

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке

Пермского национального

исследовательского

политехнического университета,

из - мат. наук, доцент

Швейкин А.И.

18 октября

2023 г.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Диссертация «Математическое и алгоритмическое обеспечение системы поддержки принятия решений оператора линии непрерывной вулканизации кабельной продукции» выполнена на кафедре «Конструирование и технологии в электротехнике.»

В период подготовки диссертации соискатель Дятлов Илья Яковлевич работал в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», на кафедре «Конструирование и технологии в электротехнике» в должностях: учебный мастер, инженер, заведующий учебной лабораторией, младший научный сотрудник, ведущий электроник.

В 2018 году окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный

исследовательский политехнический университет» по направлению магистратуры 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника.

В 2022 году окончил аспирантуру очной формы обучения федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению 27.06.01 Управление в технических системах(период обучения «1» октября 2018 г. по «29» сентября 2022 г.).

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Труфанова Наталия Михайловна, работает заведующим кафедрой «Конструирование и технологии в электротехнике» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

1. Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в следующем:

Соискатель разработал концептуальную модель системы поддержки принятия решений (СППР) оператора линии непрерывной вулканизации изоляции кабельной продукции.

Предложенная СППР основана на применении разработанных полной и упрощенной математической модели тепломассопереноса и вулканизации резиновой смеси внутри вулканизационной трубы.

Соискатель рассмотрел и проанализировал различные методики экспериментального определения вулканизационных свойств полимерных композиций. Составил подробный обзор существующих математических моделей процессов вулканизации резиновых смесей. Отметил отсутствие в открытой литературе результатов исследований процессов тепломассопереноса внутри вулканизационной линии для кабельной промышленности. Определил проблемы, связанные с коррекцией технологического режима, возникающие

при изменении параметров вулканизационной среды, свойств материала или конструкции изделия.

Автор спланировал и выполнил на современном, высокоточном испытательном оборудовании экспериментальные исследования вулканизационных и теплофизических свойств резиновых смесей. Осуществил обработку и анализ полученных экспериментальных данных, в результате чего были определены: вулканизационные характеристики резиновых смесей.

В результате исследований вулканизационных свойств резины были определены коэффициенты для трехпараметрического кинетического уравнения, описывающего зависимость степени завершенности вулканизации от времени и температуры выдержки.

Соискатель разработал математическую модель тепломассопереноса и кинетики вулканизации для технологического процесса вулканизации резиновой изоляции кабеля.

Автор выполнил моделирование технологического процесса вулканизации резиновой изоляции кабеля. Результаты численного моделирования позволили изучить закономерности вулканизации изоляции и выявить влияние различных параметров на степень завершенности вулканизации

На основе результатов моделирования сформирована база данных режимов, представленная в виде полиномиальных выражений.

Для ряда маркоразмеров кабеля определен ряд скоростей, при которых степень завершенности вулканизации составляет 90%.

Соискателем предложены алгоритмы управления и коррекции технологического процесса.

Соискатель подготовил научные публикации по теме диссертации, выступил с докладами на всероссийских конференциях, представил работу на научных семинарах.

## 2. Научная новизна диссертационного исследования:

- Разработана новая концептуальная модель системы поддержки принятия решений оператора линии вулканизации резиновой изоляции кабельно-

проводниковой продукции, отличающаяся от известных наличием двух блоков математического моделирования объекта управления: численного решения системы дифференциальных уравнений, соответствующих известным условиям, и статистического анализа результатов вычислительных экспериментов, что позволяет адаптировать СППР к изменяющимся исходным данным.

- Разработаны новые алгоритмы выбора и коррекции скорости движения процесса вулканизации изоляции кабеля, отличающийся использованием осесимметричной математической модели процессов тепломассопереноса и вулканизации изоляции внутри вулканизационной трубы, позволяющие адаптивно выбирать режим работы линии как при изменении кинетических свойств резины, так и условий протекания процесса.

- Предложена оригинальная методика испытаний резиновой смеси и изоляции готового кабеля, отличающаяся применением гибридного ротационного реометра и позволяющая исследовать вулканизационные свойства резиновой смеси при разных температурах и времени выдержки.

- Предложена методика расчета вулканизационных характеристик на основе результатов натурного эксперимента, которая отличается применением трех параметрического нелинейного регрессионного выражения, позволяющая описывать вулканизационные свойства с высокой точностью.

