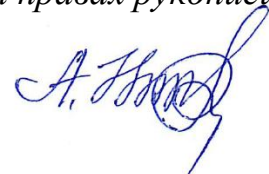


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ КАЗЕННОЕ ВОЕННОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЕННЫЙ УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ВОЕННО-ВОЗДУШНЫХ СИЛ
«ВОЕННО-ВОЗДУШНАЯ АКАДЕМИЯ ИМЕНИ ПРОФЕССОРА
Н.Е.ЖУКОВСКОГО И Ю.А.ГАГАРИНА» (Г. ВОРОНЕЖ) МИНИСТЕРСТВА
ОБОРОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

На правах рукописи



НЕДОНОСКОВ Александр Борисович

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

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент
Дорняк Ольга Роальдовна

Воронеж – 2026

Оглавление

Введение.....	5
1. СВЧ нагрев в аэродромном и дорожном строительстве	13
1.1 Деформационные швы цементобетонных покрытий и их дефекты возникающие при эксплуатации	13
1.2 Современные способы ремонта деформационных швов цементобетонных покрытий	17
1.3 Анализ технических решений по применению электромагнитного излучения в СВЧ диапазоне для интенсификации тепловых процессов в дорожном и аэродромном строительстве	19
1.4 Экспериментальные исследования диэлектрического нагрева строительных материалов.....	26
1.5 Теоретические исследования процессов тепло- и массопереноса при СВЧ воздействии	31
1.6 Выводы. Цель и задачи исследования.....	33
2. Экспериментальное исследование процесса интенсивной термообработки деформационного шва цементобетонного покрытия с использованием СВЧ воздействия	35
2.1 Способ термообработки деформационного шва цементобетонного покрытия с использованием СВЧ воздействия.....	35
2.2 Оценка режимных параметров СВЧ термообработки материалов, используемых в конструкциях цементобетонных покрытий	37
2.2.1 Математическая модель СВЧ нагрева битумного слоя движущимся источником излучения без учета структуры электромагнитной волны	37
2.2.2 Параметры расчетов и результаты численного решения задачи	40
2.2.3 Ограничения модели и задачи следующего этапа моделирования процесса диэлектрического нагрева деформационных швов цементобетонных покрытий	46
2.3 Экспериментальное исследование нагрева деформационного шва цементобетонного покрытия	47
2.3.1 Описание экспериментальной установки и методика проведения эксперимента	47
2.3.2 Обработка результатов эксперимента	61
2.4 Выводы	64
3. Математическое моделирование процесса нагрева двух- и трехслойного заполнителя деформационного шва в электромагнитном поле СВЧ диапазона....	65

3.1 Математическая модель.....	65
3.2 Валидация математической модели интенсивного нагрева деформационного шва и прилегающих плит цементобетонного покрытия	72
3.2.1 Расчетные параметры	73
3.2.2 Численное исследование математической модели интенсивного СВЧ нагрева двухслойного деформационного шва в условиях натурного эксперимента	75
3.2.3 Численное исследование математической модели интенсивного СВЧ нагрева трехслойного деформационного шва в условиях натурного эксперимента	78
3.3 Результаты вычислительного эксперимента для выбора режимов термообработки трехслойного деформационного шва цементобетонного покрытия.....	83
3.3.1 Влияния скоростного режима СВЧ установки на эффективность нагрева герметизирующего материала трехслойного деформационного шва цементобетонного покрытия	83
3.3.2 Интенсификация процесса термообработки трехслойных деформационных швов с использованием мобильных систем с несколькими СВЧ антеннами.....	89
3.4 Результаты вычислительного эксперимента для выбора режимов термообработки двухслойного деформационного шва цементобетонного покрытия.....	94
3.5 Выводы	101
4. Технические решения и технико-экономическое обоснование эффективности применения способа профилактической СВЧ обработки деформационных швов для поддержания высоких эксплуатационных характеристик цементобетонных покрытий	103
4.1 Самоходное устройство для обработки швов цементобетонных покрытий СВЧ излучением	103
4.2 Способ профилактики преждевременного разрушения деформационных швов цементобетонных покрытий.....	107
4.3 Исследование вопросов безопасной работы персонала с установкой для СВЧ нагрева битумно-полимерного герметика в деформационном шве.....	109
4.4 Техничко-экономическое обоснование применения способа профилактики преждевременного разрушения деформационных швов цементобетонных покрытий с использованием СВЧ нагрева.....	114
4.5 Выводы	118
Заключение	119

Список сокращений и условных обозначений	121
Список литературы	123
Приложения	139
Приложение А.....	139
Приложение Б	144
Приложение В.....	147

Введение

Актуальность темы. В число приоритетных целей, выделенных транспортной стратегией Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года, входит развитие сети аэродромов (аэропортов) гражданской авиации, что предусматривает как их новое строительство, так и модернизацию, реконструкцию и ремонт инфраструктуры уже существующих объектов.

В процессе эксплуатации покрытий жесткого типа под воздействием множества эксплуатационных и климатических факторов происходит их разрушение, которое проявляется в виде различных дефектов. К одному из наиболее характерных видов деформаций и разрушений цементобетонных и других покрытий жесткого типа относится разрушение материала заполнителей деформационных швов.

Как показывает практика эксплуатации цементобетонных покрытий, срок их службы часто меньше нормативного, а нарушение герметичности деформационных швов происходит уже в первые годы эксплуатации покрытия. Попадание воды через негерметичные швы между слоями покрытия приводит к переувлажнению основания и, как следствие, к просадке и разрушению отдельных плит. В настоящее время применяется традиционная технология ремонта цементобетонных покрытий, которая 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, равномерность, объемный характер, экологичность, высокий КПД преобразования СВЧ энергии в тепловую. Применение СВЧ технологий открывает новые возможности обеспечения высокого качества деформационных швов при более длительных межремонтных сроках. Профилактическая интенсивная тепловая обработка деформационного шва позволяет ликвидировать мелкие дефекты в герметизирующем материале. Важно, что при этом не

требуется прерывать режим эксплуатации покрытия. Для реализации такого подхода необходимо осуществить создание установок, реализующих процесс СВЧ нагрева деформационного шва, а также выполнить поиск наиболее эффективных режимов их работы. Поэтому исследование процессов теплообмена при СВЧ нагреве деформационных швов цементно-бетонных 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.

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 цементобетонных покрытий, 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; основные результаты эксперимента.

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. Работа содержит научно-обоснованные технические и технологические решения, направленные на увеличение межремонтных сроков эксплуатации жестких цементобетонных покрытий и сокращение затрат на проведение ремонта покрытий данного вида за счет профилактической обработки деформационных швов покрытия с использованием СВЧ энергии в качестве источника нагрева герметизирующего материала деформационных швов:

1. Разработан оригинальный способ профилактической обработки деформационных швов цементобетонных покрытий с использованием СВЧ

энергии в качестве источника нагрева герметизирующего материала деформационных швов (патент РФ № 2783131 С9), позволяющий увеличить межремонтные сроки эксплуатации деформационных швов цементобетонных покрытий.

2. Экспериментально с помощью специальной лабораторной установки подтверждена работоспособность предложенного технического решения, направленного на поддержание высокого качества деформационных швов цементобетонных покрытий, за счет периодического нагрева герметизирующего слоя с использованием энергии электромагнитного поля сверхвысоких частот.

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, зависящие от мощности и частоты излучения, количества излучателей, комплекса тепло- и электрофизических параметров заполнителей шва и окружающих плит, позволяющие разогреть герметизирующий материал до температуры текучести, но не допускающие его перегрев выше температуры вспышки.

5. Разработаны новые технические решения (патенты РФ на полезную модель № 208062 U1, № 210068 U1), обеспечивающие нагрев герметика в деформационном шве, переход его в текучее состояние, и «заплывание» мелких дефектов – небольших трещин и отслоений герметика от поверхности цементобетонных плит.

6. Разработана методика эксперимента, позволяющая выполнять оценку длительности безопасной работы персонала при работе с мобильной СВЧ системой, применительно к процессу термообработки деформационных швов цементобетонных покрытий.

