

На правах рукописи



НЕДОНОСКОВ АЛЕКСАНДР БОРИСОВИЧ

**ТЕПЛОВАЯ ОБРАБОТКА ДЕФОРМАЦИОННЫХ ШВОВ
ЦЕМЕНТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ СВЧ НАГРЕВОМ**

Специальность

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном казенном военном образовательном учреждении высшего образования «Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина» (г. Воронеж) министерства обороны РФ (ВУНЦ ВВС «ВВА»)

Научный руководитель: **Дорняк Ольга Роальдовна,**
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры электротехники, теплотехники и гидравлики ВГЛТУ имени Г.Ф. Морозова

Официальные оппоненты: **Гаряев Андрей Борисович,**
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт» (ФГБОУ ВО
«НИУ МЭИ»), профессор кафедры
«Тепломассообменные процессы и установки»,
г. Москва

Губарев Василий Яковлевич,
кандидат технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Липецкий государственный технический
университет» (ФГБОУ ВО «ЛГТУ»), заведующий
кафедрой «Промышленная теплоэнергетика»,
г. Липецк

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тамбовский государственный технический
университет» ТГТУ, г. Тамбов

Защита диссертации состоится 9 апреля 2026 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» по адресу: г. Воронеж, Московский проспект, 14, ауд. 216.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «ВГТУ» и на сайте <https://cchgeu.ru/>

Автореферат разослан «16» февраля 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.286.07,
к.ф.-м.н., доц.



Ряжских Александр Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В процессе эксплуатации цементобетонных покрытий под воздействием множества эксплуатационных и климатических факторов происходит их разрушение. К числу опасных видов разрушения цементобетонных покрытий относится появление дефектов в деформационных швах. Проникновение воды через негерметичные швы приводит к переувлажнению основания покрытия и, как следствие, к просадке и разрушению отдельных плит.

Практика эксплуатации цементобетонных покрытий показывает, что нарушение герметичности деформационных швов происходит уже в первые годы эксплуатации покрытия. Традиционная технология ремонта покрытий такого типа требует вывода объекта из режима эксплуатации и предусматривает полную замену заполнителей шва, что связано с большими временными и материальными затратами.

Известны преимущества использования электромагнитного поля сверхвысоких частот (СВЧ энергии) для нагрева диэлектрических материалов: избирательность нагрева, равномерность нагрева, объемный характер нагрева, экологичность нагрева, высокий КПД преобразования СВЧ энергии в тепловую. СВЧ технологии могут применяться для увеличения периода эксплуатации деформационных швов. Профилактическая обработка деформационного шва за счет микроволнового нагрева позволяет ликвидировать мелкие дефекты в герметизирующем материале. Такая обработка отодвигает сроки капитального ремонта деформационных швов и может проводиться без прерывания режима эксплуатации покрытия.

Для реализации способа профилактической термообработки деформационных швов необходимо осуществить создание специальных СВЧ установок, реализующих процесс СВЧ нагрева деформационного шва, а также выполнить поиск наиболее рациональных режимов их работы, обеспечивающих нагрев герметизирующего слоя до текучего состояния, что ведет к заплыванию мелких дефектов. При этом важно не допустить опасного перегрева герметика до температуры вспышки. Поэтому исследование процессов теплообмена при СВЧ нагреве деформационных швов цементобетонных покрытий является актуальной задачей, имеющей большое практическое значение.

Диссертационное исследование проводилась в соответствии с планом научно-исследовательской работы ВУНЦ ВВС «ВВА» на 2022 год и плановый период 2023 и 2024 гг. – отчет о НИР «Профилактика разрушения деформационных швов жестких аэродромных покрытий», регистрационный № 1612482 от 23.12.2022 г., инвентарный № 3328, несекретно.

Степень разработанности темы. Научные основы воздействия электромагнитного поля на диэлектрический материал, в том числе, используемый в области дорожного строительства, заложены в трудах московской, Санкт-Петербургской, Саратовской и Казанской научных школ. Исследование закономерностей тепловых процессов при СВЧ нагреве различных материалов достаточно широко представлено в научной литературе

публикациями российских и иностранных ученых. Отметим авторов исследований по диэлектрическому нагреву последних десятилетий, выполненных применительно к полимерам, мерзлому грунту, почве, льду, снегу, древесине и другим дисперсным материалам: Ю.С. Архангельский, П.В. Акулич, А.М. Афанасьев, В.И. Анфиногентов, К.Г. Гараев, Н.Н. Гринчик, Е.М. Гришина, Т.Ю. Дунаева, П.С. Куц, А.О. Мантуров, С.В. Резник, С.П. Рудобашта, В.В. Саломатов, Р.Р. Сафин, Б.Н. Сипливый, С.В. Тригорлый, И. Л. Хабибуллин, Р.Р. Хасаншин и другие.

Исследования, связанные с особенностями тепловых процессов при диэлектрическом нагреве деформационных швов покрытий жесткого типа, ранее не проводились.

Цель исследования и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка рациональных режимов нагрева герметизирующего материала при воздействии интенсивных потоков СВЧ энергии, позволяющих восстанавливать целостность деформационных швов для повышения периода эксплуатационной надежности цементобетонных покрытий.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка способа тепловой обработки деформационных швов цементобетонных покрытий для увеличения срока их эксплуатации с использованием энергии электромагнитных волн СВЧ.

2. Разработка и проведение лабораторного эксперимента СВЧ термообработки деформационных швов цементобетонных покрытий.

3. Разработка метода расчета режимных параметров СВЧ нагрева двух- и трехслойных деформационных швов цементобетонных покрытий с использованием мобильных систем и его валидация.

4. Анализ особенностей развития температурного поля в заполнителях деформационных швов и окружающих цементобетонных плитах при диэлектрическом нагреве в зависимости от комплекса геометрических, тепло- и электрофизических, а также режимных параметров процесса.

5. Проведение экспериментального исследования нестационарных температурных полей при диэлектрическом нагреве фрагмента покрытия с двухслойным и трехслойным деформационным швом.

6. Разработка методики эксперимента для оценки безопасности персонала при работе с мобильной системой СВЧ термообработки деформационных швов и ее апробация.

Предмет и объект исследования. Предметом исследования являются процессы теплообмена при нагреве компонентов деформационного шва за счет воздействия электромагнитного поля СВЧ диапазона. Объектом исследования является цементобетонное покрытие с двух- и трехслойными деформационными швами.

Положения, выносимые на защиту.

1. Способ, обеспечивающий ликвидацию мелких дефектов в герметизирующем слое деформационного шва цементобетонных покрытий путем интенсивного нагрева за счет СВЧ энергоподвода и позволяющий

увеличить длительность межремонтного периода, защищенный патентом на изобретение РФ № 2783131 С9.

2. Основные конструктивные характеристики лабораторной установки, созданной для изучения динамики значений температуры в различных зонах двух- и трехслойных деформационных швов при диэлектрическом нагреве; приборы для измерений и материалы.

3. Нестационарная математическая модель теплообмена и электродинамики для фрагмента цементобетонного покрытия, который включает двух- или трехслойный деформационный шов и окружающие его бетонные плиты, при энергоподводе от движущегося источника СВЧ излучения.

4. Закономерности развития температурного поля в слоях герметика, полимерного материала, цементно-песчаной смеси и бетонных плитах при диэлектрическом нагреве в зависимости от скорости перемещения СВЧ установки и выбранного количества излучателей.

5. Результаты статистической обработки экспериментального исследования нестационарных температурных полей при диэлектрическом нагреве фрагмента цементобетонного покрытия с двухслойным и трехслойным деформационным швом.