- Разработана новая система поддержки принятия решений оператора на основе математической модели процесса вулканизации изоляции кабельной продукции, позволяющая анализировать распределение температуры внутри изоляционного слоя кабеля и оценить степень вулканизации слоя изоляции для новых и существующих материалов и конструкций.

### 3. Степень достоверности результатов проведенных исследований

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

4. Практическая и теоретическая значимость диссертационного исследования .

Теоретическая значимость работы заключается в разработке оригинальной модели системы поддержки принятия решений оператора линии непрерывной вулканизации кабельно-проводниковой продукции и реализации математической модели, на основе которой предложены алгоритмы выбора и коррекции скорости линии и расхода экструдера. Представленные алгоритмы позволяют определить величины скорости и расхода экструдера для различных: конструкций кабеля, материалов изоляции, нештатных режимов работы производственной линии.

Предложенная математическая модель, в отличие от существующих описывает процессы тепломассопереноса в среде насыщенного пара и вулканизации внутри вулканизационной трубы. Кинетическая модель учитывает зависимость вулканизационных характеристик от температуры и времени выдержки.

Результаты работы можно использовать на предприятиях, занимающихся производством кабельно-проводниковой продукции со сшиваемой изоляцией. Особенно в тех случаях, когда требуется оперативно выбрать новый режим, внести изменения в конструкцию кабеля, сменить марку материала изоляции, а также учесть возможные падения давления внутри вулканизационной трубы и отклонения в свойствах заготовки в ходе процесса вулканизации резиновой изоляции кабеля.

Предложенная СППР в отличие от существующих позволяет производить выбор скорости линии в условиях изменяющихся внешних и внутренних воздействий.

5. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

По теме диссертационной работы Дятловым И.Я., опубликовано 9 научных работ, все в изданиях, включенных ВАК в перечень рецензируемых

научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций. В том числе одна статья в издании, индексируемом в базе Scopus.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения о публикациях соискателя по теме диссертации. Основные положения и результаты работы отражены в следующих научных публикациях:

1. Исследование процесса вулканизации резиновой смеси при помощи ротационного реометра / **И. Я. Дятлов**, Н. М. Труфанова // Научно-технический вестник Поволжья. - 2018. - № 7. - С. 91-94. (Вклад соискателя 70%)

Представлены результаты проведенных соискателем лабораторных исследований процесса вулканизации резиновой смеси на ротационном реометре. В результате серии экспериментов получены зависимости модуля накопления от температуры и времени вулканизации. По результатам эксперимента получены зависимости степени сшивки и скорости производства кабеля с резиновой изоляцией от времени и температуры.

2. Численный анализ процесса тепломассопереноса при силановой сшивке в водной ванне / Е. С. Гольцов, **И. Я. Дятлов**, Н. М. Труфанова // Научно-технический вестник Поволжья. - 2019. - № 7. - С. 91-94. (Вклад соискателя 20%)

В работе представлена предложенная соискателем нестационарная двумерная математическая модель процессов тепломассопереноса в ванне с кабелем и двухкомпонентной средой - пар-вода. В результате исследования получены векторные поля скоростей, поля температур и распределения фаз в силанольной ванне. Определено влияние физических и геометрических параметров на процесс тепломассопереноса для различных маркоразмеров, длин заготовки, размеров барабанов и конструкций.

3. Численное исследование процесса сшивки полиэтилена в вулканизационной трубе в среде азота / А. А. Корелин, **И. Я. Дятлов**,

Н. М. Труфанова // Научно-технический вестник Поволжья. - 2019. - № 7. - С. 111-115. (Вклад соискателя 20%)

В работе представлена предложенная соискателем математическая модель процесса тепломассопереноса в трубе вулканизации, реализация которой позволила определить параметры рационального технологического процесса.

4. Математическая модель и численный анализ процесса пероксидной сшивки изоляции кабелей на среднее напряжение / А. А. Корелин, **И. Я. Дятлов**, Н. М. Труфанова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления - 2020. - № 35. - С. 119-132. (Вклад соискателя 20%)

В работе проведен анализ влияния на распределение температуры таких производственных факторов, как скорость изолирования и режим нагрева линии. На основе полученных данных соискателем произведен расчет степени сшивки изоляции

5. Моделирование процесса теплообмена при силановой сшивке в двухкомпонентной среде «вода–газ» с применением модели Volume of fluid / Е. С. Гольцов, **И. Я. Дятлов**, Н. М. Труфанова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. - 2020. - № 36. - С. 146-158. (Вклад соискателя 20%)

В работе рассмотрены различные математические модели процессов тепломассопереноса в двухкомпонентной среде, предложенные соискателем. Проведен анализ работоспособности предложенных моделей.

