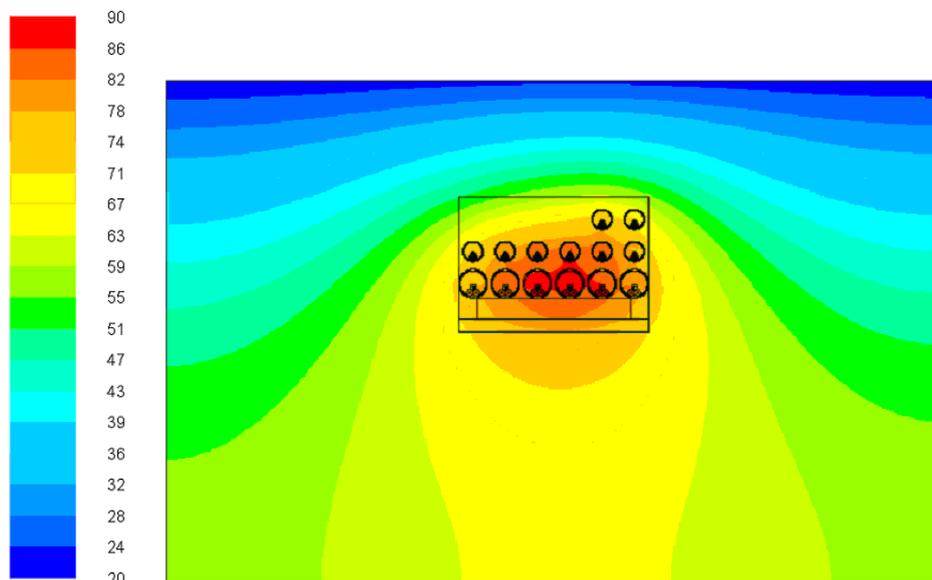


Рис.15. Температурное поле в кабельном канале

Разработанная математическая модель, позволяет моделировать процессы тепло-массопереноса и электромагнитодинамики в любых кабельных сооружениях с различными геометрическими параметрами кабелей и теплофизическими характеристиками используемых материалов, при различных условиях эксплуатации.

В диссертационной работе проведено численное исследование температурного поля в коллекторе, где размещено 8 трехфазных кабельных линий.

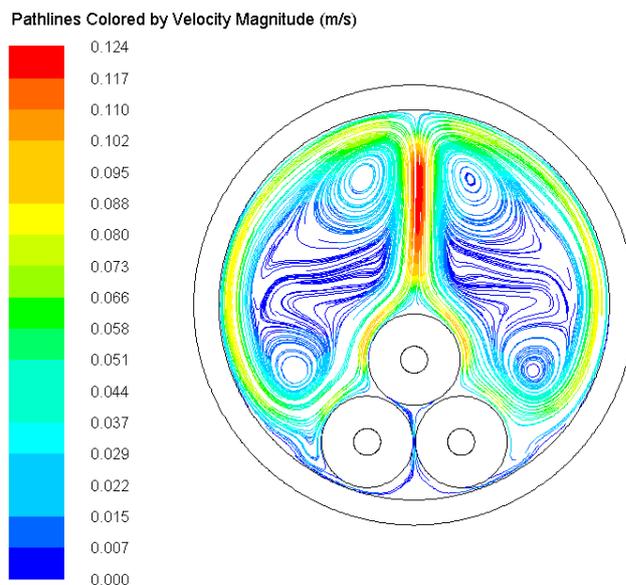


Рис.14. Поле скоростей в кабельной трубе

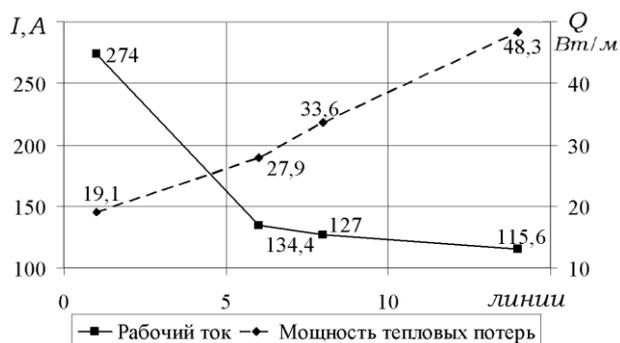


Рис. 16. Зависимость рабочего тока и суммарной мощности тепловых потерь в канале от количества работающих линий