6. Методика эксперимента для оценки безопасности персонала при работе с мобильной системой СВЧ термообработки деформационных швов и результаты его реализации для лабораторной СВЧ установки.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан способ термообработки деформационных швов цементобетонных покрытий, отличающийся использованием СВЧ энергии в качестве источника нагрева для ликвидации стартовых очагов разрушения в герметизирующем слое шва (патент РФ № 2783131 С9), позволяющий поддерживать постоянно высокое качество покрытий и увеличивать межремонтные сроки эксплуатации деформационных швов цементобетонных покрытий.

2. Созданы специальная лабораторная СВЧ установка и модель цементобетонного покрытия, отличающиеся возможностью измерений температуры материалов двух- и трехслойного деформационных швов, а также окружающих бетонных плит, позволяющие получить экспериментальные данные о динамике СВЧ нагрева фрагмента покрытия и доказывающие работоспособность предложенного технического решения.

3. Предложена математическая модель процессов теплообмена при интенсивном диэлектрическом нагреве фрагмента цементобетонного покрытия с применением мобильной СВЧ системы, отличающаяся учетом влияния неоднородного распределения вектора напряжённости электрического поля на мощность тепловых источников в слоистой структуре деформационного шва и окружающих цементобетонных плитах, позволяющая выбирать наиболее рациональные режимы термообработки для заданного комплекса геометрических характеристик шва, тепло- и электрофизических параметров материалов, заполняющих шов.

4. Установлены расчетные значения скорости перемещения мобильного устройства СВЧ термообработки, отличающиеся учетом мощности и частоты излучения, количества излучателей, комплекса тепло- и электрофизических параметров заполнителей швов различного типа и окружающих плит, позволяющие разогреть герметизирующий материал до температуры текучести, но не допускающие его перегрев выше температуры вспышки.

5. Разработано новое самоходное СВЧ устройство (патенты на полезную модель РФ № 208062 U1, № 210068 U1), отличающееся применением оборудования, которое обеспечивает необходимую скорость движения и плавность хода, позволяющее осуществлять, в том числе, в беспилотном режиме, равномерный нагрев слоя герметика деформационном шве, переход его в текучее состояние, и «заплывание» мелких дефектов – небольших трещин и отслоений от поверхности цементобетонных плит.

6. Разработана методика определения условий безопасной работы персонала, отличающаяся схемой эксперимента, позволяющая выполнять оценку длительности безопасной работы при работе с мобильной СВЧ системой,

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования. Теоретическая значимость результатов исследования заключается в разработке и исследовании математической модели нестационарного нагрева движущимся источником СВЧ излучения элемента цементобетонного покрытия, который включает деформационный шов слоистой структуры из материалов с различными теплофизическими и электрофизическими свойствами, а также фрагменты окружающих его бетонных плит.

Практическая значимость полученных научных результатов заключается в разработке способа профилактики преждевременного разрушения деформационных швов цементобетонных покрытий и специальных устройств для реализации данного способа, метода определения режимных параметров СВЧ обработки.

Результаты диссертационного исследования апробированы в процессе реконструкции мостового сооружения при устройстве деформационного шва, предназначенного для перекрытия зазора между пролетными строениями для обеспечения прочного сцепления между слоями щебня и герметика в ООО «АВТОМОСТПРОЕКТ-Инжиниринг» (г. Воронеж), используются в учебных курсах дисциплин в ФГКВОУ ВО «Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина».

Обоснованность и достоверность результатов работы. Научные результаты, изложенные в диссертации, основаны на применении известных общепринятых положений теорий теплообмена и электромагнитного поля. Численные эксперименты проведены на платформе универсальной среды численного моделирования COMSOL Multiphysics, успешно апробированной широким кругом исследователей.

Планирование и обработка эксперимента осуществлены с использованием известных методов. Для реализации эксперимента применялись современные

средства измерений. Относительная случайная погрешность результатов опытов составила менее 18%.

Сопоставление результатов математического моделирования и натурного эксперимента доказали адекватность сформулированной математической модели.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на V Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы инженерно-аэродромного обеспечения базирования авиации в современных условиях и пути их решения», (Воронеж, 2021 г.); Международном научно-техническом симпозиуме «Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности», посвященном 110-летию А.Н. Плановского (ISTS «EESTE-2021»), в рамках третьего международного Косыгинского форума «Современные задачи инженерных наук», (Москва, 2021 г.); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Математическое и экспериментальное моделирование физических процессов», (Биробиджан, 2022 г.); Межвузовском круглом столе «Промышленная теплоэнергетика», (Воронеж, 2023 г.); Восьмой Международной научно – практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые и массообменные технологии (сушка, тепловые и массообменные процессы) СЭТМТ – 2023», (Москва, 2023 г.); Международном научно-техническом симпозиуме «Повышение энергоресурсоэффективности, экологической и технологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности», посвященном 120-летию со дня рождения П.Г. Романкова, (ISTS«EESTE-2024»), в рамках четвертого международного Косыгинского форума «Проблемы инженерных наук: формирование технологического суверенитета», посвящённого 120-летию со дня рождения А.Н. Косыгина, (Москва, 2024 г.); XVII Минском международном форуме по тепломассообмену, (Минск, 2024 г.); 14-ой Международной теплофизической школы (МТФШ-14) «Теплофизические исследования и возобновляемая энергетика» (Душанбе – Тамбов – Казань, 2024).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Основные результаты диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника, в частности, п. 3 «Процессы взаимодействия интенсивных потоков энергии с веществом; совместный перенос массы, импульса и энергии в бинарных и многокомпонентных смесях веществ, включая химически реагирующие смеси» и п. 5 «Научные основы и методы интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты. Процессы тепло- и массообмена в оборудовании, предназначенном для производства, преобразования, передачи и потребления теплоты».

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 18 научных работ, в том числе, 2 статьи в научных журналах, включенных в Перечень ВАК РФ, получены 3 патента РФ на изобретение и полезные модели.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и трех приложений. Диссертационная работа изложена на 148 страницах, включает 60 рисунков и 14 таблиц. Библиографический список включает 130 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи работы, раскрыты ее научная новизна и практическая значимость.

В первой главе диссертации рассмотрены типовые схемы заполнения деформационных швов цементобетонных покрытий; основные дефекты, возникающие при их эксплуатации; современные способы ремонта деформационных швов. Выполнен анализ известных технических решений по применению электромагнитного излучения в СВЧ диапазоне для интенсификации тепловых процессов в дорожном и аэродромном строительстве. Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований, выполненных для обоснования технологий диэлектрического нагрева различных материалов, в том числе асфальтобетонной смеси, битума, полимеров, нефти, грунта, льда, древесины.

Во второй главе проведено экспериментальное исследование теплового воздействия электромагнитного поля СВЧ-диапазона на фрагмент цементобетонного покрытия, а также выполнен первый этап численного моделирования, для упрощенной математической модели. Полученные результаты показали возможность применения СВЧ энергии для нагрева герметизирующего материала деформационного шва для восстановления его рабочих свойств.

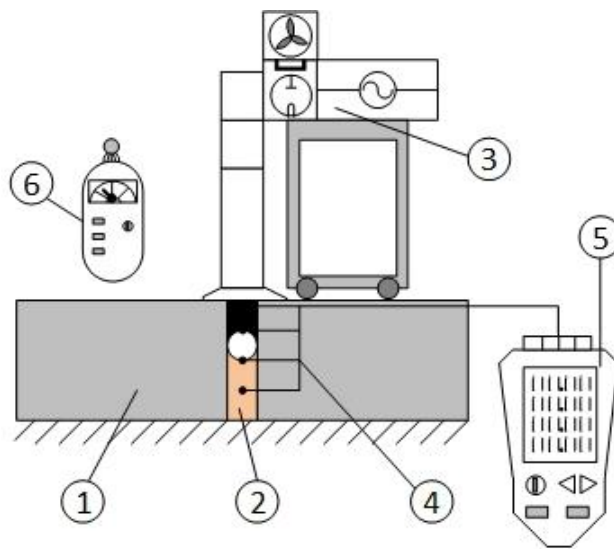
Для экспериментального исследования процесса интенсивной термообработки деформационного шва цементобетонного покрытия создана специальная установка, а на открытом воздухе оборудована опытная площадка.