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 параметры 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 квадратичная погрешность результатов опытов составила менее 18%.

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

Достоверность научных разработок подтверждена экспертизами РОСПАТЕНТ и ФИПС с признанием полученных технических решений изобретением и полезными моделями.

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 в 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.

1. СВЧ нагрев в аэродромном и дорожном строительстве

1.1 Деформационные швы цементобетонных покрытий и их дефекты возникающие при эксплуатации

Деформационные швы формируются в конструкциях цементобетонных покрытий для обеспечения их надежности и долговечности [1-3].

В строительстве различают как деформационные швы, включая швы сжатия и расширения, так и рабочие или технологические швы. Деформационные швы сжатия обеспечивают возможность сокращения длины бетонных плит во время усадки материала и при снижении температуры, при этом их исполнение может быть сквозным или ложным. Деформационные швы расширения выполняют все функции швов сжатия, однако также позволяют плитам свободно деформироваться при повышении температуры бетона, способствуя тем самым сохранению продольной стабильности покрытия. При отсутствии таких швов температурные напряжения могут вызвать сколы и относительное смещение продольных рядов плит, при этом нарушается целостность конструкции жесткого покрытия.

Согласно требованиям, разработанным Федеральным центром нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве [2], шовные соединения должны соответствовать определенным характеристикам: обеспечивать возможность горизонтального сдвига плит; сохранять структурную целостность покрытия; исключать любые неровности поверхности; быть непроницаемыми для воды; не снижать функциональные свойства покрытия; а также быть легкими в монтаже и эксплуатации.

Деформационные швы в жестких покрытиях следует защищать от проникновения атмосферных осадков и технических жидкостей, предотвращать их загрязнение песком, гравием и прочими материалами.

Шов сжатия, обеспечивающий нужные зазоры между плитами для их свободного расширения и сжатия в условиях колебаний температуры, формируется с прямоугольным профилем. Ширина этого шва колеблется от 8 до

15 мм, выбор конкретного размера зависит от габаритов самих бетонных элементов.

Глубина паза шва должна составлять минимум $1/3$ толщины плиты для случаев, когда её толщина не превышает 30 см, и минимум $1/2$ толщины при более значительных размерах свыше 30 см (Рисунок 1.1 а). Разрешается формирование ступенчатого компрессионного шва с возможностью сужения его ниже уровня уплотнительного шнура [2].

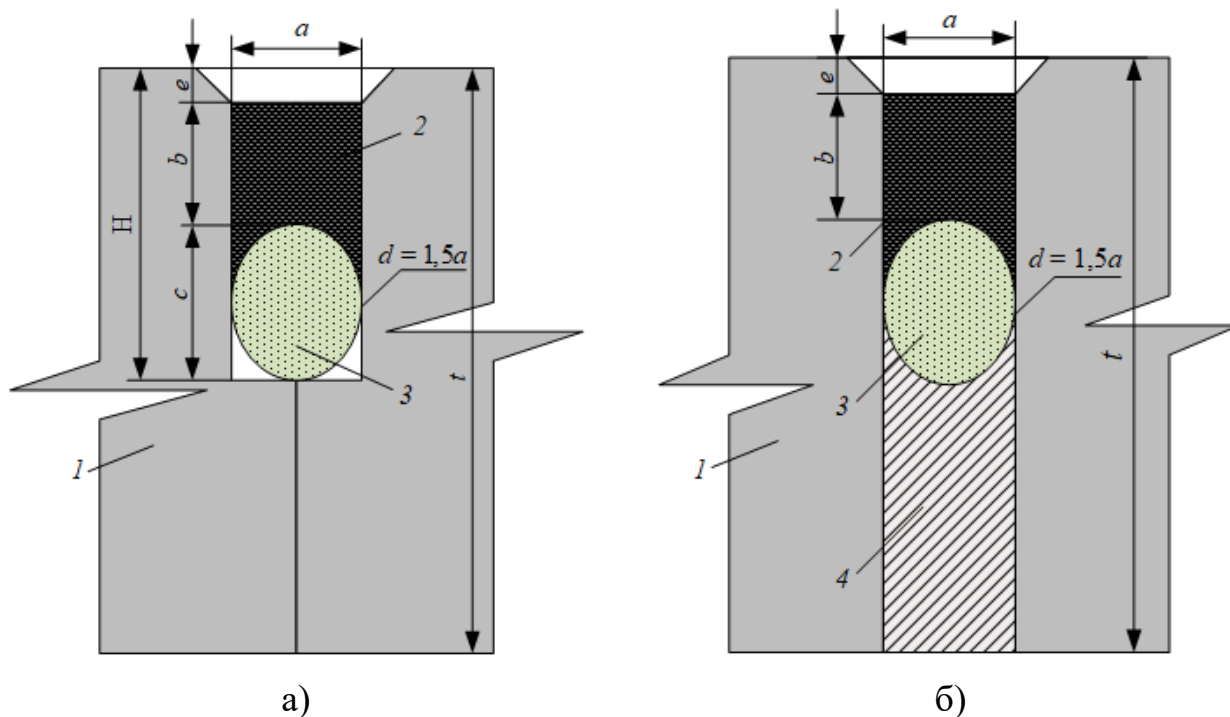


Рисунок 1.1 – Схемы заполнения швов сжатия (а) и расширения (б) жестких монолитных покрытий:

t – толщина плиты; H – высота шва; a – ширина шва; b – толщина герметика;

c – толщина уплотнительного шнура; e – высота фаски;

1 – плита; 2 – герметизирующая мастика; 3 – уплотнительный шнур; 4 – сухая пескоцементная смесь [2]

Швы расширения формируются сквозными. Созданный при этом паз, заполняются материалом, обладающим высокой деформационной способностью (Рисунок 1.1 б). Эти швы должны сохранять неизменную ширину по всей толщине конструкции. Размеры ширины шва устанавливаются до 3,5 см. Ширина шва зависит от удаленности соседних швов и эластичности применяемого герметика [2].

Герметизацию швов цементобетонных покрытий осуществляют как в ходе нового строительства, так и в ходе проведения ремонтно-восстановительных работ. Для заполнения деформационных швов широко используются такие материалы, как резинобитумные, полимерные и битумно-полимерные герметики, которые могут наноситься в горячем или холодном виде. Альтернативой могут служить готовые эластичные прокладки, соответствующие стандартам ГОСТ 30740-2000 (раздел 5) [4] и ГОСТ 32872-2014 (раздел 5) [5], гарантирующие надежность и долговечность швов.

В соответствии с СП 491.1325800.2020. «Аэродромы. Правила обследования технического состояния», утвержденным приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, одним из основных видов дефектов цементобетонных покрытий является разгерметизация деформационных швов [6].

В работах [7-11] установлено, что нарушение герметизации швов может быть вызвано старением герметика под воздействием климатических факторов; нарушением адгезии герметика к стенкам камеры шва вследствие его старения; механическим повреждением герметика в швах; нарушением технологии производства работ по устройству швов (отсутствие очистки, просушивания и подгрунтовки камеры шва; недостаточный прогрев или перегрев герметика при заполнении шва; выбор герметизирующего материала неподходящего для данных условий эксплуатации и т.п.). Чем выше степень нарушения герметичности швов, тем выше вероятность появления вторичных дефектов, таких как просадки, перекосы и коробление плит покрытия.

В процессе эксплуатации в верхнем слое шва может происходить накопление грунта, мелкого щебня и воды. Несжимаемые включения в материале шва препятствуют свободному деформированию плит при повышении температуры. Гибкий и связанный с кромками плит герметик защищает шов от мусора, не позволяет воде просачиваться и размывать основание под плитой [8].

Основные проявления нарушения герметизации шва иллюстрирует Рисунок 1.2. К ним относятся отслоение герметика, образование пузырей на поверхности

герметика, выдавливание герметика из шва, прорастание травы, скопление посторонних предметов (грязи, камней в шве), отвердевание (окисление) герметика, отсутствие герметика в шве [9-11].

