

На правах рукописи



ХИСАМЕТДИНОВ Фиргат Зайнуллович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАТОДНОЙ
ЗАЩИТЫ ТРУБОПРОВОДОВ С УЧЕТОМ ИНТЕРВАЛЬНОЙ
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ИСХОДНЫХ ДАННЫХ**

Специальность:

**05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Уфа – 2019

Работа выполнена на кафедре информационных технологий
и компьютерной математики Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Башкирский государственный университет»

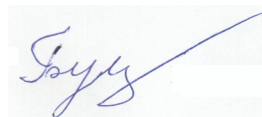
- Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Болотнов Анатолий Миронович
ФГБОУ ВО «Башкирский государственный
университет», кафедра
информационных технологий и компьютерной
математики, профессор.
- Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Савенкова Надежда Петровна
ФГБОУ ВО «Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова», факультет
вычислительной математики и кибернетики,
лаборатория математического моделирования в
физике, ведущий научный сотрудник.
- доктор физико-математических наук, доцент
Дильман Валерий Лейзерович
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный
университет (национальный исследовательский
университет)», кафедра «Математический анализ
и методика преподавания математики», заведую-
щий кафедрой.
- Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Тюменский государственный
университет», г. Тюмень.

Защита диссертации состоится 23 мая 2019 г. в 12⁰⁰ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.288.06 на базе ФГБОУ ВО «Уфимский
государственный авиационный технический университет» по адресу:
450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО
«Уфимский государственный авиационный технический университет» и на
сайте www.ugatu.ac.ru.

Автореферат разослан « » 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.288.06
доктор физико-математических наук, профессор



Г.Т. Булгакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Подземные магистральные трубопроводы имеют большую протяженность и эксплуатируются в различных климатических условиях, в грунтах различной коррозионной активности, при низких и высоких температурах и т. д. Все участки трубопровода в разной степени подвергаются коррозионному воздействию окружающей среды, что сокращает срок его эксплуатации, нанося экономический ущерб, а также представляя значительную экологическую угрозу.

В настоящее время для защиты от коррозии подземных трубопроводов применяют системы катодной защиты (СКЗ). Принцип действия СКЗ заключается в смещении электрического потенциала металла защищаемого сооружения в отрицательном (катодном) направлении относительно потенциала свободной коррозии (U_e). Сумму потенциала U_e и катодного смещения потенциала объекта, находящегося под действием СКЗ, называют защитным потенциалом. Эффективность работы СКЗ будет обеспечена лишь в том случае, когда защитный потенциал на каждом участке трубопровода находится в заданном интервале значений, зависящем от типа сооружения.

Одной из задач проектирования и эксплуатации СКЗ является выбор таких параметров, при которых будет обеспечен требуемый защитный потенциал с помощью минимального тока. На защитный потенциал оказывают влияние ряд факторов: неравномерность износа изоляции трубы, электрохимическая неоднородность грунта, электрическое влияние защитных заземлений катодной станции (ЗЗКС) и др.

Актуальной проблемой является диагностика и прогнозирование коррозионного состояния трубопровода. В процессе эксплуатации трубопровода происходят необратимые изменения свойств изоляции, что оказывает влияние на эффективность СКЗ. В связи с этим информация о текущем состоянии изоляции является необходимым фактором функционирования СКЗ. На практике проводят измерения разности потенциалов «грунт-труба». При этом возникает задача интерпретации полученных результатов для оценки состояния изоляционного покрытия трубы. На основе полученных выводов принимается решение об изменении режимов работы СКЗ, либо о замене участка трубопровода.

Параметры, определяющие режим работы СКЗ, можно разделить на два типа: 1) величины, поддающиеся измерению с определенной точностью (ток, геометрические параметры); 2) параметры, значения которых существенно зависят от места и времени измерения. Например, сопротивление грунта изменяется в зависимости от времени года, влажности, температуры и т. п. Сопротивление изоляционного покрытия трубопровода зависит, кроме перечисленных факторов, также от продолжительности его эксплуатации. Для указанных, и некоторых других, характеристик СКЗ имеет место интервальная неопределенность, учет которой в математической модели позволил бы получать численные результаты, точнее отражающие реальные значения параметров СКЗ.

В настоящее время существует большая потребность в решении практиче-

ски важных задач, связанных с проектированием, выбором эффективных режимов работы СКЗ, диагностикой и прогнозированием коррозионного состояния трубопровода, при этом отдельные проблемы связаны с интервальной неопределенностью исходных данных. Эффективное решение указанных задач требует разработки новых и совершенствования существующих подходов, методов и алгоритмов для моделирования и численного исследования электрических полей СКЗ подземных трубопроводов.

Степень разработанности темы исследования. Конструктивные и технические особенности СКЗ – трехмерность и неограниченность области, большая протяженность электродов, электрохимическая неоднородность среды и т.д., ограничивают применимость многих классических методов математического моделирования и численного исследования потенциальных физических полей: сеточных, граничных интегральных уравнений, на основе специальных функций и других.

Для расчета параметров СКЗ продуктивными оказались подходы, основанные на идее дискретизации линейного участка трубопровода. Впервые подобный подход предлагается в работах В.Н. Ткаченко, при этом распределение потенциала в грунте определялось на основе эмпирических зависимостей. Метод дискретизации, с некоторыми модификациями, применен в работах А.С. Глазкова, В.В. Иваненкова, С.А. Никулина и др.