Схема и общий вид экспериментальной СВЧ-установки представлен на Рисунке 1. Излучатель с рупорной антенной установлен на металлической опорной подвижной раме. Положение рамы относительно поверхности шва регулируется по высоте. Питание установки осуществляется от сети переменного напряжения 220 В. Мощность магнетрона с частотой излучения $f=2450$ МГц составила 1 кВт.

Два бетонных бордюрных камня размерами $1000 \times 300 \times 150$ мм уложены на песчаное основание толщиной 30 мм. Зазор между ними шириной 15 мм заполнен как стандартный деформационный шов цементобетонного покрытия, двухслойный на участке I или трехслойный на участке II (Рисунок 2).

Температура измерялась в четырех различных по высоте точках деформационного шва на вертикальной оси симметрии рупора и в двух точках цементобетонной плиты (рис. 2). Высота отсчитывается от горизонтальной

плоскости, совпадающей с нижней границей расчетного элемента покрытия. Для точек этой плоскости координата $z = 0$.



а)

б)

Рисунок 1 - Схема эксперимента (а) и общий вид экспериментальной установки (б): 1 - цементобетонная плита, 2 - деформационный шов, 3 – СВЧ-установка, 4 – температурные датчики, 5 – прибор для измерения температуры, 6 – детектор СВЧ-излучения

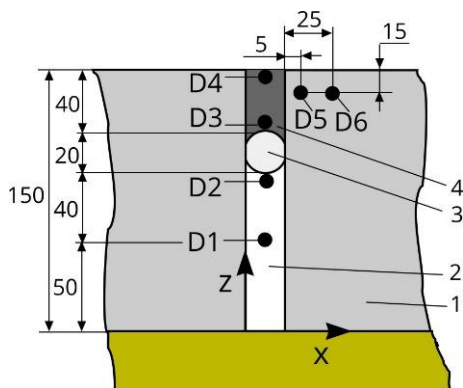


Рисунок 2 - Устройство деформационного шва и позиции термодатчиков D1-D6. 1 – цементобетонная плита; 2 – пескоцементная смесь; 3 – уплотнительный шнур; 4 – герметизирующий материал

Расположение датчиков D1, D2, D3, D4 соответствует значениям $z = 50, 90, 110, 150$ мм, то есть датчик D1 и D2 были размещены в слое цементопесчаной смеси, D3 и D4 – в материале герметика. Для контроля температуры в цементобетонных плитах были установлены еще два температурных датчика D5 и D6. Их расположение соответствует глубине 15 мм от верхней границы фрагмента и расстояниям 5 и 25 мм от края деформационного шва. Полости, в которых были размещены эти датчики, заполнялись материалом цементобетонных плит.

Для измерения температуры в деформационном шве использовался четырехканальный цифровой промышленный измеритель температуры НТ 9815 с датчиками ТХА (тип К по международной классификации), представляющими собой хромель-алюмелевые термоэлементы быстрого реагирования открытого типа.

Измерения проводились для случая $V=0$ (неподвижной рамы) с 3-х кратной повторяемостью, при температуре окружающего воздуха $25-27^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности воздуха 45%.

СВЧ-обработка покрытия проводилась в течение 10 минут. Значения температуры фиксировались с минутным интервалом.

Статистическая обработка результатов измерений, показала, что относительная случайная погрешность в опытах колеблется от 1% до 18%. Средняя квадратичная погрешность среднего значения температуры в различные моменты времени ($t=0, 1, 2, \dots, 10$ мин) не превышает 3 °С. Для доверительной вероятности 0.95 максимальное значение абсолютной случайной погрешности составило 12.5 °С.

Динамика изменения со временем значений температуры, полученных в натурном эксперименте в зоне деформационного шва в позициях, где расположены термопары, представлена на рис. 4. Эксперимент показал, что микроволновой нагрев в течение 10 минут переводит используемый битум-полимерный герметик в текучее состояние.

В третьей главе диссертации сформулирована математическая модель теплообмена и электродинамики для фрагмента цементобетонного покрытия с деформационным швом, заполнители которого обладают различными тепло- и электрофизическими свойствами.

Расчетная область включает волновод (V_1), воздушную прослойку под ним (V_2), блок деформационного шва (трехслойный или двухслойный) вместе с соседними бетонными плитами (V_3) (Рисунок 3). Воздушная прослойка между рупором антенны и покрытием имеет специальное ограждение с использованием металлических материалов. Область моделирования имеет границы, в число которых входят поверхности волновода Γ_{11} ; ограждение воздушной прослойки между фрагментом и волноводом Γ_2 ; плоскость контакта фрагмента покрытия V_3 с грунтом Γ_{33} ; боковые грани выделенного фрагмента Γ_{31} ; верхняя поверхность расчетной области, граничащая с окружающей средой, с исключенным участком Γ_{3P} под раскрытием рупора антенны, Γ_{32} .

Уравнения математической модели СВЧ-нагрева изучаемого объекта записаны в предположении, что все материалы являются изотропными. Для описания распределения вектора напряженности электрического поля, взаимодействующего с диэлектрическим материалом, используется уравнение

Гельмгольца:

$$\begin{aligned} \Delta \vec{E}(\vec{r}) + \gamma^2 \vec{E}(\vec{r}) &= 0, \quad \vec{r} \in V_1 \cup V_2 \cup V_3; \\ \gamma &= \omega \sqrt{\epsilon_a \mu_a} = \beta - i\alpha; \quad \epsilon_a = \epsilon_a (1 - i \cdot \operatorname{tg} \delta); \\ \mu_a &= \mu_a \cos \delta_M - i \mu_a \sin \delta_M. \end{aligned}$$

(1)

Здесь \vec{E} – комплексная амплитуда вектора напряженности электрического поля, В/м; \vec{r} – радиус вектор точки пространства, м; γ – комплексный коэффициент распространения; $\epsilon_a = \epsilon \epsilon_0$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость; $\mu_a = \mu \mu_0$ – абсолютная

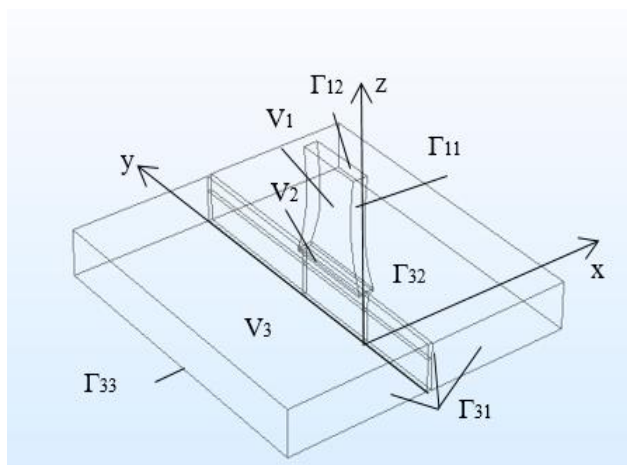


Рисунок 3 - Расчетная схема составного элемента цементобетонного покрытия с деформационным швом

магнитная проницаемость; ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды; μ – относительная магнитная проницаемость среды; β – коэффициент фазы (волновое число), рад/м ; α – коэффициент затухания м^{-1} ; ω – круговая частота, с^{-1} ; $i = \sqrt{-1}$, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м ; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м ; δ_m – угол магнитных потерь; $\text{tg } \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; Δ – дифференциальный оператор Лапласа. Электрическая и магнитная постоянные равны соответственно: $\varepsilon_0 = 10^{-9}/(36\pi) \text{ Ф/м}$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$.