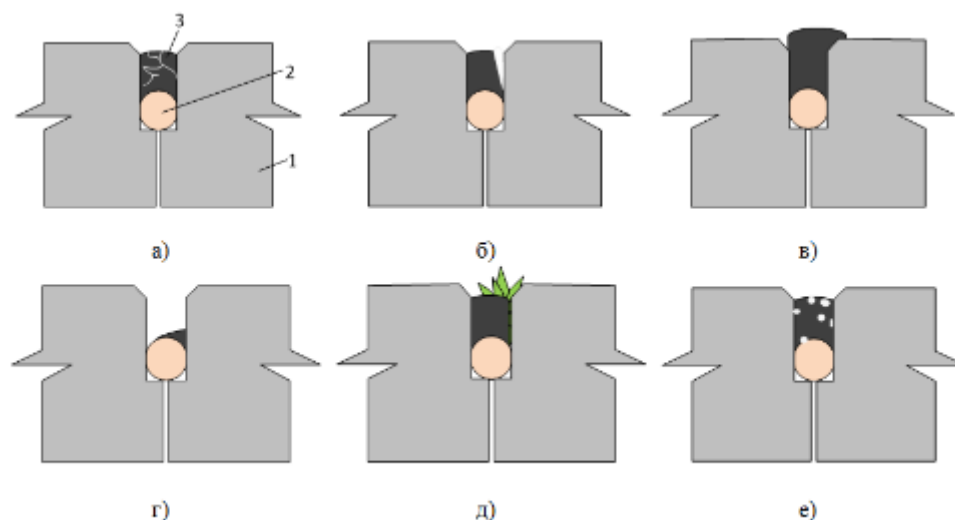


Рисунок 1.2 – Дефекты деформационных швов: растрескивание герметика – а); отслоение герметика от боковой стенки паза – б); выдавливание герметика из шва – в); выдиравание и растаскивание герметика по поверхности – г); прорастание травы – д); пузыри и кратеры на поверхности герметика – е); 1 – цементобетонная плита; 2 – уплотнительный шнур; 3 – герметизирующий материал

Таблица 1.1 – Степень разрушения герметизирующего материала деформационного шва [8]

Тип повреждения	Степень разрушения		
	низкая	средняя	высокая
Повреждение герметика в швах	<ul style="list-style-type: none"> - в нескольких швах герметик потерял сцепление, но находится в контакте с плитой; - в целом, герметик находится в хорошем состоянии 	<ul style="list-style-type: none"> - имеются видимые отверстия в герметике (до 3 мм), через которые возможно прохождение воды; - в шве обнаружены следы фонтанирования; - герметик окислился, но сохранил гибкость (подобно шнуру); - местами видна растительность в шве; - в целом, герметик в удовлетворительном состоянии 	<ul style="list-style-type: none"> - в целом, герметик в плохом состоянии, - не менее чем в 10 % швов герметик отсутствует или разрушен

Степень разрушения герметизирующего материала деформационного шва оценивается по признакам, приведенным в таблице 1.1 [8].

1.2 Современные способы ремонта деформационных швов цементобетонных покрытий

Проектный срок службы цементобетонных покрытий составляет 20-25 лет. Однако, опыт эксплуатации показывает, что фактический период между ремонтами этих покрытий существенно короче – порядка 3-5 лет, иногда даже меньше, что обусловлено различными факторами, как объективными, так и субъективными. Известно, что повреждения деформационных швов наступают еще до истечения указанного срока [12-14].

Для восстановления эксплуатационных свойств деформационных швов цементобетонных покрытий проводится их повторная герметизация, включающая в себя ряд технологических операций [2, 15-17].

В первую очередь, из паза шва удаляют старый герметик с использованием процедуры резки. При этом часто используют нарезчики, оборудованные алмазными дисками и системой водяного охлаждения. Герметик, изъятый из шва, не подлежит повторному использованию.

Процесс очистки паза шва от пыли, образовавшейся во время распила, и фрагментов старого заполнителя состоит из нескольких этапов. Первый шаг – это обдувка накопившегося шлама и частиц материала с использованием струи воздуха высокого давления из компрессора, совмещенная с промывкой места реза водой низкого давления. Далее следует обработка шва струей воды под высоким давлением, что позволяет удалить основные загрязнения. Заключительный этап – это дополнительная продувка шва сжатым воздухом высокого давления для эффективного устранения всех оставшихся после резки фрагментов.

Для эффективного удаления остатков старого герметика из паза шва и создания шероховатости на боковых стенках паза, что необходимо для улучшения адгезии с новым герметиком, рекомендуется применение пескоструйной

технологии. Этот метод включает использование специализированного пескоструйного оборудования, которое обычно состоит из компрессора, пескоструйной машины, соединительных шлангов и пистолета с насадкой подходящего диаметра.

Перед тем как выполнить герметизацию, необходимо тщательно очистить шов и прилегающие поверхности от песка, пыли и других загрязнений путем продувки швов сжатым воздухом. Давление в струе воздуха должно быть не менее 6 кг/см². Эта процедура продувки проводится непосредственно перед тем, как произвести запрессовку нового уплотнительного шнура в паз шва. Все процессы, включая продувку, запрессовку и непосредственно герметизацию, должны быть выполнены в течение одной рабочей смены для обеспечения должного качества работ.

При подготовке к герметизации, верхняя поверхность шовного паза покрывается грунтовым составом (праймером) с использованием кисти или специализированного распылительного устройства, например, шприца-распылителя. Грунтовка равномерно наносится тонким слоем на поверхности, нуждающиеся в дополнительной защите. Прежде чем приступить к нанесению герметика, необходимо дать праймеру полностью высохнуть.

При монтаже уплотнительного шнура целесообразно применять специальное устройство с удлиненной ручкой и диаметром рабочего диска в пределах 125-250 мм, подходящее для работы с любыми типами швов и исключаящее повреждение самого шнура. Обязательной характеристикой такого инструмента является наличие регулятора глубины запрессовки, что обеспечивает правильную укладку шнура.

Заполнение герметиком паза над уплотнительным шнуром следует проводить немедленно после его монтажа. Временной промежуток между установкой шнура и заливкой герметика в паз не должен составлять более 5-10 минут.

Заливка швов горячим герметиком производится после разогрева материала до рекомендуемой температуры, когда первые несколько швов будут полностью

подготовлены. Паз шва должен, как правило, заливаться за один проход до требуемого уровня. При этом должен быть исключен процесс образования воздушных пузырей.

Таким образом, стандартная технология ремонта деформационного шва предусматривает значительные временные и финансовые издержки. На практике такой ремонт приходится проводить достаточно часто. Поэтому поиск, разработка и внедрение инновационных методов, направленных на обеспечение высокого качества деформационных швов, гарантирующих постоянную эксплуатационную работоспособность цементобетонных покрытий, включая такие критически важные объекты, как взлетно-посадочные полосы аэропортов, становится приоритетной задачей.

1.3 Анализ технических решений по применению электромагнитного излучения в СВЧ диапазоне для интенсификации тепловых процессов в дорожном и аэродромном строительстве

Применение СВЧ энергии является одним из методов интенсификации ряда технологических операций строительной отрасли. Преимущества этого подхода, такие как точность локализации зоны энергоподвода и высокая мощность передачи энергии, лежат в основе создания новых технологий, цель которых – энергосбережение и высокое качество производимых технологических операций [18, 29].

В [19-22] обсуждаются технологии применения СВЧ нагрева при ремонте асфальтобетонных покрытий для устранения выбоин, трещин, ремонта стыков полос движения, примыканий дорог, в том числе, в зимнее время. Отмечается, что при использовании данной технологии удастся избежать затратных этапов демонтажа исходного покрытия, его транспортировки и производства нового асфальта.