В работах А.М. Болотнова предложен метод дискретизации, названный методом фиктивных источников (МФИ), в котором применяется принцип электростатической аналогии, позволяющий отказаться от использования эмпирических зависимостей в математической модели электрического поля СКЗ. В диссертационном исследовании С.Р. Гарифуллиной этот метод применен для расчета параметров СКЗ трубопровода с протяженным гибким анодом, однако, в рассмотренной постановке модели не учитывается электрохимическая неоднородность грунта, а также влияние ЗЗКС. Исследования, посвященные проблеме неопределенности параметров технических систем, чаще всего основываются на вероятностном подходе, либо на теории нечетких множеств. Например, в работах Н.П. Глазова, М.А. Башаева рассматриваются вероятностные модели распределения параметров СКЗ трубопроводов. Возможности интервального анализа для численного исследования параметров СКЗ трубопроводов ранее не применялись.

Таким образом, существует актуальная задача разработки и совершенствования инструментов численного исследования коррозионного состояния трубопроводов для увеличения срока их службы.

Цель работы – разработка численно-аналитических методов, алгоритмов расчета, комплекса программ, математическое моделирование и численное исследование электрических полей СКЗ подземных трубопроводов с учетом влияния ЗЗКС, электрохимической неоднородности грунта и интервальной неопределенности исходных данных, обеспечивающих увеличения срока их службы.

Для достижения цели работы решаются следующие **задачи**:

1. Построение уточненной дискретной модели электрического поля СКЗ,

учитывающей геометрическую форму принимаемых в МФИ условных фрагментов трубопровода, влияние ЗЗКС, электрохимическую неоднородность грунта для разработки численно-аналитического метода расчета электрических параметров СКЗ трубопровода (п. 3 паспорта специальности 05.13.18).

2. Разработка алгоритмов численного исследования состояния изоляции трубопровода на основе измерений разности потенциалов «грунт-труба» (п. 3 паспорта специальности 05.13.18).

3. Разработка алгоритмов расчета электрических параметров СКЗ подземных трубопроводов с учетом интервальной неопределенности исходных данных (п. 3 паспорта специальности 05.13.18).

4. Разработка комплекса программ для расчета параметров СКЗ подземных трубопроводов, проведение вычислительных экспериментов, показывающих эффективность предлагаемых методов и алгоритмов (п. 4, 5 паспорта специальности 05.13.18).

Положения, выносимые на защиту:

1. Уточненная дискретная модель электрического поля СКЗ, и разработанный на ее основе численно-аналитический метод расчета электрических параметров СКЗ трубопровода, позволяющий в условиях МФИ учитывать геометрическую форму принятых условных фрагментов трубопровода, а также влияние ЗЗКС и электрохимическую неоднородность грунта [1–3, 6].

2. Вычислительный алгоритм определения электрического сопротивления изоляции трубопровода на основе результатов натуральных измерений разности потенциалов «грунт-труба» [1, 7].

3. Вычислительный алгоритм построения внешних интервальных оценок для защитного потенциала и плотности тока на границе «грунт-труба» в СКЗ трубопровода для случая интервально заданных сопротивлений грунта и изоляции трубопровода [2, 3].

4. Комплекс программ на языке C++ для персональных ЭВМ, реализующий предлагаемые в работе методы и алгоритмы [4, 5].

Научная новизна работы заключается в том, что:

1. Уточненная дискретная модель построена на основе МФИ и принципа электростатической аналогии, отличается тем, что в ней учитывается геометрическая форма принимаемых в МФИ условных фрагментов трубопровода и влияние ЗЗКС, а также применена эквивалентная электропроводность многослойного грунта, что позволило разработать новый численно-аналитический метод расчета параметров СКЗ, учитывающий влияние ЗЗКС и электрохимическую неоднородность грунта.

2. Вычислительный алгоритм определения электрического сопротивления изоляции трубопровода по результатам измерений разности потенциалов «грунт-труба» основывается на методе фиктивных источников, и отличается тем, что разработан на основе уточненной дискретной модели электрического поля СКЗ и предложенного численно-аналитического метода, что позволяет перейти от применяемых на практике для решения этой задачи эмпирических со-

отношений к строгой математической модели, основанной на принципах математической физики.

3. Вычислительный алгоритм построения внешних интервальных оценок защитного потенциала и плотности тока на границе «грунт-труба» основывается на уточненной дискретной модели электрического поля СКЗ и предложенном численно-аналитическом методе, отличается тем, что использует выявленные в результате вычислительных экспериментов закономерности для интервальных параметров СКЗ, и позволяет проводить численные исследования СКЗ трубопроводов с учетом интервальной неопределенности исходных данных.

4. Комплекс программ разработан на языке программирования C++ с использованием интегрированной среды CodeBlocks, отличается тем, что основан на предложенных вычислительных алгоритмах, и позволяет проводить численные исследования параметров СКЗ с учетом влияния ЗЗКС, электрохимической неоднородности грунта и интервальной неопределенности исходных данных.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что предлагаемые подходы могут быть применены для совершенствования математических моделей и разработки методов численного исследования параметров СКЗ.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанные методы и алгоритмы численного исследования электрических полей СКЗ, а также реализующий их комплекс программ, могут быть использованы для решения задач, возникающих как на этапе первоначального проектирования, так и в процессе эксплуатации СКЗ трубопроводов, таких, как: выбор эффективных режимов работы в условиях изменяющейся со временем электрохимической картины, диагностика коррозионного состояния защищаемой конструкции и изоляционных покрытий, выбор допустимых интервалов изменения для управляющих параметров СКЗ.

Методология и методы исследования. Рассматриваемые в работе математические модели, предлагаемые методы и алгоритмы основаны на теории уравнений математической физики, вычислительной математике и интервальном анализе. Программы разрабатывались на языке C++ для персональных ЭВМ.