Микроволновой генератор создает излучение, мощность которого P_{in} , частота f . Распространение электромагнитной волны происходит в волноводе с идеально проводящими стенками. Волновод состоит из двух элементов – секториального рупора и призматической части. В связи с геометрическими особенностями объекта облучения узкая сторона антенны в несколько раз меньше, чем широкая, а плавное расширение рупора происходит в плоскости параллельной длинной стороне сечения (Н-плоскостной рупор). Предполагается, что тип возбужденной волны – H_{10} .

Развитие температурного поля исследуется в области V_3 – в слоистом деформационном шве и прилегающих бетонных плитах. Уравнение теплопроводности имеет вид

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + I_{mw}, \quad I_{mw} = 0.5\omega\varepsilon_0\varepsilon \cdot \text{tg } \delta \cdot E^2, \quad \mathbf{r} \in V_3. \quad (2)$$

где T – температура, К ; t – время, с ; ρ – плотность материала, кг/м^3 ; c_p – удельная теплоёмкость при постоянном давлении, $\text{Дж/(кг}^\circ\text{К)}$; λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт/(м}^\circ\text{К)}$; I_{mw} – удельная поглощенная мощность СВЧ-излучения, Вт/м^3 .

Источник излучения совершает прямолинейное поступательное движение с постоянной скоростью V . Кинематические уравнения движения излучателя имеют вид

$$x_A = 0, y_A = L_1 + Vt. \quad (3)$$

Точка A – полюс – произвольная точка передвижного устройства излучения, L_1 – координата y полюса A в начальный момент времени. В этом случае функция, определяющая поле тепловых источников в покрытии I_{mw} , вычисляется по стационарному решению $E(x, y, z)$ следующим образом

$$I_{mw}(t, x, y, z) = 0.5\omega\varepsilon_0\varepsilon \cdot \text{tg } \delta \cdot [E(x, y - Vt, z)]^2; \quad L_1 = 0. \quad (4)$$

На внутренних границах приняты условия идеального теплового контакта и предполагается непрерывность тангенциальной проекции вектора напряженности электрического поля

На внешних границах

$$\begin{aligned} E_t = 0, \quad \mathbf{r} \in \Gamma_{11} \cup \Gamma_2, \quad \mathbf{n} \times (\nabla \times \mathbf{E}) = 0, \quad \mathbf{r} \in \Gamma_3, \\ E_z = 0, E_y = 0, E_x = E_0, \quad \mathbf{r} \in \Gamma_{12}. \quad P_{in} = \frac{ab}{4Z} E_0^2, \quad Z = Z_0 / \sqrt{1 - (\lambda_0 / \lambda_{kp})^2}, \quad Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}. \end{aligned} \quad (5)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\Gamma_{32}} = \alpha_{32} (T|_{\Gamma_{32}} - T_c) + \varepsilon_3 \sigma_0 [T|_{\Gamma_{32}}^4 - T_c^4], \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{\Gamma_{31}} = 0,$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{3P}} = \alpha_{3P} (T|_{\Gamma_{3P}} - T_c), \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{33}} = \alpha_{33} (T|_{\Gamma_{33}} - T_{\infty}^{(3)}). \quad (6)$$

Здесь P_{in} – мощность излучения, генерируемого магнетроном, Вт; Z – характеристическое сопротивление среды для однородной плоской электромагнитной волны типа H_{10} , Ом; Z_0 – характеристическое сопротивление вакуума; a, b – размеры сечения прямоугольного волновода, м; λ_0 – длина волны генератора, м; $(\lambda_{кр})_{H10}=2a$ – критическая длина волны в прямоугольном волноводе; \mathbf{n} – вектор внешней нормали к поверхности, ∇ – вектор "набла"; σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана Вт/(м²К⁴); T_c – температура воздуха, К; ε_3 – степень черноты материала (плиты или герметика); α_i – коэффициент конвективной теплоотдачи границе Γ_i , Вт/(м²К), $i=31, 3P, 32, 33$; $T_{\infty}^{(3)}$ – средняя температура грунта, К.

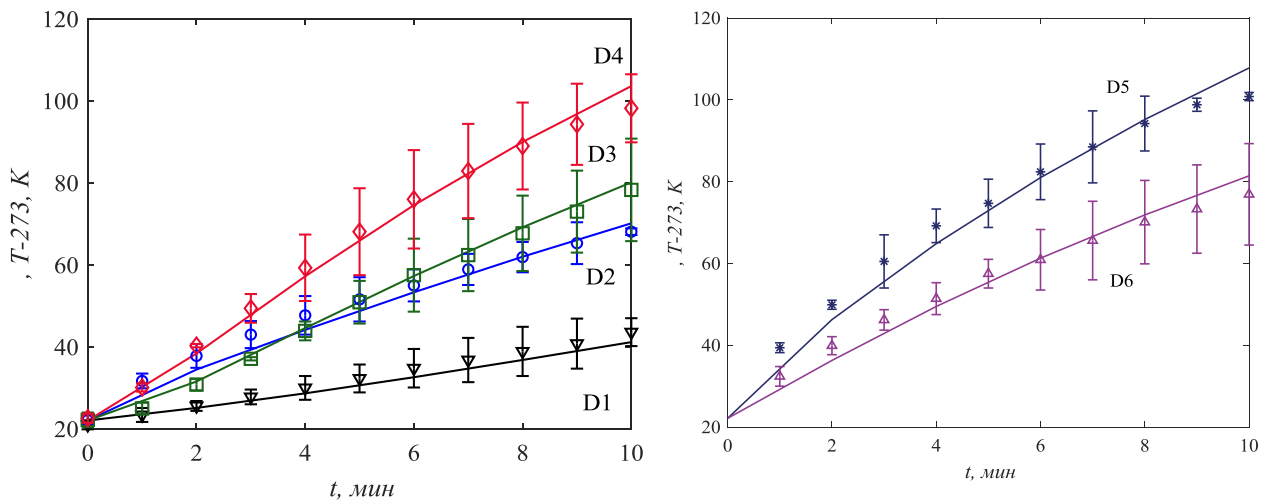
В расчетах, которые проведены с целью валидации математической модели, согласно условиям эксперимента считается, что на боковых границах фрагмента Γ_{31} происходит конвективная передача тепла.

Начальные условия.

$$T(\mathbf{r}, 0) = T_0, \quad \mathbf{r} \in V_3. \quad (7)$$

Математическая модель электродинамики и теплообмена при воздействии излучения СВЧ (1-7) допускает зависимость электрофизических параметров от температуры и в общем случае является сопряженной. В данной работе исследование модели выполнено для случая постоянных значений электрофизических параметров. Последовательно решаются стационарная задача электродинамики и нестационарная задача теплопроводности. Решение первой задачи дает распределение внутренних тепловых источников в расчетной области за счет диэлектрического нагрева.

Математическая модель реализована численно в 3D постановке на платформе COMSOL Multiphysics. Проведена успешная валидация модели. Результаты данных опыта и расчетных значений температуры, полученных на основе сформулированной математической модели СВЧ-нагрева составного элемента аэродромного покрытия (1-7) для трехслойного шва показаны на Рисунке 4.