Предлагаемая в [23, 24] технология переработки старого асфальтобетона для последующего использования при строительстве и ремонте

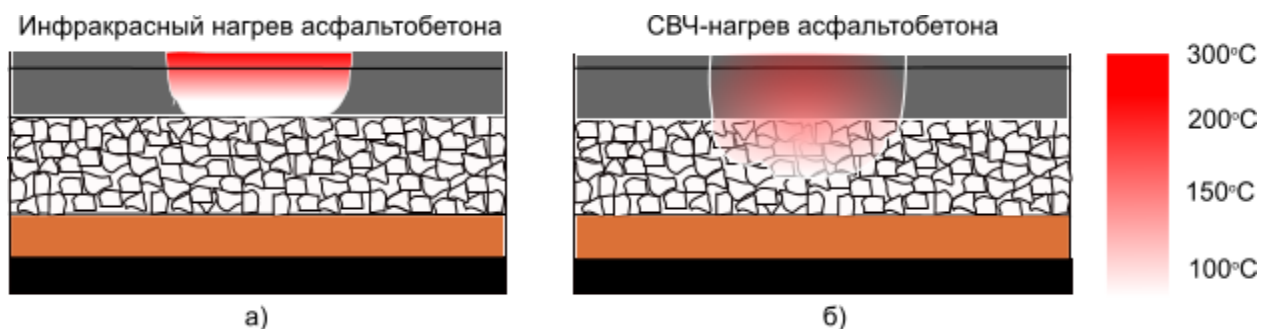
асфальтобетонных покрытий позволяет экономить энергетические и сырьевые затраты по сравнению с традиционной технологией. Также считается перспективным использование СВЧ технологии для приготовления дорожных битумов [25] и размораживания грунта с целью проведения аварийно-восстановительных работ на объектах топливно-энергетического комплекса [26].

Авторами [27] обсуждается новая, более экономичная технология СВЧ обработки почвы от сорняков, заключающаяся в механизированном извлечении почвенного пласта при движении прицепного мобильного агрегата, последующего воздействия СВЧ энергией в непрерывном режиме и укладки обработанного материала обратно. Такая технология может использоваться в местах, где нежелательно или исключается наличие травяного покрова, например, обочины автомобильных дорог, грунтовые взлетно-посадочные полосы и т.п.

В работе [28] рассматриваются перспективы применения СВЧ для отверждения полимерных композитов на основе углеродных, базальтовых и стеклянных волокон, которые могут применяться в дорожных конструкциях в качестве армирующих материалов. Использование СВЧ излучения для нагрева обеспечивает экологически чистое и энергоэффективное производство таких композитов, с более высоким уровнем качества.

По сравнению с радиационным нагревом СВЧ нагрев асфальтобетонного покрытия более эффективен, так как коэффициент затухания электромагнитных волн СВЧ-диапазона в асфальтобетоне меньше, чем значение этого коэффициента для инфракрасных волн. Поэтому, как показано на Рисунке 1.3, применение СВЧ излучателей дает большую глубину прогрева дорожного покрытия до нужной температуры по сравнению с инфракрасными излучателями [20].

Тепловые потери за счет конвекции воздуха и радиационного излучения в окружающую среду приводят к снижению температуры поверхности асфальтобетона по сравнению с его внутренними слоями, что снижает риск термического разложения и улучшает сохранность битумного связующего в верхнем слое [20].



а) инфракрасный нагрев, б) СВЧ нагрев

Рисунок 1.3 – Распределение температуры при различных способах нагрева асфальтобетонного покрытия

Известны дорожно-строительные машины, использующие энергию электромагнитных волн СВЧ диапазона для регенерации старого асфальтового покрытия и повторной укладки на основание дорожного полотна.

В работах [30-31] описаны СВЧ устройства для ремонта асфальтобетонных покрытий, для устранения сцепления льда с асфальтовыми, бетонными и другими покрытиями с целью очистки, для укрепления поверхностей асфальтовых, бетонных, грунтовых и других покрытий, позволяющие производить интенсивный и равномерный нагрев большой площади дорожного покрытия. Разработана схема расположения излучателей, которая обеспечивает равномерное распределение температуры в асфальтобетонном покрытии.

В США используются мобильные СВЧ-системы, установленные на автомобилях для ремонта асфальтобетонных дорог. Эти системы эффективно справляются с заделкой трещин и выбоин, даже на влажных покрытиях, поскольку вода под действием СВЧ излучения быстро испаряется и вытесняется из обрабатываемых участков. Для повышения эффективности и снижения энергозатрат рекомендуется под асфальт укладывают отражающий СВЧ излучение сетчатый экран из металлизированного пластика с ячейками, размер которых намного меньше длины волны СВЧ. Это экран рекомендуется укладывать еще на этапе строительства дороги, по всей ее ширине. Это обеспечит возможность быстрого и энергоэффективного ремонта в будущем, благодаря отражению СВЧ волн от экрана обратно в асфальт [20].

В работе [32] описывается прототип электродинамического устройства, представляющее собой ряд щелевых волноводов. В начале волновода установлен излучатель СВЧ энергии, а на противоположном конце находится согласованная нагрузка. Геометрические размеры щели волновода спроектированы для достижения равномерного распределения тепловой энергии по поверхности асфальтобетона (Рисунок 1.4).

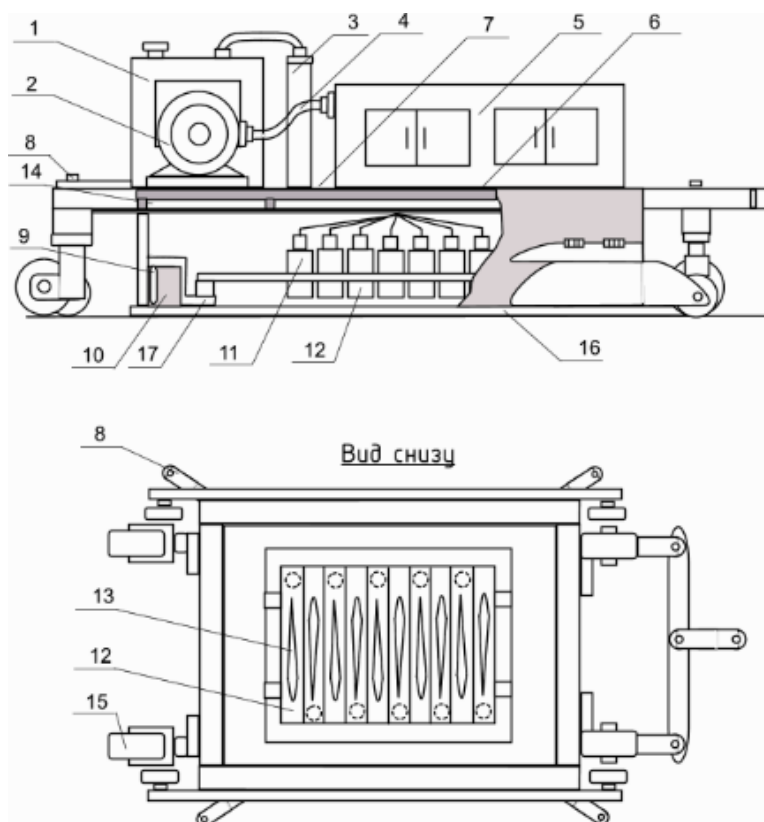


Рисунок 1.4 – Конструкция прицепного СВЧ разогревателя –

1 – дизельная установка; 2 – электрогенератор; 3 – выхлопная труба; 4 – кабель; 5 – блок питания; 6 – платформа; 7 – отверстия; 8 – датчик СВЧ излучения; 9 – температурный датчик; 10 – цепной занавес; 11 – магнетрон; 12 – волновод; 13 – щель волновода; 14 – рама; 15 – колесо; 16 – дорожное покрытие; 17 – защитный экран [32]

Способ безопасно и эффективно отогревать мерзлую землю и производить ямочный ремонт асфальтового покрытия с использованием микроволновой энергии разработала компания MUI (Италия), работающая в сфере коммунальных услуг. С помощью установки (Рисунок 1.5) состоящей из генератора, источника СВЧ энергии мощностью 50 кВт волновода и рупорной антенны, установленной на манипуляторе, можно производить ямочный ремонт асфальтового покрытия и

отогревать мерзлую почву на глубину до 2 метров для производства ремонта коммунальных сетей, установки опор, ограждений, дорожных знаков и т.п.