В существующем темпе глобализации городских инфраструктур невозможно обойтись без дополнительного уплотнения коллекторов линиями. С этой целью специалистами Пермских городских электрических сетей было предложено использовать двухуровневую прокладку кабельных линий в коллекторе (рис.18). Однако численный анализ процессов тепломассопереноса в коллекторе с уплотнением показал невозможность его загрузки на полную мощность, поскольку в этом случае значение максимальной температуры превышает допустимую (90°C) и может привести к пробое изоляции. Для эффективного использования внутреннего пространства подземных сетей предложен вариант прокладки восьми кабельных линий в уменьшенном по габаритам коллекторе с той же суммарной передаваемой мощностью, при этом значения температур на поверхности жил оставались в пределах допустимых.

При эксплуатации коллектора достаточно часто возникают ситуации, когда работающая линия переходит в режим повышенной нагрузки. В этом случае важно знать время работы линий в перегрузочном режиме до достижения предельных значений температур. С этой целью был рассмотрен нестационарный процесс тепломассопереноса в коллекторе при длительно работающей линии с максимально допустимым током и последующим повышением нагрузки. В результате численного исследования были определены поля температур, скоростей, время (23 ч), в течение которого возможно поддерживать повышенную токовую нагрузку без перегрева изоляции.

Таким образом, использование предложенных математических моделей и анализ численных результатов позволили сделать вывод о том, что геометрические особенности линий и сооружений, теплофизические свойства окружающей среды и используемых материалов, дополнительные тепловые потери в экранах кабелей, лучистый и конвективный теплообмен, условия эксплуатации оказывают значительное влияние на реализуемое температурное поле в кабельном сооружении, и как следствие — на величину пропускной способности силовых кабелей.

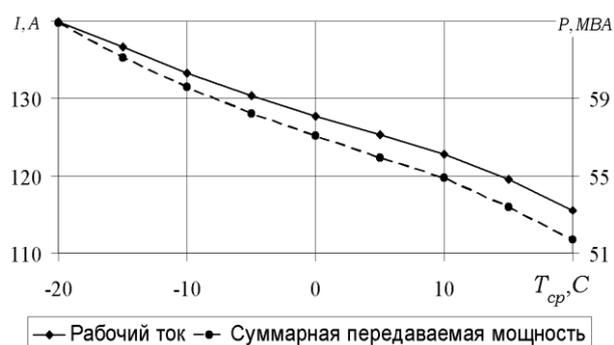


Рис.17. Зависимость тока и суммарной передаваемой мощности в канале от температуры массива земли

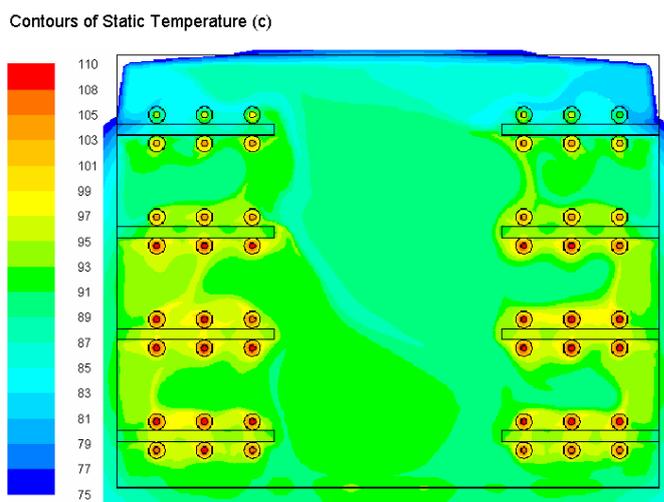


Рис. 18 Температурное поле внутри коллектора при двойном увеличении кабельных линий