а)

б)

Рисунок 4 – Зависимость от времени значения температуры, измеренного в натурном эксперименте и рассчитанного по математической модели (1-7). Маркеры – экспериментальные значения, полученные с помощью датчиков D1-D4 – а) и D5-D6 – б). Непрерывные кривые – расчет

На рисунках 5-9 представлены результаты расчетов для значения мощности магнетрона $P_{in}=75$ кВт с частотой излучения $f=915$ МГц. Как видно из Рисунка 5, где представлено объемное распределение модуля вектора напряженности электрического поля и рисунка 6, иллюстрирующего распределение $|E|$ по вертикальной оси рупорной антенны, видно, что зависимость $|E|$ от координат имеет существенно нелинейный характер. Поэтому температурное поле, которое формируется в результате диэлектрического нагрева, является неоднородным. Мощность тепловых источников зависит как от амплитуды и частоты колебаний вектора напряженности электрического поля, так и от диэлектрических свойств материалов шва, подвергаемых облучению.

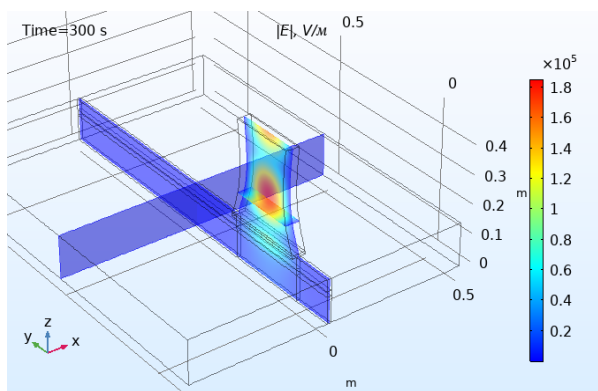


Рисунок 5 - Стационарное распределение модуля вектора напряженности электрического поля $|E|$, В/м

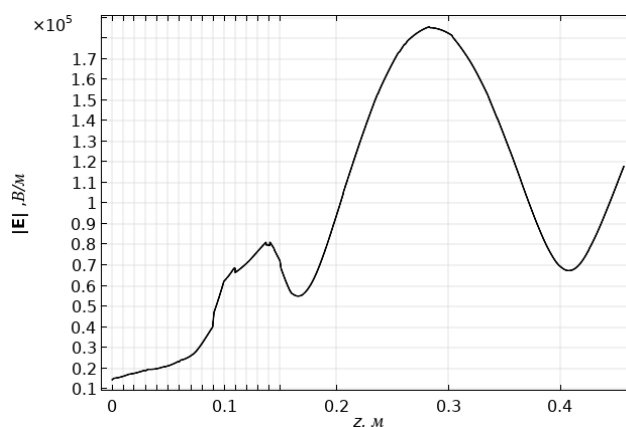


Рисунок 6 - Распределение модуля вектора напряженности электрического поля $|E|$, В/м вдоль вертикальной оси симметрии рупорной антенны

Графики на Рисунке 7 иллюстрируют рост температуры в поверхностном слое герметика по оси шва при перемещении установки. Очевидно, что на распределение температуры влияет как мощность тепловых источников, так и теплофизические свойства нагреваемых материалов, определяющие скорость процесса теплопередачи в слоях деформационного шва.

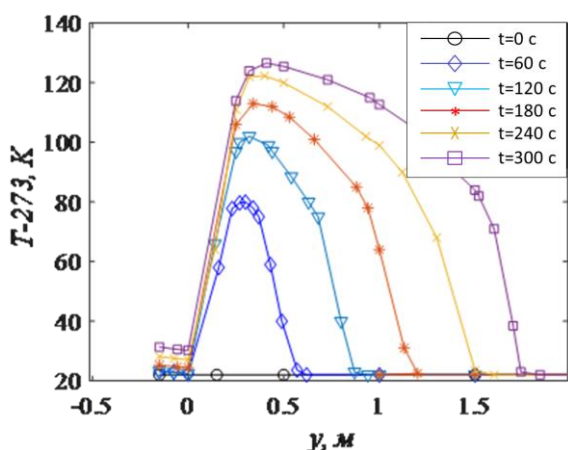


Рисунок 7 - Температура T , К на поверхности герметика вдоль продольной оси трехслойного шва в различные моменты времени при скорости смещения СВЧ установки $V=0,005$ м/с

Расчеты показывают, что для $P_{in}=75$ кВт, $f=915$ МГц при скорости движения излучателя $V=0.005$ м/с поверхностный слой герметика разогревается до температуры текучести, что должно привести к заплыванию дефектов в этом слое и улучшению его защитных свойств. Более высокое значение скорости установки $V=0.0075$ м/с уже не позволит выполнить необходимый разогрев герметика на основе битума. Пониженная скорость $V=0.0025$ м/с ведет к недопустимому перегреву, достигается температура, соответствующая условиям

вспышки.

Вычислительный эксперимент на основе математической модели позволяет сделать вывод о том, что основные режимные параметры, которые определяют интенсивность термообработки – это мощность и частота СВЧ излучения, а также скорость движения источника.

Расчетная величина скорости, удовлетворяющая задачам термической обработки, полученная для магнетрона мощностью 75 кВт на частоте 915 МГц, составила 0.3 м/мин. Для изучения более производительных режимов термообработки проведены расчеты СВЧ нагрева цементобетонного покрытия с использованием нескольких антенн (до пяти).

Плотность тепловых источников I_{mw} , порождаемых каждым электромагнитным излучателем, распределена неравномерно по объему фрагмента, что обусловлено как структурой генерируемой электромагнитной волны, так и различными электрофизическими свойствами материалов. В зоне, где уложен полимерный шнур, диэлектрический нагрев практически не наблюдается, поскольку значение тангенса угла диэлектрических потерь полиэтилена весьма мало и на несколько порядков ниже, чем у остальных трех материалов. Отметим, что в зоне герметика мощность тепловых источников распределена по высоте более равномерно, чем для цементно-песчаной смеси. Для СВЧ излучения с рассматриваемыми параметрами имеет место существенный разогрев цементно-песчаной смеси в верхней части слоя (под уплотнительным шнуром) и незначительный разогрев в части слоя, прилегающей к грунту, что связано с интенсивным затуханием амплитуды электромагнитной волны в этом слое.

Рисунок 8 показывает, что добавление волноводов в конструкцию мобильной системы значительно интенсифицирует разогрев слоя герметика.

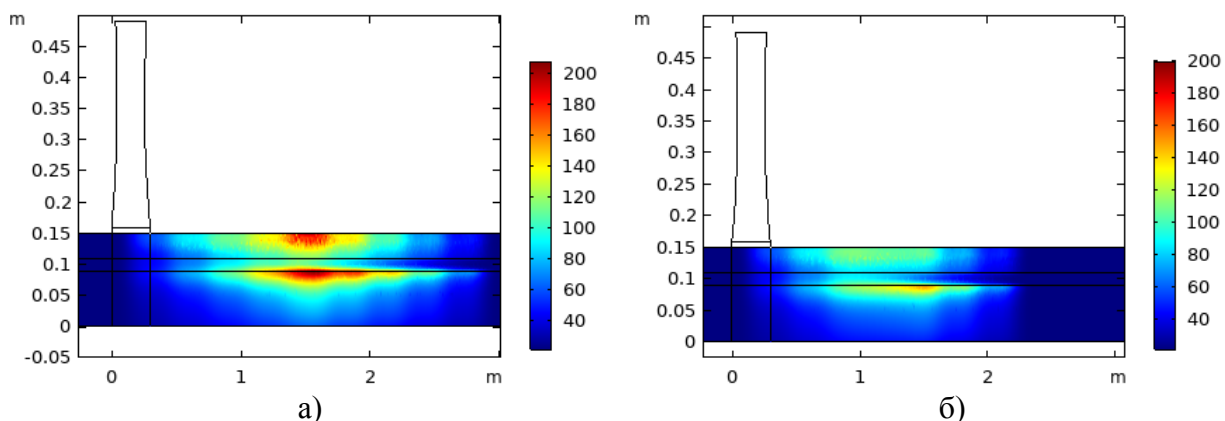


Рисунок 8 - Распределение температуры $T-273$, К в вертикальной плоскости симметрии 3-х слойного деформационного шва при СВЧ обработке мобильными системами из пяти антенн – а), трех – б), для момента времени $t=100$ с. $V=0.9$ м/мин

Так, для одинаковой скорости движения $V=0.9$ м/мин за 100с система с 5 антеннами осуществляет разогрев герметика в поверхностном слое до температуры ~ 200 °С, а с 3 антеннами – до ~ 140 °С.