Рисунок 1.5 – СВЧ установка для оттаивания мерзлой земли и ремонта асфальтовых покрытий: 1 – генератор переменного тока; 2 – гидравлический манипулятор; 3 – магнетрон; 4 – рупорная антенна; 5 – защитный экран

Научным коллективом МИЭМ НИУ ВШЭ была создана СВЧ установка для ремонта трещин асфальтобетонных дорог. Конструкцией представляет собой раструб, в который входит 16 волноводов. Каждый волновод имеет свой источник микроволновой энергии. Плотность СВЧ энергии составляла 240 кВт/м^2 . Общий вид изделия представлен на Рисунке 1.6. Общий вес СВЧ - установки составил $\sim 180 \text{ кг}$ [33]. В серию такие установки не пошли, но пилотные экземпляры эксплуатировались в аварийных ситуациях на правительственных трассах. Производительность такой установки 1 метр в минуту.



Рисунок 1.6 – Микроволновая установка и излучающий раструб для ремонта трещин асфальтобетонных покрытий [33]

Экспериментальный модуль, созданный компанией «Криамид», интегрированный с трактором «Беларус» (Рисунок 1.7), эффективен для удаления льда и проведения текущего ремонта асфальтового покрытия через механизм микроволнового нагрева [34].



Рисунок 1.7 – СВЧ агрегат, созданный на базе трактора «Беларус»: 1 – рама;
2 – СВЧ модули двухмагнетронные; 3 – блоки питания, сдвоенные;
4 – защитный экран по периметру рамы [34]

В СВЧ агрегате используются генераторы электромагнитных волн общей мощностью 20 кВт. Они размещены на специальной раме размером 1,5 x 1,0 м. Агрегат предназначен для разогрева ремонтируемых асфальтовых покрытий. Также он может применяться с целью ликвидации ледяного покрова с поверхности покрытия на особо опасных участках дорог. Характеристики устройства приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Технические характеристики СВЧ модуля [34]

Площадь обрабатываемой поверхности, м	1,5 x 1,0
Мощность СВЧ излучения, кВт	20
Частота излучения, МГц	2450
Источник питания	синхронный 3-х фазный генератор с самовозбуждением (220 В, 50 Гц, 30 кВт)
Потребляемая мощность, кВт	30
Величина неиспользуемого СВЧ излучения на расстоянии 0,5 м от поверхности устройства, мкВт/см ²	не более 10
Скорость удаления льда (независимо от его толщины), м/мин	0,5-1,0

На Рисунке 1.8 представлен аппарат TWB81 для микроволнового воздействия на асфальтобетонные покрытия, разработанный китайской компанией New Timehope [35].



Рисунок 1.8 – СВЧ установка для обслуживания асфальтобетонных покрытий TWB81 [35]

Данная установка имеет СВЧ модуль размерами 1380 x 1380 мм который может разогреть ремонтируемый участок асфальтобетонного покрытия до необходимой температуры за 15-25 минут в зависимости от погодных условий на глубину до 20 см.

Основываясь на имеющемся отечественном и зарубежном опыте применения СВЧ энергии в строительных и дорожных технологиях можно выделить основные перспективные направления в данной области, имеющие положительную тенденцию дальнейшего развития. Наиболее разработанные и перспективные направления применения СВЧ технологий в дорожной отрасли показаны на Рисунке 1.9.



Рисунок 1.9 – Перспективные направления применения СВЧ технологий в дорожной отрасли

1.4 Экспериментальные исследования диэлектрического нагрева строительных материалов

Анализ в иностранной и отечественной научной литературе вопросов применения СВЧ технологий показывает, что первоочередной задачей исследования при внедрении технологий с использованием сверхвысокочастотной энергии является обоснование рациональных параметров процесса: мощности установки, температуры и скорости нагрева, интенсивности,

частоты и напряженности электромагнитного поля и т.д. Для решения задачи эффективного применения СВЧ технологий в дорожной отрасли учеными разных стран продолжают проводиться экспериментальные исследования в данной области.

Авторами [36] с помощью лабораторных экспериментов были исследованы сравнительные характеристики микроволнового и инфракрасного нагрева. Были проведены лабораторные испытания для определения тепловых параметров асфальтобетонной смеси и калибровки электромагнитных параметров на основе численного моделирования. Было обнаружено, что увеличение мощности повышает эффективность микроволнового нагрева, но, возможно, снижает эффективность инфракрасного нагрева. Более того, для достижения одной и той же температуры в материале при одинаковой мощности при микроволновом нагреве требуется гораздо меньше времени, чем при инфракрасном нагреве. Сделан вывод, что микроволновый нагрев демонстрирует большой потенциал применения для восстановления асфальтобетонного покрытия.

Исследователи [37] разработали экспериментальное оборудование для СВЧ-обезвоживания битума и получили патент [38] на метод низкотемпературной обработки битума с применением СВЧ-энергии. Данный метод включает подогрев битума до 105-110 °С в резервуаре для хранения, а затем перекачку его в СВЧ-установку. Установка оснащена магнетроном, излучателем и испарительной камерой, где битум дегидратируется, сохраняя начальную температуру при перемещении через систему. Далее обезвоженный битум поступает в рабочий котел, где температура также поддерживается на уровне 105-110 °С. В момент использования битум нагревают до 140-150 °С в специализированном нагревателе, установленном в котле. СВЧ-обработка значительно ускоряет процесс дегидратации битума, исключает необходимость его дополнительного нагрева до высоких температур, что приводит к снижению энергопотребления на 50-100% и замедлению процесса старения битума. Так, СВЧ-обезвоженный битум демонстрирует улучшенные показатели, особенно в плане стойкости к старению, по сравнению с битумом, обезвоженным традиционным способом.

В инженерных методах строительства и ремонта дорог применяются технологии с использованием СВЧ энергии для активизации процессов самовосстановления асфальтобетона [39]. Исследования показывают, что этот эффект возможен благодаря наличию в составе асфальта битума, способствующего регенерации [40]. Нагрев асфальтобетона до температуры, при которой битум становится текучим, способствует устранению микротрещин как внутри материала, так и на его поверхности.



Рисунок 1.10 – Зависимость размера трещин в образцах асфальтобетонной смеси от времени СВЧ нагрева [41]

В [41] проведен обзор технологий СВЧ нагрева для самовосстановления асфальтобетонных покрытий и борьбы с обледенением. Отмечается, что СВЧ нагрев способствует самовосстановлению асфальтобетонных покрытий за счет снижения вязкости асфальтобетонных вяжущих, и, как следствие, большей скорости капиллярного потока, а также скорости молекулярной диффузии. Степень заживления трещин в асфальтобетонном покрытии постепенно повышается с увеличением времени микроволнового нагрева (Рисунок 1.10). Также отмечено, что прерывистый режим СВЧ нагрева обеспечивает лучшее восстановление по сравнению с непрерывным нагревом.

Проведенные в последние годы экспериментальные исследования в области борьбы с гололедными явлениями показывает, что СВЧ энергия обладает большим потенциалом и перспективами применения для удаления льда с

дорожного покрытия [41]. Волны СВЧ диапазона проникают сквозь слой льда и поглощаются материалами дорожного покрытия. При повышении температуры дорожного покрытия тепло передается слою льда, что снижает прочность сцепления льда с дорожным покрытием, после чего он легко удаляется механическим способом (Рисунок 1.11).