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Построена новая двумерная нестационарная математическая модель процессов тепломассопереноса кабельных линий, проложенных в кабельных каналах, с учетом зависимостей теплофизических свойств используемых материалов от температуры в условиях естественной конвекции с учетом энергии излучения.
2. Построена двумерная математическая модель электро - и магнитодинамики для учета дополнительного источника тепла, возникающего в металлических экранах кабельных линий.
3. Разработан и алгоритм для численной реализации совместного решения задач теплообмена и электродинамики и определения температурного поля в кабельном канале.
4. На основе предложенных математических моделей разработан и зарегистрирован (в соавторстве) «Программный комплекс по расчету процессов тепломассопереноса в кабельных линиях с учетом зависимостей теплофизических свойств от температуры» («Layers»).
5. Определено влияния геометрических особенностей кабельных линий и кабельных сооружений, свойств окружающей среды, тепловых потерь в металлических экранах кабелей, лучистого и конвективного теплообмена, условий эксплуатации на температурное поле в кабельном сооружении и величину пропускной способности силовых кабелей. Приведены рекомендации по рациональному распределению нагрузки по кабельным линиям в зависимости от условий эксплуатации.
6. Полученные в ходе исследования результаты, приняты к использованию на ПО «Пермские городские электрические сети».

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Численное исследование температурного поля в кабельных линиях для анализа возможности уплотнения кабельного канала / Е.Ю.Навалихина, Н.М.Труфанова // Электротехника. – 2014. – №11. – С.11–14.
2. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Математическое моделирование тепловых и электромагнитных процессов при определении допустимых токовых нагрузок кабельных линий / Е.Ю.Навалихина, Н.М.Труфанова // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т.325. – №4. – С. 82–90.
3. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Компьютерная модель процессов тепломассопереноса в кабельном канале при различных режимах работы кабельных линий / Е.Ю.Навалихина, Н.М.Труфанова // Фундаментальные исследования. – 2014. – №9. – Ч.5. – С. 988–992.
4. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Выбор допустимых токовых нагрузок силовых кабелей, расположенных в кабельных каналах с учетом тепловых потерь в защитных металлических экранах / Е.Ю.Навалихина, Н.М.Труфанова // Электротехника. – 2013. – №11. – С.6–9.
5. Навалихина Е.Ю. Численное исследование нестационарного режима работы кабельных линий, проложенных в подземном канале // Е.Ю.Навалихина // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – №3. – С.38–41.

6. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Математическое моделирование и управление пропускной способностью кабельных линий в подземном канале / Е.Ю.Навалихина, Н.М.Труфанова // Электротехника. – 2012. – №11. – С.11–14.

7. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Управление токовой нагрузкой линий в кабельном канале с учетом сложного теплообмена / Е.Ю.Навалихина, Н.М.Труфанова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т.14. – №4 (5). – С. 1318–1321.

8. Навалихина Е.Ю., Щербинин А.Г., Труфанова Н.М., Савченко В.Г. Определение эксплуатационных характеристик кабелей, проложенных в земле / Е.Ю. Навалихина, А.Г. Щербинин, Н.М. Труфанова, В.Г. Савченко // Электротехника. – 2011. – №11. – С. 16–20.

Публикации в прочих изданиях

9. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Математическое моделирование нестационарных процессов теплопереноса в кабельном канале с учетом потерь в экранах кабелей / Е.Ю. Навалихина, Н.М. Труфанова // Тезисы докладов XIX Зимней школы по механике сплошных сред. – 2015. – С. 218

10. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М., Марковский М.В. Математическое моделирование нестационарных процессов теплопереноса / Е.Ю. Навалихина, Н.М. Труфанова, М.В. Марковский // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – №11. – С.55 –66.

11. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Развитие теоретических основ процессов конвективного теплообмена в кабельном канале / Е.Ю. Навалихина, Н.М. Труфанова // Материалы XVIII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным системам. – 2013. – С. 633 – 635

12. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Математическое моделирование сложного теплообмена в кабельном канале, проложенном в земле / Е.Ю. Навалихина, Н.М. Труфанова // Тезисы докладов XVIII Зимней школы по механике сплошных сред. – 2013. – С. 253.

13. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Влияние естественной и вынужденной вентиляции на процессы, протекающие в кабельном канале / Е.Ю.Навалихина, Н.М.Труфанова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2012. – №6. – С. 130–137.

14. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Исследование конвективного теплообмена в кабельном канале, проложенном в земле / Е.Ю.Навалихина, Н.М.Труфанова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2012. – №3. – С.93–103.

Подписано в печать 30.06.2015. Формат 60×90/16.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 1033/2015

Отпечатано с готового оригинал-макета

в типографии центра «Издательство ПНИПУ»

Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.

Тел. (342) 219-80-33.