Степень достоверности изложенных в работе результатов подтверждается соответствием полученных численных результатов данным натурных исследований в СКЗ на отдельных участках трубопроводов Республики Башкортостан. Предложенные алгоритмы протестированы на модельных задачах и результатах других исследований.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертации были представлены и обсуждались на научных семинарах и конференциях, соответствующих профилю специальности: 1) VIII Международной научно-практической конференции молодых учёных «Актуальные проблемы науки и техники» (Уфа, 2015); 2) VIII Международной школы-конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании» (Уфа, 2015); 3) Международной научно-практической конференции «Наука XXI века: открытия, инновации, технологии» (Смоленск, 2016); 4) XXIII Меж-

дународной научно-практической конференции «Новое слово в науке и практике: гипотезы и апробация результатов исследований» (Новосибирск, 2016); 5) XIII Международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития науки и технологий» (Белгород, 2016); 6) VIII Международной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике». (Санкт-Петербург, 2016); 7) Международной научно-практической конференции «Теоретические и прикладные проблемы современной науки и образования» (Курск, 2018), 8) научных семинарах факультета математики и информационных технологий БашГУ, Уфимского государственного авиационного технического университета.

Разработанные алгоритмы, комплекс программ и полученные результаты применялись при выполнении работ в рамках проекта Государственного задания в сфере науки «Развитие теории решения прямых и обратных коэффициентных, геометрических и граничных задач математической физики и ее приложения» (№АААА–А17–117040510250–6).

Личный вклад. В рамках данной работы А. М. Болотнову принадлежат постановка, общие подходы и методика исследования рассматриваемых задач. Личный вклад автора заключается в разработке численно-аналитического метода, алгоритмов, комплекса программ и проведении численных исследований параметров СКЗ подземных трубопроводов.

Публикации. Основные полученные результаты исследования опубликованы в 23 печатных работах, из которых 6 – в изданиях, входящих в перечень ВАК Министерства науки и высшего образования РФ. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 125 наименований и приложения. Общий объем диссертации с приложением составляет 164 страницы, в том числе 61 рисунок, 9 таблиц и 3 листинга с исходными кодами программ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследования, формулируется цели и ставятся задачи, излагается научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приводятся основные положения, выносимые на защиту и сведения об апробации работы.

В Главе 1 представлен обзор научной литературы по рассматриваемым в исследовании проблемам, проводится анализ работ, близких к теме диссертации. Рассмотрены общие проблемы моделирования и расчета электрических параметров СКЗ. В общем виде сформулирована математическая модель электрических полей СКЗ. Рассмотрен подход к проблеме расчета параметров СКЗ как к задаче с интервальной неопределенностью, приведены основные положения интервального анализа.

В Главе 2 на основе МФИ осуществляется построение уточненной дискретной модели электрического поля СКЗ, и разрабатывается численно-аналитический метод расчета электрических параметров СКЗ трубопровода, по-

зволяющий учитывать геометрическую форму принятых условных фрагментов трубопровода, а также влияние ЗЗКС и электрохимическую неоднородность грунта.

При построении модели система декартовых координат определена следующим образом (Рис. 1): ось Ox совмещена с осью трубопровода $0 \leq x \leq L$; плоскость $z = H_t$ совпадает с поверхностью земли; анод с силой тока I_0 расположен в точке $p_0 = (x_0, y_0, z_0)$; трубопровод подключен к катодной станции в точке $x = x_0$. Для учета влияния ЗЗКС введен точечный сток с силой тока I_s , расположенный в точке $p_s = (x_s, y_s, z_s)$.

Электрический потенциал $u = u(p)$ удовлетворяет уравнению Пуассона¹:

$$\operatorname{div}(\sigma(p) \operatorname{grad} u(p)) = I_0 \delta(p - p_0) - I_s \delta(p - p_s), \quad (1)$$

где $\sigma(p)$ – удельная электропроводность среды, См/м; $\delta(p)$ – функция Дирака.

На границе «грунт-труба» поставим условие

$$\left(u - c\sigma \frac{\partial u}{\partial n} \right) \Big|_{S_{gt}} = u_t, \quad (2)$$

где $c = c(x)$ – удельное сопротивление изоляции ($\text{Ом} \cdot \text{м}^2$), u_t – потенциал металла трубы. Т.к. длина трубы значительно превышает ее диаметр, считаем потенциал металла трубы зависящим только от продольной координаты: $u_t = u_t(x)$.

На границах-изоляторах S_{is} , соответствующих поверхности земли ($z = H_t$), левой и правой границам защищаемого участка трубы в грунте ($x = 0$, $x = L$), поставим граничное условие

$$\frac{\partial u}{\partial n} \Big|_{S_{is}} = 0. \quad (3)$$

В металле трубы для тока по направлению оси Ox выполняется закон Ома

$$j_t(x) = \sigma_{mt} \frac{du_t}{dx}, \quad (4)$$

где $j_t(x)$ – плотность тока, σ_{mt} – удельная электропроводность металла трубы.

В точке подключения катодной станции к трубе поставим условия

$$\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=x_0-0} - \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=x_0+0} = \frac{I_0 - I_s}{\sigma_{mt} S_{ms}}, \quad (5)$$

где S_{ms} – площадь металла в нормальном сечении трубы.

Для численного исследования параметров СКЗ переходим к дискретной модели. Трубопровод на участке $0 \leq x \leq L$ условно разбивается на M равных фрагментов, в каждом из которых все электрические параметры предполагаются постоянными (Рис. 1). С геометрическим центром $p_{t,i}$ ($i = 1, \dots, M$) каждого фрагмента ассоциирован точечный сток.