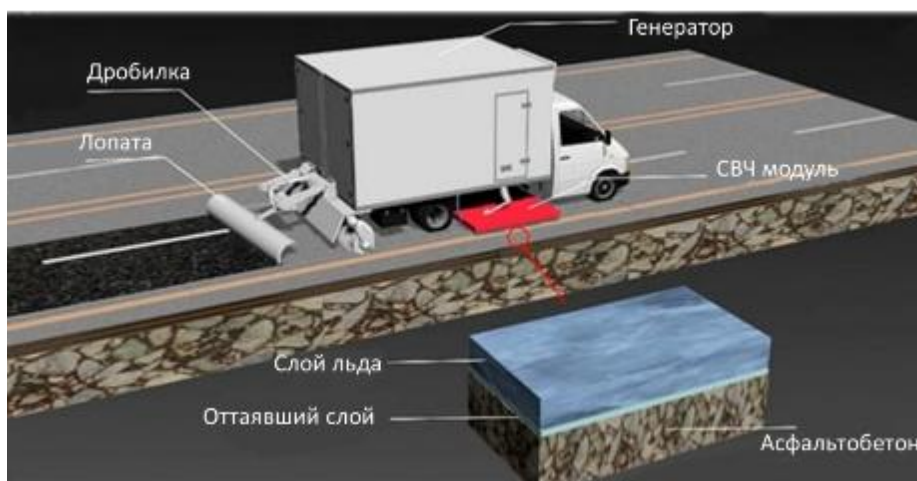


Рисунок 1.11 – Перспективная схема удаления льда с дорожной поверхности с использованием СВЧ энергии [41]

Внедрение технологий самовосстановления покрытий в строительной отрасли решает экологические и экономические проблемы за счет снижения объема вредных выбросов в атмосферу, в том числе, выбросов CO_2 , а также уменьшения материальных затрат при техническом обслуживании покрытий (затраты на битум и всевозможные добавки) [42].

Необходимо отметить, что битум обладает собственным потенциалом к самовосстановлению, который, как показано в [43] зависит от его физических и химических свойств.

В результате процесса самозалечивания происходит восстановление целостности структуры физико-химических связей за счет смачивания поверхностей трещин, диффузии молекул между поверхностями и произвольного рассеяния молекул [44, 45]. В битуме самозалечивание может происходить на молекулярном уровне за счет обратимых водородных связей с образованием

новых сшивок и цепей молекул [45, 46]. Восстановительные способности битума значительно повышаются с увеличением температуры. Эта особенность битума используется при повторной переработке асфальтобетона на асфальтобетонных заводах.

Исследовательские работы, проведенные в области развития технологии самовосстановления, показали, что этот метод является перспективной технологией для обслуживания дорог с большим потенциалом для продления срока службы асфальтобетонных покрытий [43-46].

В работах [47-49] выявлено положительное воздействие СВЧ излучения на свойства битума и асфальтобетонной смеси. Экспериментально установлено, что обработка битума с помощью СВЧ-излучения способствует увеличению прочности асфальтного вяжущего в сочетании с различными типами минерального сырья. Увеличение прочности составило 76,2% для образцов на основе известняка, 113% для шлака, 136% для гранита и 76% для кварцитопесчаника при температуре 20 °С. Этот эффект связан с изменением структуры битума и увеличением его активности. Применение обработанного битума в асфальтобетонах значительно улучшает физико-механические характеристики композитов, повышает их показатели долговечности и надежности.

Ученые из Варшавского политехнического университета осуществили серию исследований о влиянии СВЧ-облучения на асфальтобетонные смеси [50]. Зарегистрировано увеличение адгезивности битума к включениям на 15%.

В работах [51, 52] анализировалась эффективность использования микроволновой обработки для нагрева асфальтобетонных смесей, учитывая такие факторы как гранулометрический состав минеральной основы, процентное содержание битума, температуру и плотность смеси, а также применение поверхностно-активных веществ (ПАВ) в качестве модификаторов. Исследования выявили, что СВЧ активация компонентов асфальтобетонной смеси увеличивает прочность сцепления битума с поверхностью мелкого и крупного заполнителя, при этом повышается плотность, прочность и водостойкость асфальтобетонных смесей.

1.5 Теоретические исследования процессов тепло- и массопереноса при СВЧ воздействии

Современные научные исследования анализируют характеристики процессов СВЧ воздействия на диэлектрики с учетом различных технологических факторов [53-60]. Кроме нагрева, сушки, размораживания СВЧ энергия может быть использована в других технологиях, которые реализуются при высоких температурах, например, таких как синтез наноматериалов, производство огнеупоров и материалов тепловой защиты. Эти технологические процессы обычно сопровождаются сложными физическими явлениями, которые могут существенно влиять на качество продукции, что делает актуальным разработку и оптимизацию математических моделей, которые адекватно отражают физические процессы в диэлектриках под воздействием СВЧ излучения [29].

В современных условиях метод математического моделирования является основным при проектировании наиболее эффективных условий термической обработки материалов с использованием СВЧ установок.

В результате численного моделирования СВЧ нагрева при движении излучающей системы вдоль наружной поверхности диэлектрика, получены оптимальные параметры СВЧ термообработки грунта, при мощности СВЧ излучения 5 кВт скорость движения излучающей системы составила 1 мм/с. Установлено, что со времени нагрева $\tau = 600$ с слой грунта толщиной до 5 см нагревается до заданной температуры 307 °С [57].

Авторами [58] разработана методика прогнозирования процессов отверждения деталей и конструкций из полимерных композиционных материалов в поле СВЧ излучения в зависимости от параметров установки, теплофизических и оптических свойств материала заготовки. Представлены результаты параметрического расчета по прогнозированию процесса отверждения связующего детали из органопластика, а также динамики нагрева в поле СВЧ излучения.

Исследования математических моделей процесса таяния снежно-ледяной

массы под воздействием СВЧ поля показали, что при комбинировании СВЧ нагрева с ультразвуковым воздействием на межфазную границу сред, отмечается повышение эффективности процесса таяния снежно-ледяной массы на 10,7 % [59].

В [60] выделены два главных направления в создании математических моделей для СВЧ технологий, позволяющих изучать влияние микроволнового воздействия на нагрев диссипативных сред. Первая категория моделей прогнозирует результаты СВЧ нагрева, с учетом зависимости мощности источников тепловыделения от параметров генерируемой электромагнитной волны и диэлектрических свойств обрабатываемой среды, пренебрегая структурой волны и изменением этой структуры при ее проникновении в материал [61-66]. Вторая категория математических моделей отличается высокой сложностью для исследования, так как включает в себя не только расчет температурных полей, но и анализ векторов напряженности электрического и магнитного полей, которые непосредственно взаимосвязаны с температурным полем [67-70].

В статье [65] описана модель нагрева многофазных многокомпонентных пластов тяжелой нефти с использованием СВЧ волн. Особенностью модели является итеративное модифицирование процесса с периодическим активированием и отключением СВЧ нагревателей. Это позволяет точно оценить необходимое время для прогрева объема пласта, оптимизировать длительность циклов нагрева и охлаждения (релаксации), а также всего процесса нагревания до желаемой температуры для значительных объемов углеводородных смесей, учитывая физико-химические характеристики компонентов и параметры СВЧ излучения. Ими же разработана модель, учитывающая теплоперенос при СВЧ обработке нефтяных пластов, что дополнительно позволяет изучать временные характеристики нагрева при различных параметрах пласта и СВЧ излучения.

С помощью численного моделирования в работе [66] исследовано изменение температуры в заготовке на основе эпоксидного связующего и волокнистого углеродного наполнителя в зависимости от мощности

электромагнитного поля. Математическая модель учитывает нестационарность и нелинейность тепловых процессов, наличие в образце каналов, полостей, включений типа оптоволоконных датчиков температуры. Показано, что при СВЧ обработке температура плавно растет со средней скоростью $0,18\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ и образец нагревается до требуемой температуры ($180\text{ }^{\circ}\text{C}$) за 15 минут, тогда как по паспортному режиму нагрева за это время образец приобретает температуру всего около $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Численная реализация моделей СВЧ воздействия второго типа требует значительного объема вычислительной мощности, особенно когда учитывается влияние температуры среды на ее электрофизические характеристики. В связи с этим многие исследователи часто считают электрические и магнитные параметры материалов константами, что позволяет не рассматривать постановку задачи как сопряженную, а разделять задачи электродинамики и теплопередачи [56].

Решение задач теплопередачи часто требует изучения влияния микроволн на вещества в твердой, жидкой и газовой фазах с учетом фазовых переходов.