На Рисунке 9 представлено развитие профиля температуры по высоте фрагмента при $y=1,5$ м. Наблюдаются два максимума температуры, относящиеся к слою герметика вблизи внешней границы, а также к пескоцементной смеси вблизи с её внутренней границей со шнуром. Имеется также минимум на температурных профилях, который указывает на меньший нагрев зоны уплотнителя, по сравнению с герметиком и пескоцементной смесью. Разница между максимальным и минимальным значением температуры зависит от режима (количества применяемых волноводов). Как показали расчеты, для выбранных параметров эта разница наиболее заметна при существенном нагреве (5 волноводов) и малозначительна при нагреве одним волноводом.

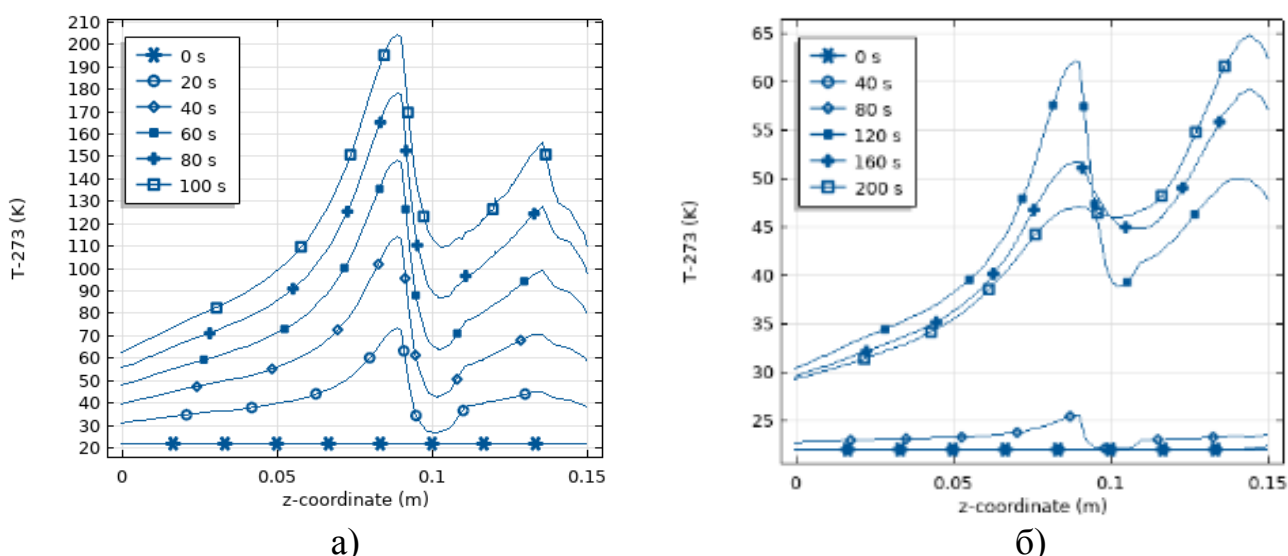


Рисунок 9 - Изменение температуры T , К в различные моменты времени вдоль вертикального отрезка, проведенного через точку с координатами $x=a_{ш}/2$, $y=1.5$ м при СВЧ обработке деформационного шва мобильной системой из 5 антенн - а), 1 – б)

На Рисунке 10 показаны температурные изолинии в том поперечном сечении фрагмента, где фиксируется максимальная температура ($y=3$ м, $t=240$ с). Наибольшее значение температуры бетона более чем на 100 К превышает наибольшее значение температуры герметизирующего материала на основе битума. При удалении от зоны деформационного шва температура бетона снижается за счет теплоотвода в объем бетонной плиты, в грунт и атмосферу.

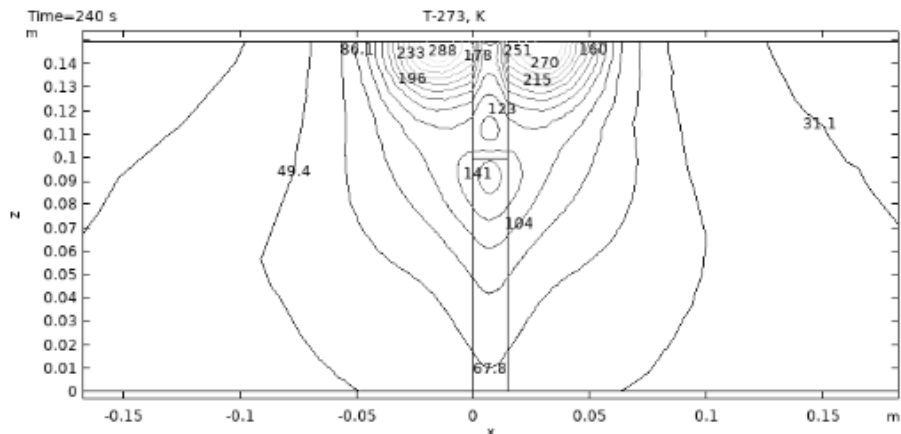


Рисунок 10 – Изотермы в двухслойном деформационном шве и окружающих бетонных плитах в сечении перпендикулярном оси симметрии шва при $y=3$ м, $V=0,015$ м/с, $t=240$ с

Моделирование СВЧ нагрева двух- и трехслойного деформационного шва при одинаковых условиях обработки показало, что температура герметика в трехслойной конструкции выше, чем в двухслойной (Рисунок 11). Разница значений температуры в верхнем заполнителе, например, в его центре, достигает приблизительно 10 К для двух видов швов.

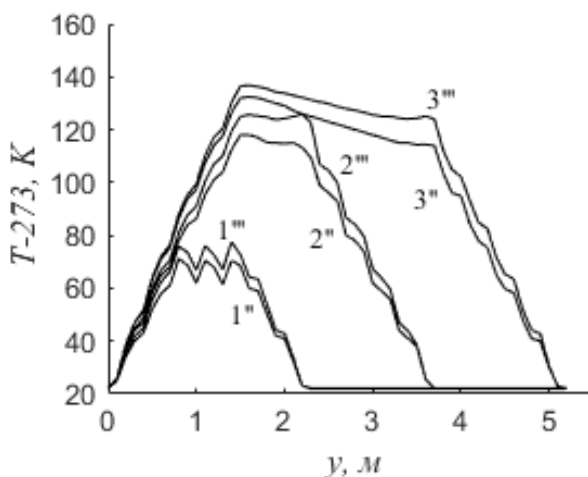


Рисунок 11 – Профили температуры в слое герметика вдоль направления, параллельного оси симметрии шва, при $z=H-0.025$ м, для двухслойного (1''-3'') и трехслойного (1'''-3''') деформационных швов при скорости мобильной СВЧ системы из 5 волноводов $V=0,015$ м/с: в различные моменты времени $t=48$ с – 1'' и 1''', 144 – 2'' и 2''', 240 – 3'' и 3'''