Таким образом, для каждого i -го фрагмента ($i = 1, \dots, M$) рассматриваются средние значения параметров:

$U_{tm,i}$ – потенциал металла трубы;

¹Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука. 1977. 736 с.

$U_{tg,i}$ – потенциал в грунте на границе с трубой;
 $I_{tg,i}$ – ток, втекающий через боковую поверхность трубы;
 $I_{tx,i}$ – продольный ток в металле трубы между соседними фрагментами;
 $U_{pr,i}$ – разность потенциалов «грунт-труба», защитный потенциал;
 C_i – электрическое сопротивление изоляционного покрытия.

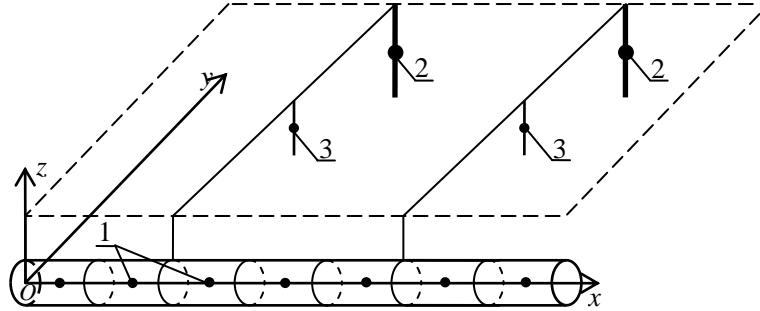


Рис. 1 – Схема СКЗ трубопровода и фиктивные источники, соответствующие: 1- фрагментам трубы, 2-заглубленному аноду, 3-ЗЗКС.

Для каждого фрагмента трубы запишем 1 закон Кирхгофа (Рис. 2):

$$\begin{aligned} I_{tg,1} - I_{tx,1} &= 0, \quad I_{tg,i} + I_{tx,i-1} - I_{tx,i} = 0, \quad i = 2, \dots, M-1, \quad i \neq i_{ks}, \\ I_{tg,i_{ks}} + I_{tx,i_{ks}-1} - I_{tx,i_{ks}} &= I_0 - I_s, \quad I_{tg,M} + I_{tx,M-1} = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Дискретный аналог закона Ома запишем в виде

$$U_{tm,i+1} - U_{tm,i} = -B_m I_{tx,i}, \quad (7)$$

где $B = \rho_t \cdot l_t / S_{ms}$ – продольное сопротивление металла трубы между соседними фрагментами, ρ_t – удельное сопротивление трубной стали, l_t – длина фрагмента.

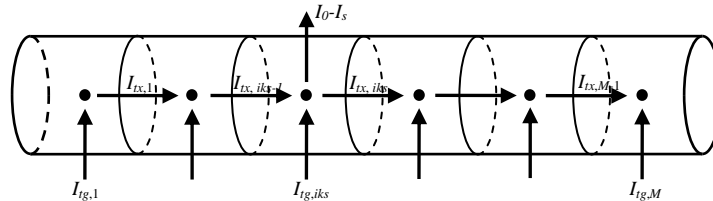


Рис. 2 – Схема направлений токов между фрагментами.

Дискретные аналоги граничного условия (2) имеют вид

$$U_{tg,i} - C_i I_{tg,i} / S_t = U_{tm,i}, \quad (8)$$

где S_t – площадь боковой поверхности фрагмента трубы.

Для защитного потенциала

$$U_{pr,i} = U_{tg,i} - U_{tm,i}. \quad (9)$$

Зависимость потенциала в грунте и токов от фиктивных источников, определяется на основе принципа электростатической аналогии²

$$4\pi\sigma U_{tg,i} = \sum_{k=1}^N \left(\frac{I_{a,k}}{R(p_{t,i}, p_{a,k})} - \frac{I_{s,k}}{R(p_{t,i}, p_{s,k})} \right) - \sum_{j=1}^M \frac{I_{tg,j}}{R(p_{t,i}, p_{t,j})}, \quad (10)$$

где $R(p,q)$ – расстояние между точками p и q .

Теорема. Средний электрический потенциал на границе «грунт-труба» условного фрагмента трубопровода длины l_t и радиуса r_t , создаваемый точечным

² Шимони, К. Теоретическая электротехника / К. Шимони – М.: Мир, 1964. 773 с.

источником силы I , выражается в виде

$$u_{cp, \text{мин}} = \frac{I}{4\pi\sigma l_t^2} \left(l_t \ln \frac{l_t + \sqrt{l_t^2 + r_t^2}}{-l_t + \sqrt{l_t^2 + r_t^2}} - 2\sqrt{l_t^2 + r_t^2} + 2r_t \right). \quad (11)$$

С учетом результата Теоремы, применяя модель плоскопараллельного многослойного грунта, выражение (10) можно записать в виде

$$4\pi U_{tg,i} = \frac{I_0}{\sigma_{i,i_{ks}}^{\text{ЭКВ}} R(p_{t,i}, p_0)} - \frac{I_s}{\sigma_{i,i_{ks}}^{\text{ЭКВ}} R(p_{t,i}, p_s)} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M \frac{I_{tg,j}}{\sigma_{i,j}^{\text{ЭКВ}} R(p_{t,i}, p_{t,j})} - \\ - \frac{I_{tg,i}}{\sigma_i l_t^2} \left(l_t \ln \frac{l_t + \sqrt{l_t^2 + r_t^2}}{-l_t + \sqrt{l_t^2 + r_t^2}} - 2\sqrt{l_t^2 + r_t^2} + 2r_t \right), i \neq i_{ks}, \quad (12)$$