В изучении механизмов СВЧ нагрева материалов используются как численные, так и аналитические подходы [71,72]. Объектами исследования выступают как гомогенные, так и гетерогенные среды, а также органические и неорганические вещества [73]. Для рассматриваемых задач основными методами вычислений являются метод конечных элементов и конечно-разностные методы. За последние два десятилетия, в области изучения СВЧ обработки материалов, наметилась тенденция использования различных программных платформ, автоматизирующих процесс численного анализа.

1.6 Выводы. Цель и задачи исследования

Анализ научных исследований показывает, что СВЧ энергия широко используется во многих отраслях, в том числе в дорожном и аэродромном строительстве для интенсификации различных технологических процессов. Однако для термической обработки деформационных швов цементобетонных

покрытий в целях обеспечения их высоких эксплуатационных свойств ранее СВЧ энергия не применялась.

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 диапазона.

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.

2. Экспериментальное исследование процесса интенсивной термообработки деформационного шва цементобетонного покрытия с использованием СВЧ воздействия

Традиционный метод ремонта цементобетонных поверхностей не предусматривает выполнение профилактических мероприятий для поддержания герметичности швов. Этот метод предполагает выполнение множества длительных технологических операций и является весьма затратным. На практике ремонт деформационных швов приходится проводить достаточно часто. В целях совершенствования технологий ремонта, направленных на поддержание и восстановление первоначальных эксплуатационных качеств, и обеспечения постоянной эксплуатационной готовности покрытий такого типа, предложен способ термообработки деформационного шва цементобетонного покрытия с использованием СВЧ нагрева [118]. Для адаптации этой технологической операции важно выполнить анализ процессов теплообмена.

В данной главе представлены результаты первого этапа исследования – численного моделирования по упрощенной математической модели, который подтвердил саму возможность применения СВЧ энергии для нагрева герметизирующего материала деформационного шва. Также здесь изложены результаты второго этапа исследования, связанного с проведением эксперимента по изучению теплового воздействия электромагнитного поля СВЧ диапазона на фрагмент цементобетонного покрытия, позволяющего восстановить защитные свойства деформационного шва.

2.1 Способ термообработки деформационного шва цементобетонного покрытия с использованием СВЧ воздействия

В основу предлагаемого способа обработки и восстановления рабочих свойств швов цементобетонных покрытий заложены известные преимущества применения электромагнитного излучения сверхвысокой частоты (СВЧ), что обеспечивает множество технологических преимуществ в обработке

диэлектриков: избирательность нагрева, равномерность нагрева, объемный характер нагрева, экологическую чистоту, высокий КПД преобразования СВЧ энергии в тепловую. При применении СВЧ энергии для обработки диэлектрических материалов необходимо учитывать свойства обрабатываемого материала на различных частотах и на всех стадиях процесса. Поглощенная мощность и глубина проникновения ее в материал определяются диэлектрической проницаемостью, частотой и геометрией СВЧ системы [74].

В предложенном методе используется СВЧ установка, которая предназначена для термической обработки и последующего восстановления характеристик деформационных швов в цементобетонных покрытиях. Устройство включает металлическую опорную конструкцию, выполненную в форме мобильной платформы на ротационных колесах, что допускает коррекцию траектории движения устройства по отношению к оси шва. Высота платформы может регулироваться с целью более точной фокусировки на шов. Энергоснабжение магнетрона осуществляется от генератора, интегрированного в платформу. Управление движением устройства может происходить как в ручным, так и в автоматическом режиме. Рупорная антенна, установленная непосредственно над деформационным швом, перемещается вдоль него на определенной скорости, нагревая герметизирующий материал до нужной температуры.

Для процесса термической обработки слоя герметика с целью устранения разрушений низкой и средней степени, можно применять магнетроны отечественного производства типа М-116-50 с выходной мощностью 50 кВт, М-177 с выходной мощностью 75 кВт, М-116-100 с выходной мощностью 100 кВт, работающие на частоте 915 МГц, магнетрон М-168 с выходной мощностью 5 кВт, функционирующий на частоте 2450 МГц.

Повышение мощности микроволнового излучения способствует увеличению производительности устройства за счет повышения скорости его движения, что обеспечит достижение технического результата за более короткое время. Кроме этого, при СВЧ нагреве швов происходит уничтожение биоты в виде травы,

разрушающей тело герметика, что сокращает материальные расходы на борьбу с растительной биомассой. Важно отметить, что низкая скорость устройства, при которой возможно достижение температуры вспышки герметика, является недопустимой.

2.2 Оценка режимных параметров СВЧ термообработки материалов, используемых в конструкциях цементобетонных покрытий

Для подтверждения эффективности нового метода профилактической термической обработки деформационных швов в цементобетонных покрытиях были выполнены экспериментальное и теоретическое исследования.

Целью теоретического исследования было получение предварительных оценок режимных параметров СВЧ нагрева битума, применяемого для герметизации деформационных швов. Ниже в пп. 2.2.1-2.2.3 дана постановка соответствующей задачи теплопроводности и представлены результаты ее численного решения [61].

2.2.1 Математическая модель СВЧ нагрева битумного слоя движущимся источником излучения без учета структуры электромагнитной волны

Процесс теплового воздействия на битум в деформационных швах осуществляется при помощи подвижного источника СВЧ нагрева. Битумный заполнитель находится в непосредственном контакте как с участками цементобетонных плит, так и с окружающей атмосферой. СВЧ-излучатель перемещается вдоль линии шва двигаясь с заданной скоростью V . Основные геометрические характеристики слоя включают его ширину (b) и глубину (h). Выбрана фиксированная система отсчета $Oxuz$, где плоскость yOz совпадает с вертикальной плоскостью, являющейся плоскостью симметрии шва (Рисунок 2.1).

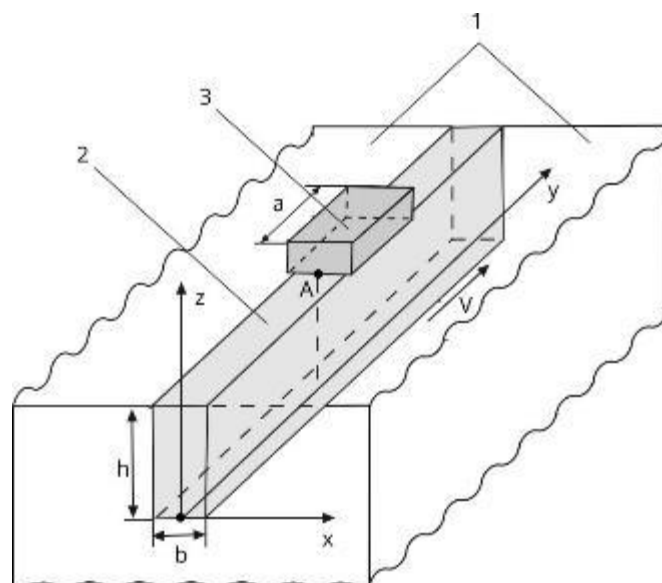


Рисунок 2.1 – Участок цементобетонного покрытия 1 с деформационным швом, заполненным битумом 2, который подвергается термообработке с использованием устройства микроволнового нагрева 3

Считается, что размеры дефектов, имеющих в битумном слое, существенно меньше ширины деформационного шва, что позволяет приближенно отнести нагреваемый элемент к гомогенным и изотропным материалам.

Предположим, что генератор СВЧ излучает электромагнитные волны, направленные перпендикулярно к обрабатываемой поверхности. Выходное сечение волновода является прямоугольником, причем его меньшая сторона совпадает по размеру с шириной деформационного шва. Энергия генерируемой электромагнитной волны перераспределяется между отраженной волной и волной, проникающей в материал. Важно учитывать, что амплитуда проникающей волны снижается с глубиной из-за эффекта диэлектрических потерь в материале.

Эволюция распределения температуры T , K по объему заполнителя при СВЧ нагреве с учетом сделанных предположений моделируется на основе дифференциального уравнения теплопроводности вида [75]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + I_{mw}. \quad (2.1)$$

Здесь ρ – плотность заполнителя, $\text{кг}/\text{м}^3$; c_p – удельная теплоёмкость при постоянном давлении, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$; λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$; I_{mw} – удельная поглощенная мощность электромагнитного излучения, $\text{Вт}/\text{м}^3$. t – время, с; x, y, z – декартовы координаты, м.