6. Описание вулканизационных кривых при помощи трехпараметрического уравнения / **И. Я. Дятлов**, Н. М. Труфанова // Электротехника. - 2020. - № 11. - С. 34-38. (Вклад соискателя 70%) (версия на английском языке A Three-Parameter Equation for Describing Vulcanization Curves / **I. Y. Dyatlov**, N. M. Trufanova // Russian Electrical Engineering. - 2020. - Vol. 91, № 11. - P. 681-685(Scopus))

Соискателем на основании результатов эксперимента построена функциональная зависимость процесса, учитывающая температурный и временной фактор. Использована разработанная итерационная процедура для определения коэффициентов, входящих в регрессионное выражение, описывающее степень вулканизации резин. Проведена оценка точности используемого выражения. Приведено сравнение зависимости степени завершенности сшивки, полученные экспериментально и расчетным путем.

7. Управление производственной линией вулканизации изоляции силового кабеля /И.Я. Дятлов, Н.М. Труфанова // Прикладная математика и вопросы управления / Applied Mathematics and Control Sciences. – 2021. – № 3. – С. 81–94. (Вклад соискателя 70%)

Соискателем на основе математической модели предложены алгоритмы расчета и коррекции скорости линии и расхода экструдера. Представленные алгоритмы позволяют определить величины скорости и расхода экструдера для различных: конструкций кабеля, материалов изоляции, нестандартных режимов работы производственной линии.

8. Численное исследование влияния технологических параметров на степень завершенности вулканизации изоляции кабеля / И. Я. Дятлов, Н. М. Труфанова // Научно-технический вестник Поволжья. - 2022.- № 8. - С. 17-20. (Вклад соискателя 70%)

В работе представлены результаты численного исследования процессов тепломассопереноса и образования поперечных межмолекулярных связей в резиновой изоляции кабельного изделия при прохождении через вулканизационную камеру линии непрерывной вулканизации. Соискателем получены зависимости степени завершенности процесса вулканизации изоляции кабеля от различных параметров: толщины изоляции, площади поперечного сечения токопроводящей жилы (ТПЖ), давления вулканизационной среды, скорости изолирования.

9. Система поддержки принятия решений для управления производственной линией вулканизации изоляции силового кабеля / И. Я.



Дятлов // Прикладная математика и вопросы управления / Applied Mathematics and Control Sciences.– 2023. – № 2. – С. 61–71.(Вклад соискателя 100%)

Соискателем предложена структурная модель системы поддержки принятия решения (СППР) для управления линией непрерывной вулканизации изоляции кабеля. СППР базируется на математической модели технологического процесса непрерывной вулканизации изоляции кабеля, базы данных, алгоритма коррекции режима. СППР позволит оперативно разработать новый режим в случае применения новых материалов или конструкций, а также корректировать текущий режим при внеплановых изменениях в ходе процесса производства.

6. Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите

Представленная Дятловым Ильей Яковлевичем диссертационная работа «Математическое и алгоритмическое обеспечение системы поддержки принятия решений оператора линии непрерывной вулканизации кабельной продукции» соответствует паспорту специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика, а именно:

Пункту- 5 «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»;

Пункту- 10 «Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических системах»;

Пункту- 12 «Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации»;

Пункту- 15 «Теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования элементов систем управления в нормальных и специальных условиях с целью улучшения технико-экономических и эксплуатационных характеристик»;

7. Соответствие диссертационной работы требованиям Положения о присуждении ученых степеней.

Диссертация Дятлова Ильи Яковлевича отвечает требованиям п.п. 9-11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней Постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Диссертация «Математическое и алгоритмическое обеспечение системы поддержки принятия решений оператора линии непрерывной вулканизации кабельной продукции» Дятлова Ильи Яковлевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Заключение принято на заседании кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» ПНИПУ

№1 от 05.09.2023г.

Присутствовало на заседании 9 чел. Результаты голосования: «за» - 9 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0, протокол № 1- от 05.09.2023г.

Заместитель заведующего кафедрой  
«Конструирование и технологии в  
электротехнике»

Доктор технических наук, профессор



 Щербинин А.Г.

Ученый секретарь кафедры  
«Конструирование и технологии в  
электротехнике»



\_\_\_\_\_/ Бабушкина Л.Г.