$$4\pi U_{tg,i} = \frac{2I_0}{\sigma_i l_t} \ln \frac{l_t + \sqrt{\frac{l_t^2}{4} + h_a^2}}{h_a} - \frac{2I_s}{\sigma_i} \ln \frac{l_t + \sqrt{\frac{l_t^2}{4} + h_s^2}}{h_s} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M \frac{I_{tg,j}}{\sigma_{i,j}^{\text{ЭКВ}} R(p_{t,i}, p_{t,j})} - \\ - \frac{I_{tg,i}}{\sigma_i l_t^2} \left(l_t \ln \frac{l_t + \sqrt{l_t^2 + r_t^2}}{-l_t + \sqrt{l_t^2 + r_t^2}} - 2\sqrt{l_t^2 + r_t^2} + 2r_t \right), i = i_{ks},$$

где h_s – расстояние от ЗЗКС до трубы, h_a – от анода до трубы. Эквивалентная удельная электропроводность многослойного грунта определяется, как

$$\sigma_{i,j}^{\text{ЭКВ}} = l_t \left(\sum_{k=i}^j \sigma_k - (\sigma_i + \sigma_j) / 2 \right) / R(p_{t,i}, p_0),$$

где σ_k – удельная электропроводность слоя грунта $k = 1, \dots, M$.

Система (6)–(9), (12) содержит $5M-1$ неизвестных и имеет хорошо обусловленную матрицу. Для решения применяется метод Гаусса с выбором главного элемента. Проведены численные эксперименты на основе исходных данных реального трубопровода. Получена апостериорная оценка погрешности дискретизации с использованием правила Рунге. По алгоритму Эйткена-Ричардсона определено, что порядок точности метода равен 2. На основе результатов моделирования параметров СКЗ проведен многокомпонентный анализ (Рис.3) конечной последовательности вычисленных значений и экспериментально изучен характер поведения погрешности при изменении параметра дискретизации предлагаемого численно-аналитического метода. Проведенный анализ позволяет утверждать точность полученных численных результатов на уров-

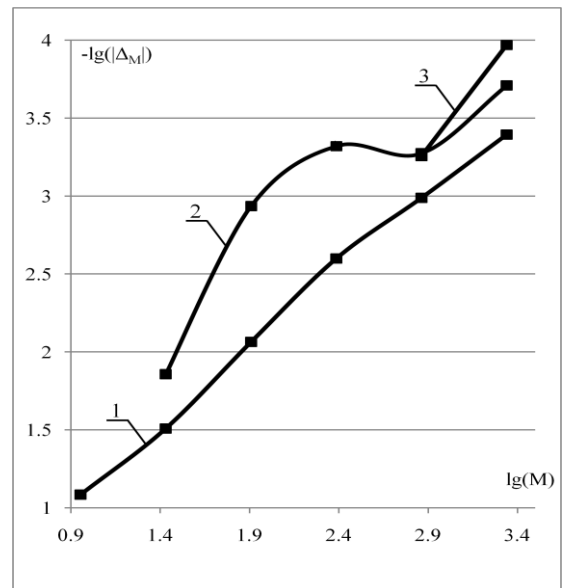


Рис. 3 – Оценка точности вычислений (1 – первая фильтрация, 2 – вторая, 3 – пятая фильтрация погрешности).

не 3-го знака³.

Глава 3 посвящена разработке алгоритма определения состояния изоляции трубопровода по результатам измерений разности потенциалов «грунт-труба».

Введем обозначение для «поверхностной проводимости» изоляции фрагмента трубы $\sigma_{gt,i} = 1/C_i$, тогда из (9) получим

$$U_{pr,i} \cdot \sigma_{gt,i} - I_{tg,i} / S_t = 0. \quad (13)$$

Система (6), (7), (9), (12), (13) позволяет, используя в качестве входных данных известные значения $U_{pr,i}$ определять сопротивление изоляционного покрытия C_i для каждого фрагмента трубы. Рассмотрена модельная задача и проведен эксперимент, состоящий из 2 этапов. На первом этапе была решена задача нахождения разности потенциалов «грунт-труба» при заданном сопротивлении изоляции трубы – «прямая задача». На основе полученных результатов были «смоделированы» результаты измерений: отобраны значения разности потенциалов «грунт-труба» с некоторым шагом. На 2 этапе полученные данные были использованы в качестве входных для задачи определения сопротивления изоляции трубы – «обратной задачи» (Рис. 4).

