

РГП «Институт математики и математического моделирования» КН МОН РК



**НАИМЕНОВАНИЕ
ПРОЕКТА**

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА

**ГОДЫ ПРОЕКТА
СУММА
ФИНАНСИРОВАНИЯ**

Задачи со свободной границей в математических моделях электроконтактных явлений

д.ф.-м.н., академик НАН РК
Харин Станислав Николаевич

2021 – 2023

54 930 257,00 тенге:
2021 – 17 675 083,00 тнг, 2022 – 18 260 349,00 тнг, 2023 – 18 994 825,00 тнг

РЕФЕРАТ (АБСТРАКТ) ПРОЕКТА

Задачи теплопроводности в областях со свободной границей относятся к числу наиболее сложных проблем математической физики, решение которых необходимо для прогресса во многих областях практики, таких как металлургия, технологии с использованием низкотемпературной плазмы, авиатехника, нефтедобыча, водное хозяйство и ряд других. С математической точки зрения эти задачи относятся к числу наиболее сложных нелинейных проблем теории параболических уравнений, в которых наряду с искомыми решениями уравнений необходимо также найти неизвестные подвижные границы областей задания этих уравнений.

Необходимость интенсификации исследований в области нестационарных электроконтактных процессов, в частности, процессов эрозии при короткой дуге неоднократно отмечалась Международным Комитетом IEEE CPMT TC-1, который координирует все мировые исследования в области электрических контактов и проводит ежегодные международные Хольмовские конференции по явлениям в электрических аппаратах. Научный руководитель данного проекта проф. С.Н. Харин был удостоен Международной Хольмовской премии за разработку нестационарных моделей процессов тепло и массообмена в электрических контактах (Сан Диего, США, 2015 г.)

Основная идея проекта состоит в использовании современных средств математического моделирования для исследования быстропротекающих теплофизических процессов с фазовыми переходами (размягчение, плавление, сваривание и дуговая эрозия) в электроконтактных системах, изучение которых экспериментальными методами затруднительно, а иногда и просто невозможно. Проблемы, возникающие в процессе моделирования связаны с особым типом нелинейности, когда неизвестная свободная граница входит не только в условие Стефана, но и в само дифференциальное уравнение теплопроводности, а теплофизические коэффициенты уравнения также зависят от искомой температуры. Разработка методов решения таких задач и их экспериментальная верификация позволит выявить главные факторы, влияющие на динамику коммутационных процессов, и дать практические рекомендации по оптимизации электроконтактных систем.

ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основными результатами проекта станут новые математические модели, с помощью которых можно провести анализ динамики электроконтактных процессов в ходе полного коммутационного цикла, включая процессы в замкнутых, размыкающихся и замыкающихся контактах. Все результаты проекта, включая конкретные алгоритмы решения задач, будут переданы заинтересованным организациям, которые занимаются разработкой низковольтных электрических аппаратов. Ряд предприятий по низковольтной аппаратуре в Казахстане, таких как ABB, Euroelectric, Alageum electric, Электрокомплект и другие могут использовать результаты наших исследований в своей деятельности.

ЦЕЛЬ ПРОЕКТА

- 1) Разработать и исследовать математические модели динамики процессов с фазовыми переходами, протекающие при коммутации электрических контактов в цепях переменного тока;
- 2) Разработать методы решения соответствующих краевых задач со свободными границами и на их основе провести анализ влияния различных факторов на динамику процесса коммутации для выбора оптимальных параметров и режимов коммутации.

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТА

Модель динамики нагрева замкнутых контактов при переменном токе.

Эта модель базируется на системе дифференциальных уравнений для температуры и электрического потенциала. Аналитическое решение этой задачи планируется использовать затем в качестве начального условия для следующего этапа размыкания. Будет разработана также модель самопроизвольного отброса замкнутых электрических контактов при пропускании токов короткого замыкания, которая описывается задачей Стефана для системы тел, состоящей из диска короткой дуги и сферического полупространства, занимаемого электродом. Решение этой задачи планируется получить, используя принцип подобия для уравнения теплопроводности.

Пространственная осесимметричная модель динамики тепловых процессов в жидкометаллическом электроконтактном мостике при переменном токе

Рассматривается задача с двумя неизвестными подвижными границами, одна из которых является поверхностью фазового перехода, а вторая описывает поверхность мостика. Решение соответствующей цилиндрической задачи Стефана будет базироваться на методе пространственных тепловых полиномов. Для решения второй задачи, определяющей форму поверхности мостика, будет использоваться вариационный метод. Полученное решение будет использовано для расчета мостиковой эрозии контактов, а его результаты будут сопоставлены с имеющимися экспериментальными данными.

Математические модели дуги размыкания и замыкания электрических контактов

Модель для следующего этапа размыкания контактов, который начинается с момента взрыва мостика и зажигания электрической дуги, описывает динамику ее взаимодействия с контактом. Новым элементом в этой модели является описание приэлектродных процессов и перехода металлической фазы дуги в газовую фазу на базе пространственной осесимметричной задачи Стефана в конической области.

Модель, описывающая динамику замыкания контактов, базируется на задаче Стефана для системы тел, состоящей из контактного микровыступа и цилиндрического полупространства. Решение этих задач предполагается получить с помощью тепловых полиномов и специальных функций. Его экспериментальная верификация будет проведена нашими партнерами в Англии и Польше в рамках имеющегося договора о коллаборации.