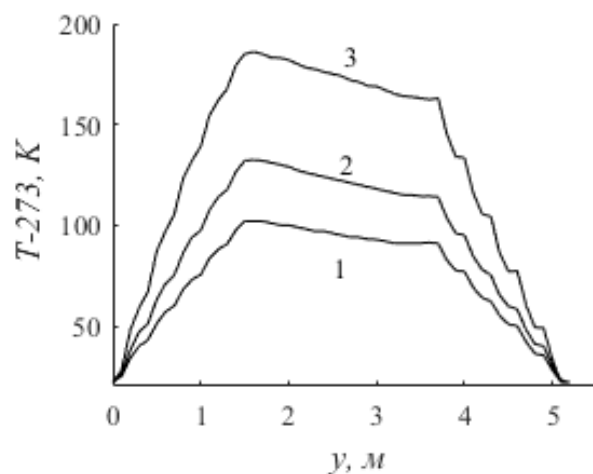


Рисунок 12 – Профили температуры в вдоль оси симметрии слоя битума слое герметика вдоль направления, параллельного оси симметрии двухслойного шва ($z=H-0.025$ м), при различной скорости мобильной СВЧ системы из 5 антенн на одинаковом перемещении $s=3.6$ м: $V=0.02$ – 1, 0.015 – 2, 0.01 м/с – 3

Этот эффект объясняется тем, что амплитуда электромагнитных волн, отраженных от границы герметик-полимер, выше, чем от границы герметик-пескоцементная смесь. Следовательно, суммарная мощность тепловыделения, обусловленная суперпозицией падающих и отраженных волн, выше в случае трехслойного шва.

Графики на Рисунке 12 позволяют проанализировать влияние скорости движения мобильной СВЧ системы на процесс нагрева герметизирующего заполнителя деформационного шва. Температурные кривые на Рисунке 12 построены вдоль оси симметрии битумного слоя. Для выбранных условий расчета при пониженной скорости движения 0,02 м/с, температура битума оказывается слишком низкой для оптимального прогрева. Когда же скорость мобильной системы снижается вдвое до 0,01 м/с, температура битума становится чрезмерно высокой, что ведет к его перегреву. Скорость движения $V=0.015$ м/с, вероятно является наиболее приемлемой.

В четвертой главе диссертации представлены технические решения (патенты РФ на изобретение и полезные модели № 2783131 С9 РФ и № 210068 U1 РФ), разработанные на основе проведенных исследований.

Предложена схема самоходного СВЧ устройства (Рисунок 13), обеспечивающего равномерный нагрев герметика в деформационном шве, при котором герметизирующий материал переходит в текучее состояние и происходит «заплывание» в нем мелких дефектов - небольших нарушений сплошности в объеме герметика и отслоений герметика от поверхности цементобетонных плит. Перспективная технология восстановления герметичности швов предполагает перемещение СВЧ установки с расчетной скоростью вдоль оси шва и контроль температуры обработанного герметика с помощью измерителя температуры с датчиками из термоэлементов быстрого реагирования.

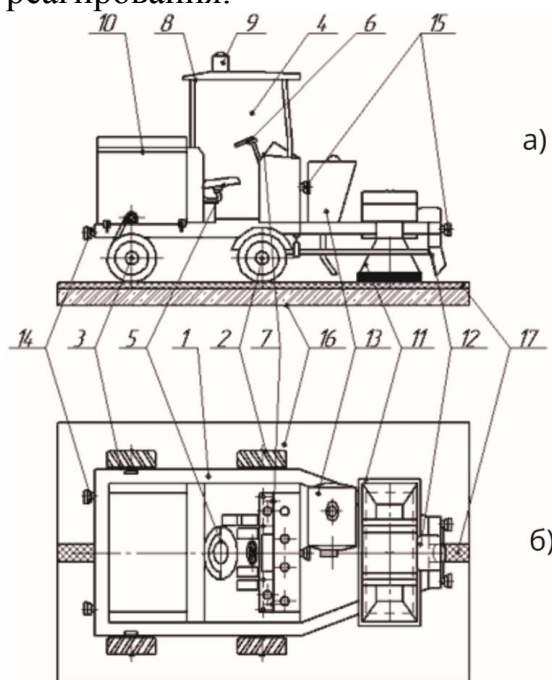


Рисунок 13 – Конструкция самоходного устройства для обработки швов жестких аэродромных и дорожных покрытий: 1 - передвижная рама; 2 - ведомые колеса; 3 - ведущие колеса; 4 - рабочее место оператора; 5 - сиденье оператора; 6 - руль; 7 - панель управления; 8 - рамный тентовый навес; 9 - проблесковое сигнальное устройство; 10 - силовой блок; 11 - СВЧ излучатель; 12 - компрессорное устройство; 13 - дозатор для праймера; 14 - система освещения на задней части; 15 - система освещения на передней части; 16 - обрабатываемое покрытие; 17 - обрабатываемый шов.

а) вид сбоку; б) вид сверху

Отдельно исследован вопрос безопасной работы персонала с установкой для СВЧ нагрева герметизирующего материала в деформационном шве. Выполнены измерения плотности потока энергии электромагнитного поля, создаваемого экспериментальной СВЧ установкой. В соответствии с нормами СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» разработана методика расчета параметров безопасной зоны работы обслуживающего персонала СВЧ установки, предназначенной для термообработки деформационных швов цементобетонных покрытий. Расчеты показывают, например, для лабораторной установки, что минимальный радиус безопасной зоны для выполнения операций за период ~12 минут за смену составляет $R=100$ см, или максимальный период кратковременного пребывания обслуживающего персонала вблизи установки на расстоянии $R=50$ см не должен превышать 3 минуты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан способ профилактической термообработки деформационных швов цементобетонных покрытий с использованием СВЧ энергии для предупреждения их преждевременного разрушения, заключающийся в ликвидации мелких дефектов, которые обычно инициируют процесс разрушения шва.

2. Спроектированы и созданы лабораторная установка, а также модель фрагмента цементобетонного покрытия, с использованием которых доказана работоспособность предложенного способа увеличения периода эксплуатации деформационных швов. Получены зависимости температуры от времени в фиксированных точках двух- и трехслойных деформационных швов при СВЧ воздействии. Относительная случайная погрешность в опытах не превышает 18 %.

3. Разработана сопряженная нестационарная математическая модель СВЧ нагрева деформационного шва применительно к цементобетонному покрытию, адекватность которой доказана на основе данных натурного эксперимента СВЧ нагрева двух- и трехслойных деформационных швов. Математическая модель может быть использована как на этапе проектирования, так и при выборе наиболее эффективных режимов термообработки деформационных швов для заданного комплекса тепло- и электрофизических параметров материалов, заполняющих шов, а также геометрических характеристик шва.

4. Выявлены особенности развития температурного поля в деформационном шве, подтвержденные экспериментально, когда в определенный период времени более глубокие слои могут прогреваться более значительно, чем слои близкие к поверхности, что обусловлено немонотонным убыванием модуля вектора напряженности электрического поля от поверхности покрытия в глубину и различными тепло- и электрофизическими свойствами материалов, заполняющих шов.

5. Показано, что для выбранных условий обработка трехслойного деформационного шва с применением мобильной системы, включающей три

СВЧ антенны рупорного типа ($P_{in}=75$ кВт, $f=915$ МГц), при скорости перемещения $\sim V=0.9$ м/мин в слое герметика достигается температура текучести. При этом максимальное значение температуры остается ниже температуры вспышки.

6. Предложена схема самоходного СВЧ устройства, обеспечивающего равномерный нагрев герметика в деформационном шве, при котором герметизирующий материал переходит в текучее состояние и восстанавливается его целостность.