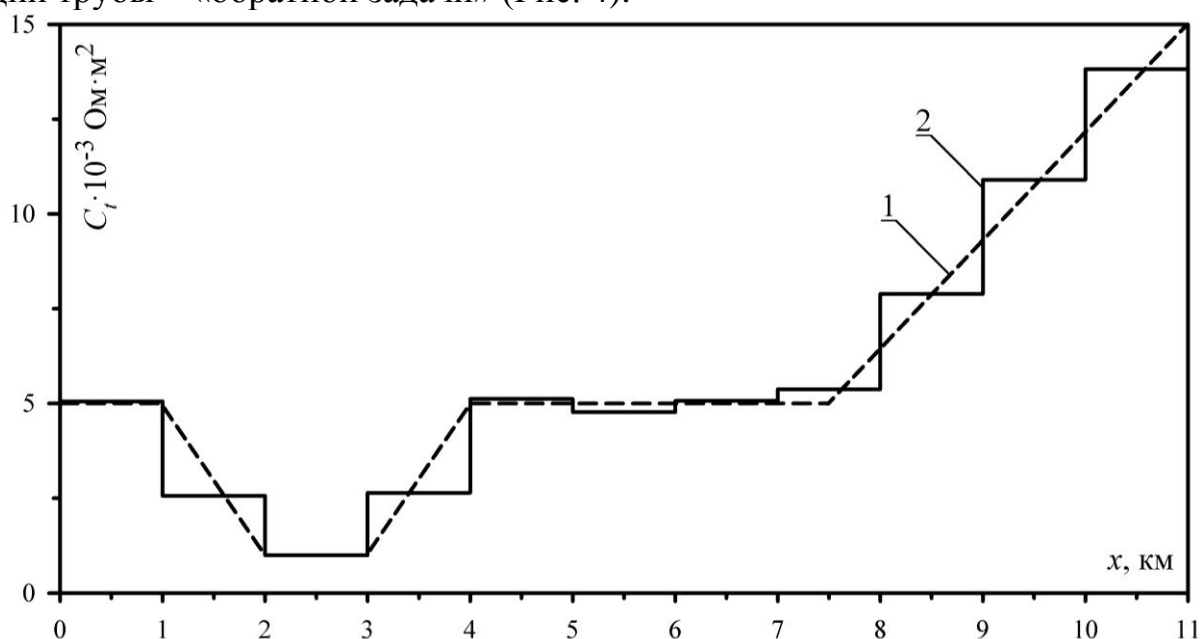


Рис. 4 – Сопротивление изоляции трубы: 1 – заданное модельное значение, 2 – полученное расчетное значение.

В расчетах использовался формат числа с плавающей запятой двойной точности. Относительная погрешность полученных численных результатов относительно модельного значения для числа принятых фрагментов $M = 11$ составила 7%, для $M = 44$ – около 3%. Норма вектора невязки составила 10^{-14} . Также проведены вычислительные эксперименты по расчету сопротивления изоляции реального трубопровода.

Глава 4 посвящена разработке алгоритмов исследования электрических полей СКЗ трубопроводов с учетом интервальной неопределенности отдельных

³ Zhitnikov V. P., Sherykhalina N.M., Sokolova A.A. Problem of Reliability Justification of Computation Error Estimates. Mediterranean Journal of Social Sciences, 2015, Vol. 6, No. 2, pp. 65 – 78. Doi:10.5901/mjss.2015.v6n2s4p65.

исходных данных: электрического сопротивления изоляции и грунта.

Переход к интервальной задаче осуществлен на основе системы (6)–(9), (12). Заменим σ и C_i их интервальными расширениями: $\sigma = (\underline{\sigma}, \overline{\sigma})$, $C_i = (\underline{C}_i, \overline{C}_i)$; остальные параметры будем считать интервалами нулевой ширины.

Обозначая интервальный вектор неизвестных

$$\mathbf{x} = (I_{ix,1} \dots I_{ix,M-1}, I_{ig,1} \dots I_{ig,M}, U_{ig,1} \dots U_{ig,M}, U_{im,1} \dots U_{im,M}, U_{pr,1} \dots U_{pr,M})^T,$$

(6)–(9), (12) можно записать в виде интервальной системы линейных алгебраических уравнений (ИСЛАУ)

$$A(\sigma, C_1, \dots, C_M) \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}. \quad (14)$$

Решением интервальной задачи (12) будем называть множество⁴

$$\mathbf{x} = \{x \in R^M : \exists \sigma \in \sigma, \exists C \in C_1, \dots, \exists C \in C_M, \exists \mathbf{b} \in \mathbf{b} : A(\sigma, C_1, \dots, C_M) \mathbf{x} = \mathbf{b}\}. \quad (15)$$

Практический смысл имеет внешняя интервальная оценка множества (15) – минимальный гиперобъем, целиком содержащий все его элементы.

В силу теоремы Бека-Никеля интервальное решение можно получить путем решения всех возможных точечных систем для различных граничных комбинаций параметров σ и C_i и построить внешнюю оценку покомпонентным отбором максимальных и минимальных значений. Проведенные вычислительные эксперименты позволили выяснить, что:

1. Верхняя и нижняя границы внешней оценки для $\overline{U}_{pr} = (U_{pr,1}, \dots, U_{pr,M})^T$ есть решения точечных вариантов системы (12), когда сопротивления изоляции всех фрагментов одновременно равны верхней либо одновременно равны нижней границе соответствующих интервалов C_i .

2. Верхняя и нижняя границы внешней оценки для $\overline{I}_{ig} = (I_{ig,1}, \dots, I_{ig,M})^T$ есть решения точечных вариантов системы (14), когда сопротивление изоляции для рассматриваемого фрагмента трубы принимает одно граничное значение интервала, а для всех остальных – противоположное.

С учетом приведенных замечаний разработаны алгоритмы построения внешней интервальной оценки для защитного потенциала и плотности тока на границе «грунт-труба». Учитывая вычислительную ресурсоемкость метода Гаусса, общий объем вычислений составит $(4M+4) \cdot (2(5M-1)^3/3 + (5M-1)^2)$ арифметических операций. Например, при $M = 200$ предложенный алгоритм потребует порядка $5 \cdot 10^{11}$ арифметических операций.

На основе предложенных алгоритмов разработана программа и проведены вычислительные эксперименты. На Рис. 5, 6 приведены некоторые полученные результаты (1 – верхняя, и 2 – нижняя границы интервалов, 3 – среднее значение). При выборе $M = 243$ условных фрагментов трубы время работы программы для персональной ЭВМ (процессор Intel Core i5 – 3 ГГц, ОЗУ 4 Гб, ОС Windows 7 – 32 разрядная) составило 2 часа 10 мин.