Квантовые алгоритмы дискретного и непрерывного оператора переменных и объясняемые квантовые нейронные сети для решения краевых задач со свободной границей

Осуществляется новый подход к решению задач с подвижной границей, основанный на квантовых алгоритмах. Он позволяет найти квантовое состояние, волновая функция которого пропорциональна конкретному решению неоднородных уравнений в частных производных в областях с подвижными границами и обеспечивают экспоненциальное ускорение вычислений по сравнению с их классическими аналогами. Кроме того, будет намечен новый подход к решению рассматриваемых задач с помощью квантовых нейронных сетей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

 математическое моделирование, температурные и электромагнитные поля, модели электроконтактных процессов, задача Стефана, квантовые алгоритмы

ДОСТИГНУТЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

✚ Закончено изучение пространственной цилиндрической модели динамики тепловых процессов в жидкометаллическом электроконтактном мостике при переменном токе. Построена модификация решения задачи Стефана для переменного тока и цилиндра с подвижным радиусом.

✚ Рассмотрены задачи со свободной границей для моделирования процессов в электрической дуге при размыкании контактов: а) разработаны методы расчета температурных полей в процессе взаимодействия дуги с электродами; б) построена модель перехода металлической дуги в газовую фазу в случае переменного тока.

✚ Рассмотрены задачи со свободной границей при замыкании контактов; исследована осесимметричная модель процесса зажигания дуги при замыкании контактов, плавления контактной зоны, вибрации и сваривания контактов.

ЧЛЕНЫ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ГРУППЫ

№	Фамилия И.О.	Должность	Researcher ID
1	Харин С.Н.	Рук. проекта	AAR-2356-2020
2	Кавокин А.А.	ГНС 0,5 ст.	ABA-3640-2021
3	Шпади Ю.Р.	ГНС .	AAR-3322-2020
4	Кулахметова А.Т.	ВНС	
5	Хайруллин Е.М.	ВНС 0,25 ст.	
6	Сарсенгельдин М.М.	ВНС 0,5 ст.	
7	Касабек С.А.	НС 0,5 ст.	
8	Наурыз Т.А.	МНС 0,5 ст.	AAD-3279-2019
9	Кулахметова Д.С.	МНС 0,25 ст.	

КОЛИЧЕСТВО ПУБЛИКАЦИЙ ПО ПРОЕКТУ

По результатам исследований с начала 2021 года опубликовано 8 научных статей, в том числе:

- ✚ 6 статей в международных рейтинговых журналах, входящих в БД Web of Science Clarivate Analytics и БД Scopus с импакт-фактором;
- ✚ 1 статья в международных рейтинговых журналах (входящем в БД Web of Science Clarivate Analytics, Emerging Sources Citation Index) без импакт-фактора;
- ✚ 1 статья в журналах, рекомендованных КОКСОН МОН РК:

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ПРОЕКТУ

6 статей в международных рейтинговых журналах (входящих в БД Web of Science Clarivate Analytics и/или БД Scopus) с импакт-фактором:

- 1) S.N. Kharin, T.A. Nauryz. Mathematical model of a short arc at the blow-off repulsion of electrical contacts during the transition from metallic phase to gaseous phase. AIP Conference Proceedings, indexed in Scopus, 2021, 2325, 020007. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0040412>
- 2) S.N. Kharin, T.A. Nauryz. One-phase spherical stefan problem with temperature dependent coefficients// Eurasian Mathematical Journal, indexed in Scopus, Q3, 2021, 12(1), pp 49-56. DOI: <https://doi.org/10.32523/2077-9879-2021-12-1-49-56>.
- 3) S.N. Kharin, T.A. Nauryz. Solution of two-phase cylindrical direct stefan problem by using special functions in electrical contact processes. International Journal of Applied Mathematics, indexed in Scopus, Q3, 2021, 34(2), pp 237-248. DOI: <http://dx.doi.org/10.12732/ijam.v34i2.2>.
- 4) S.A. Kassabek, D.Suragan Numerical approximation of the one-dimensional inverse // Computational and Applied Mathematics, 41(4), 2022, <https://doi.org/10.1007/s40314-022-01896-1>, (Scopus, Q1, Процентиль 77, Web of Science IF=2.018)
- 5) S.A. Kassabek, S.N. Kharin, D. Suragan Exact and approximate solutions to the stefan problem in ellipsoidal coordinates // Eurasian mathematical journal, ISSN 2077-9879, Volume 13, Number 3 (2022), 51-66. DOI: <https://doi.org/10.32523/2077-9879-2022-13-3-51-66>.
- 6) S.N. Kharin Mathematical models of the vapor, liquid and solid states of the arc erosion in electrical contacts // Proc. of the 67 IEEE Holm conference on electrical contacts, 23 - 26 October 2022 Tampa, Florida, (Session 2: Modeling), 53-61.

1 статья в международном рейтинговом журнале (входящем в БД Web of Science Clarivate Analytics, Emerging Sources Citation Index) без импакт-фактора:

M. Sarsengeldin, M. Nashed. Special Functions and HHL Quantum Algorithm for Solving Moving Boundary Value Problems Occurring in Electric Contact Phenomena//Proc. of IEEE 67th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm), Hilton Palacio del Rio Event Dates. October 24, 2021

1 статья в журналах, рекомендованных КОКСОН МОН РК:

E.M. Khairullin, A.S. Azhibekova A boundary problem the system of three equations of heat and mass transfer in a half-space // Proceedings of the International scientific and practical conference "Satbaev conference -2022. Trends in modern scientific research", Vol. 2, Almaty, 2022. pp. 1125–1129.

ДАТА ОБНОВЛЕНИЯ
ИНФОРМАЦИИ

18 ноября 2022 года