7. Разработана методика эксперимента, позволяющая применительно к разработанному устройству микроволнового нагрева деформационных швов цементобетонных покрытий получить рекомендации по длительности безопасной работы персонала при работе с мобильной СВЧ системой. В частности, максимальный период кратковременного пребывания обслуживающего персонала вблизи работающей лабораторной установки на расстоянии 50 см не должен превышать 3 минуты за рабочую смену.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК РФ

1. Дорняк, О. Р. Математическое моделирование диэлектрического нагрева двухслойного деформационного шва жесткого аэродромного покрытия / О. Р. Дорняк, А. Б. Недоносков // Вестник Московского энергетического института. – 2025. – № 6. – С. 106-116. – DOI 10.24160/1993-6982-2025-6-106-116.

2. Дорняк, О. Р. Моделирование режимов СВЧ-обработки деформационных швов / О. Р. Дорняк, А. Б. Недоносков // Промышленные процессы и технологии. – 2024. – Т. 4, № 1(11). – С. 99-111. – DOI 10.37816/2713-0789-2024-4-1(11)-99-111.

Публикации в прочих изданиях

3. Дорняк О.Р. Моделирование процессов нагрева трехслойного заполнителя деформационного шва в электромагнитном поле СВЧ диапазона / О.Р. Дорняк, А.Б. Недоносков, З.А. Шабунина // Инженерно-физический журнал. – 2024. – Т. 97, № 7. – С. 1697-1703.

4. Dornyak, O. R. Heat Transfer in a Three-Layer Strain Joint System at Microwave Heating / O. R. Dornyak, A. B. Nedonoskov // Optics and Spectroscopy, 2024, Vol. 132, No. 1, pp. 1-8. – DOI 10.1134/s0030400x24700279.

5. Дорняк, О. Р. Теплоперенос в трехслойной системе деформационного шва при СВЧ-нагреве / О. Р. Дорняк, А. Б. Недоносков // Тепловые процессы в технике. – 2023. – Т. 15, № 8. – С. 364-373.

6. Dornyak, O. R. Modeling the Process of Heating of a Three-Layer Strain-Joint Filler in a Microwave-Range Electromagnetic Field / O. R. Dornyak, A. B. Nedonoskov, Z. A. Shabunina // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2024. – Vol. 97, No. 7. – P. 1697-1703. – DOI 10.1007/s10891-024-03048-0.

7. Дорняк, О. Р. Экспериментальное исследование температурных параметров цементобетонного покрытия при СВЧ-нагреве деформационного шва / О. Р. Дорняк, А. Б. Недоносков // Вестник Приамурского

государственного университета им. Шолом-Алейхема. – 2023. – № 1(50). – С. 22-29. – DOI 10.24412/2227-1384-2023-150-22-29.

8. Недоносков, А. Б. СВЧ-установка для термообработки деформационных швов жестких аэродромных покрытий / А. Б. Недоносков, О. Р. Дорняк // Промышленные процессы и технологии. – 2022. – Т. 2, № 2. – С. 100-107. – DOI 10.37816/2713-0789-2022-2-2(4)-100-107.

9. Дорняк, О. Р. Способ термообработки деформационного шва аэродромного покрытия с использованием СВЧ-воздействия / О. Р. Дорняк, А. Б. Недоносков // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2021. – № 17. – С. 66-75.

10. Дорняк, О. Р. Моделирование процесса нагрева трехслойного заполнителя деформационного шва в электромагнитном поле СВЧ диапазон / О. Р. Дорняк, А. Б. Недоносков, З. А. Шабунина // Материалы XVII Минского международного форума по тепло- и массообмену, Минск, 20–24 мая 2024 года. – Минск: Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2024. – С. 422-425.

11. Дорняк, О. Р. Моделирование процесса нагрева двухслойного заполнителя деформационного шва в электромагнитном поле СВЧ диапазона / О. Р. Дорняк, А. Б. Недоносков // Теплофизические исследования и возобновляемая энергетика : Материалы 14-ой международной теплофизической школы, Душанбе, Тамбов, Казань, 09–10 декабря 2024 года. – Душанбе: Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими, 2024. – С. 74-79.

12. Дорняк О. Р. Безопасность персонала при работе с установкой для СВЧ-нагрева битумно-полимерного герметика в деформационном шве / О. Р. Дорняк, А. Б. Недоносков, Е. В. Бредихина // Повышение энергоресурсоэффективности, экологической и технологической процессов и аппаратов химической отраслей промышленности [текст]: сборник научных трудов международного научно-технического симпозиума, посвящённого 120-летию со дня рождения П. Г. Романкова (ISTS «EESTE-2024»): Т. 2 / М.: «РГУ им. А. Н. Косыгина», 2024 – 254 с. – С. 79-83. – DOI 10.37816/eeste-2024-2-79-83.

13. Дорняк, О. Р. Моделирование теплообмена в жестких аэродромных покрытиях при СВЧ-нагреве двухслойного деформационного шва / О. Р. Дорняк, А. Б. Недоносков // Современные энергосберегающие тепловые и массообменные технологии (сушка, тепловые и массообменные процессы) СЭТМТ - 2023 : Сборник научных трудов Восьмой Международной научно-практической конференции, Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К. А. Тимирязева, 17–19 октября 2023 года. – Москва: ООО «Мегаполис», 2023. – С. 109-114.

14. Недоносков, А.Б. Восстановление эксплуатационных свойств деформационных швов аэродромных покрытий / А.Б. Недоносков, А.Н. Внуков, О.Р. Дорняк // Актуальные проблемы инженерно-аэродромного обеспечения базирования авиации в современных условиях и пути их решения: Сборник научных статей по материалам V Всероссийской научно-практической

конференции «Инфраструктура», Воронеж, 06–07 октября 2021 года. – Воронеж: «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), 2021. – 113 с. – С. 64-67.

15. Дорняк, О. Р. Моделирование СВЧ-нагрева заполнителей деформационного шва / О. Р. Дорняк, А. Б. Недоносков // Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности (ISTS «EESTE-2021») : Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума, посвященного 110-летию А.Н. Плановского, в рамках Третьего Международного Косыгинского форума «Современные задачи инженерных наук», Москва, 20–21 октября 2021 года. Том 1. – Москва: «Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», 2021. – С. 103-105. – DOI 10.37816/eeste-2021-1-103-105.

Патенты

16. Патент на полезную модель № 208062 U1 Российская Федерация, МПК E01C 23/06, B62D 63/02. самоходное устройство для обработки швов жестких аэродромных и дорожных покрытий СВЧ-излучением : № 2021123011 : заявл. 29.07.2021 : опубл. 01.12.2021 / А. Б. Недоносков, А. Н. Внуков, А. Г. Белых [и др.].

17. Патент на полезную модель № 210068 U1 Российская Федерация, МПК H05B 6/64, E01C 23/14, E01C 23/06. СВЧ-излучатель для обработки швов жестких аэродромных и дорожных покрытий : № 2021123008 : заявл. 29.07.2021 : опубл. 28.03.2022 / А. Б. Недоносков, А. Н. Внуков, О. Р. Дорняк [и др.].

18. Патент № 2783131 C9 Российская Федерация, МПК E01C 23/09. Способ обработки и восстановления рабочих свойств швов жестких аэродромных и дорожных покрытий : № 2021134425 : заявл. 24.11.2021 : опубл. 25.05.2023 / А. Б. Недоносков, А. Н. Внуков, О. Р. Дорняк [и др.].

Подписано в печать 05.02.2026г.

Формат 60×84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 85 экз. Заказ № 319

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

394026, г. Воронеж, 20-летия Октября, д. 84