⁴Шарый С. П. Конечномерный интервальный анализ. Новосибирск, ИВТ. СО РАН, 2013. 606 с.

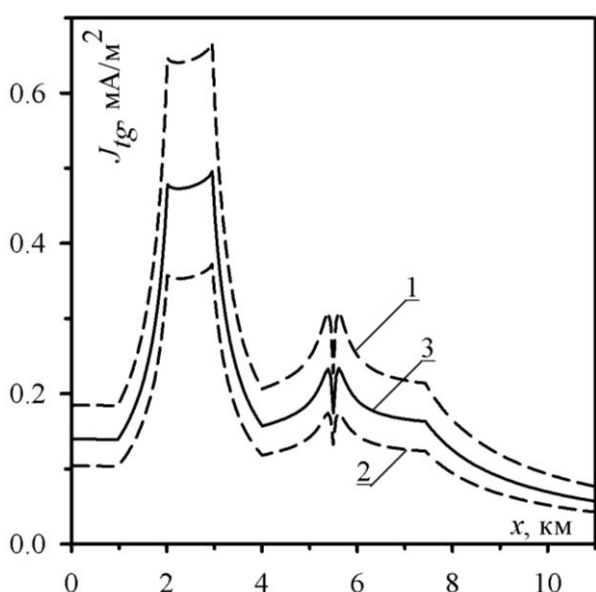


Рис. 5. Внешняя оценка для плотности тока на границе «грунт-труба».

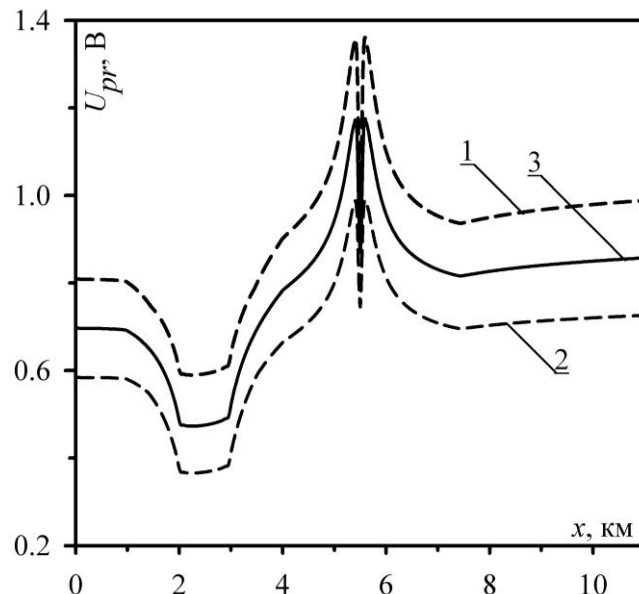


Рис. 6. Внешняя оценка для защитного потенциала.

Пятая глава посвящена разработке программного комплекса на языке C++ с использованием интегрированной среды разработки CodeBlocks. Приводится описание разработанных программ: структура организации входных данных, формат вывода результатов, основные программные модули и компоненты, блок-схемы алгоритмов работы (Рис. 7).

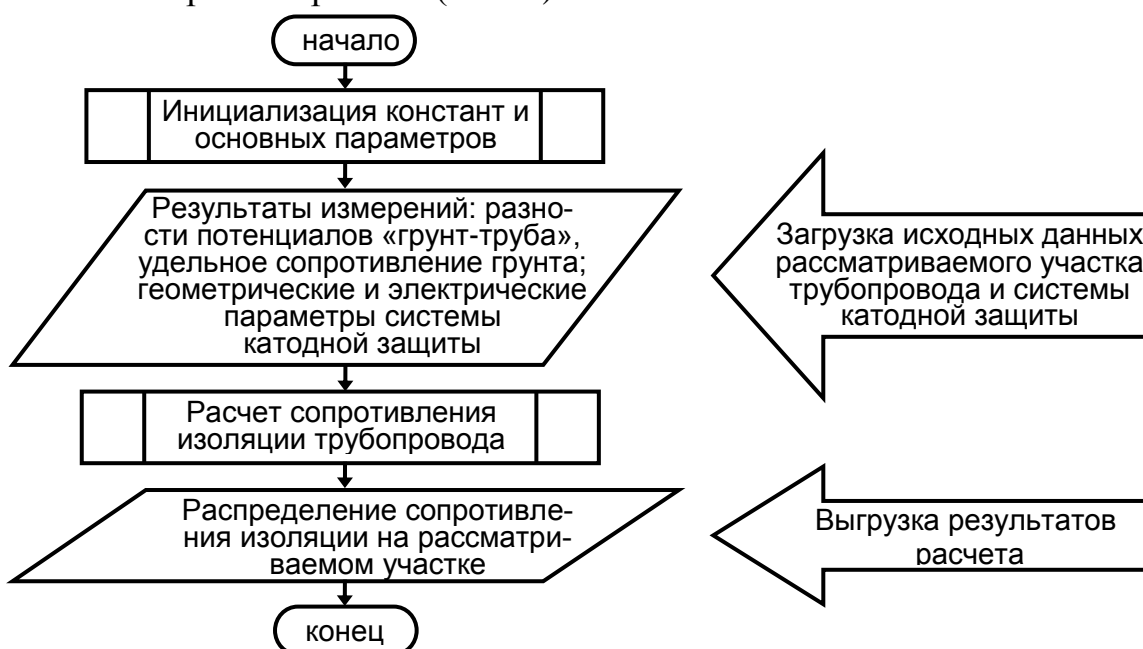


Рис. 7. Общая схема алгоритма расчета сопротивления изоляции трубы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

1. Уточненная модель электрического поля СКЗ трубопровода и разработанный численно-аналитический метод отличаются тем, что позволяют рассчитывать электрические параметры СКЗ с учетом геометрической формы принятых в МФИ условных фрагментов трубопровода, влияния ЗЗКС и электрохимической неоднородности грунта. В ходе вычислительных экспериментов изучен характер поведения погрешности разработанного численно-аналитического ме-

тогда при изменении параметра дискретизации и определен его порядок точности. Проведенный анализ позволяет утверждать точность полученных численных результатов на уровне 3-го знака.

2. Разработанный вычислительный алгоритм определения электрического сопротивления изоляции трубопровода на основе результатов натуральных измерений разности потенциалов «грунт-труба» позволяет перейти от применяемых на практике эмпирических соотношений к строгой математической модели, основанной на принципах математической физики.

3. Разработанный вычислительный алгоритм построения внешних интервальных оценок основных электрических параметров СКЗ трубопровода позволяет получать численные результаты, отражающие неопределенность исходных данных.

4. Вычислительные эксперименты, проведенные с использованием комплекса программ, выявили закономерности, характеризующие электрические параметры СКЗ, что позволило получать внешние интервальные оценки для защитного потенциала и плотности тока на границе «грунт-труба».

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации, входящие в перечень ВАК и рекомендованные экспертным советом

1. Болотнов, А. М. Интервальные вычисления в алгоритмах расчета электрических полей катодной защиты магистральных трубопроводов / А. М. Болотнов, М. А. Башаев, Ф. З. Хисаметдинов // Системы управления и информационные технологии. – 2015. – № 4 (62). – С. 71–74.

2. Хисаметдинов, Ф. З. Компьютерное моделирование и визуализация параметров электрического поля катодной защиты подземного трубопровода / Ф. З. Хисаметдинов // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 9. – С. 126–130.

3. Болотнов, А. М. Численные исследования катодной защиты трубопроводов с учетом интервальной неопределенности в исходных данных / А. М. Болотнов, Ф. З. Хисаметдинов // Вестник УГАТУ. – 2018. – Т. 22, № 3 (81). – С. 105–113.

Другие публикации, входящие в перечень ВАК

4. Болотнов, А. М. Математическое моделирование и численное исследование электрических полей в системах с протяженными электродами / А. М. Болотнов, Н. П. Глазов, В. Д. Киселев, Ф. З. Хисаметдинов // Вестник Башкирского университета. – 2006. – Т. 11, № 2. – С. 17–21.

5. Болотнов, А. М. Применение компьютерного моделирования для интерпретации данных контрольных измерений в системах катодной защиты трубопроводов / А. М. Болотнов, Ф. З. Хисаметдинов // Вестник Башкирского университета. – 2015. – Т. 20, № 3. – С. 786–789.

6. Болотнов, А. М. Определение сопротивления изоляции трубопровода по результатам измерений разности потенциалов «грунт-труба» / А. М. Болотнов, Ф. З. Хисаметдинов // Вестник Башкирского университета. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 20–24.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

7. Хисаметдинов, Ф. З. Исследование состояния изоляции трубопровода по данным натуральных измерений электрического поля / Ф. З. Хисаметдинов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016660596 от 16.09.2016 г.

8. Болотнов, А. М. Расчет параметров катодной защиты трубопровода с учетом интервальной неопределенности в исходных данных / А. М. Болотнов, Ф. З. Хисаметдинов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016660595 от 16.09.2016 г.

В других изданиях

9. Хисаметдинов, Ф. З. Компьютерное моделирование особенностей распределения защитного потенциала подземного трубопровода вблизи катодной станции / Ф. З. Хисаметдинов // Электротехнические системы и комплексы. – 2015. – № 4 (29). – С. 31–34.

10. Болотнов, А. М. Компьютерное моделирование электрических полей катодной защиты подземных трубопроводов / А. М. Болотнов, Ф. З. Хисаметдинов // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2015. – Т. 3, № 1. – С. 2–8.

11. Болотнов, А. М. Компьютерное моделирование катодной защиты трубопроводов с учетом интервальных неопределенностей в исходных данных / А. М. Болотнов, М. А. Башаев, Ф. З. Хисаметдинов // Информационные технологии моделирования и управления. – 2015. – № 5(95). – С. 429–435.

12. Болотнов, А. М. Определение состояния изоляции трубопровода по результатам измерений потенциала / А. М. Болотнов, Ф. З. Хисаметдинов // Научное периодическое издание «Ceteris Paribus». – Москва, 2016. – № 5. – С. 5–9.

13. Болотнов, А. М. Компьютерное моделирование электрических полей в системах катодной защиты трубопроводов с поврежденной изоляцией / А. М. Болотнов, Ф. З. Хисаметдинов // Доклады Башкирского университета. – 2016. – Т. 1, № 1. – С. 7–13.

14. Хисаметдинов, Ф. З. Исследование распределения параметров электрических полей катодной защиты трубопровода с применением компьютерного моделирования / Ф. З. Хисаметдинов, И. С. Гумеров // Вестник СИ БашГУ. – 2016. – № 4. – С. 48–51.

15. Болотнов, А. М. Алгоритм расчета сопротивления изоляции подземного трубопровода на основе данных измерений защитного потенциала в системах катодной защиты / А. М. Болотнов, Ф. З. Хисаметдинов // Доклады Башкирского университета. – 2016. – Т. 1, № 3. – С. 493–501.

Общее количество публикаций по теме диссертации составляет 23 работы. В данном разделе приведены основные работы.

Диссертант