Плотность тепловых источников I_{mw} вычисляется с помощью известного выражения [76-78]:

$$I_{\text{mw}} = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon \cdot \text{tg}\delta \cdot fE^2, \quad (2.2)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость битума; ε_0 – электрическая постоянная, $\text{Ф}/\text{м}$; $\text{tg}\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь материала; f – частота, Гц ; E – напряженность электрического поля, $\text{В}/\text{м}$.

Изменение величины напряженности электрического поля, обусловленное поглощением энергии, определяется в соответствии с законом Бугера -Ламберта-Бера [76-78]:

$$E = E_0 \exp(-D(h-z)); \quad D = 2\pi / \lambda_{\text{mw}} \cdot \text{tg}\delta \sqrt{\varepsilon}, \quad (2.3)$$

где E_0 – значение напряженности электрического поля на внешней границе материала, $\text{В}/\text{м}$; D – показатель поглощения, м^{-1} , зависящий от электрофизических свойств заполнителя; λ_{mw} – длина генерируемой волны, м; h – высота слоя герметика, м.

Устройство, осуществляющее облучение деформационного шва, совершает поступательное прямолинейное равномерное движение со скоростью V . В выбранной системе отсчета уравнения движения источника могут быть записаны как уравнения движения любой его точки (например, некоторой точки А - Рисунок 2.1), выбранной за полюс, следующим образом

$$x_A = 0; \quad y_A = L_1 + Vt; \quad z_A = h, \quad (2.4)$$

где L_1 – начальная координата у точки А.

Рассмотрим краевые условия для уравнения теплопроводности (2.1).

Предполагается, что в начальный момент времени температура заполнителя одинакова во всех точках расчетной области:

$$T(x, y, z, 0) = T_0. \quad (2.5)$$

На поверхностях контакта зоны герметика и материала бетонных плит используются граничные условия третьего рода

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=b/2} = \alpha_1 (T|_{x=b/2} - T_{\infty}^{(1)}) \quad (2.6)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_2 (T|_{z=0} - T_{\infty}^{(2)}) \quad (2.7)$$

где $T_{\infty}^{(1)}$, $T_{\infty}^{(2)}$ – значение средней температуры бетонных плит соответственно вблизи боковых и нижней границ деформационного шва, K ; α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи, $Вт/(м^2 \cdot K)$.

На верхней границе деформационного шва, контактирующего с атмосферой, принято граничное условие, учитывающее конвективный и радиационный теплообмен:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=h} = \alpha_c (T|_{z=h} - T_c) + \varepsilon_c \sigma_0 [T|_{z=h}^4 - T_c^4], \quad (2.8)$$

где σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана $Вт/(м^2 \cdot K^4)$; T_c – температура воздуха, K ; α_c – коэффициент конвективной теплоотдачи, $Вт/(м^2 \cdot K)$; ε_c – степень черноты материала шва.

На других границах, заданы условия симметрии температурного поля:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y \rightarrow \pm \infty} = 0. \quad (2.9)$$

Нестационарная математическая модель (2.1-2.9) проанализирована с применением метода конечных элементов. Численная реализация 3D модели выполнена с использованием универсального программного комплекса COMSOL Multiphysics [79-81].

2.2.2 Параметры расчетов и результаты численного решения задачи

В процессе микроволнового нагрева, направленного на устранение малых по размерам стартовых очагов разрушения в материале герметика, можно применять магнетроны с рабочими частотами излучения 915 МГц и 2450 МГц. В Российской

Федерации и за рубежом в устройствах для СВЧ обработки диэлектриков применяются магнетроны с выходной мощностью от 1 кВт до 100 кВт. В расчетах было использовано два типа магнетронов российского производства – М-116-50 с выходной мощностью 50 кВт на частоте 915 МГц и М-168 с мощностью 5 кВт на частоте 2450 МГц. Расчеты проведены для прямоугольного волновода с размерами сечения axb , формирующего волну типа H_{10} .

Следуя [83], определены интервалы изменения размеров поперечного сечения волновода, поддерживающих эффективную передачу СВЧ-энергии к битумному заполнителю деформационного шва. Для двух указанных моделей СВЧ генераторов значения ширины (а) и высоты (b) сечения волновода указаны в таблице 2.1. В таблице 2.2 приведены теплофизические и геометрические параметры, использованные в вычислительном эксперименте.

Таблица 2.1 – Параметры волноводов

<i>Параметр/Тип магнетрона</i>	<i>М-116-50</i>	<i>М-168</i>
Длина прямоугольного сечения волновода a , м	0.25	0.1
Ширина прямоугольного сечения волновода b , м	0.01	0.01
Частота f , МГц	915	2450
Напряженность электрического поля E_0 , В/м	$1.45 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^4$
Начальная координата полюса L_1 , м	0.25	0.15
Скорость волновода V , м/с	0.02	0.005

Рисунки 2.3-2.5 иллюстрируют основные результаты численного исследования математической модели (2.1-2.9) микроволнового нагрева битумного заполнителя в деформационном шве.

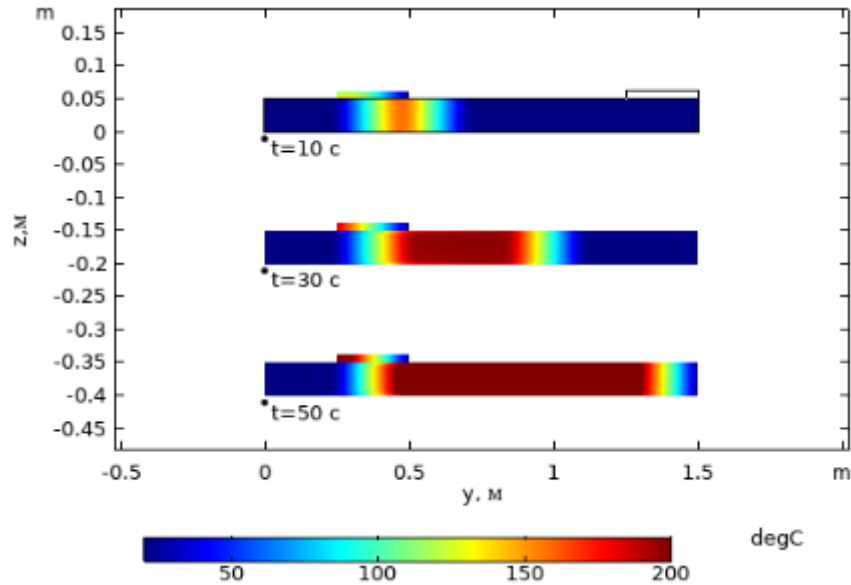
Таблица 2.2 – Теплофизические и геометрические параметры задачи

Параметр	Обозначение, размерность	Значение
Высота, на которую шов заполнен битумом	$h, м$	0.05
Степень черноты	ε_c	1
Удельная теплоемкость битума	$c_p, Дж/(кг \cdot K)$	$1.9 \cdot 10^3$
Плотность битума	$\rho, кг/м^3$	$1.3 \cdot 10^3$
Коэффициент теплопроводности битума	$\lambda, Вт/(м \cdot K)$	0.5
Электрическая постоянная	$\varepsilon_0, Ф/м$	$8.854 \cdot 10^{-12}$
Диэлектрическая проницаемость	ε	2.5
Тангенс угла диэлектрических потерь	$tg\delta$	0.013
Коэффициент конвективной теплоотдачи	$\alpha_c, Вт/(м^2 \cdot K)$	12
Коэффициент теплоотдачи битум-бетонная плита	$\alpha_1, Вт/(м^2 \cdot K)$	24
Коэффициент теплоотдачи от битума к основанию	$\alpha_2, Вт/(м^2 \cdot K)$	24
Температура воздуха	T_c, K	293
Температура бетонных плит	T_{∞}^1, K	293
Температура основания	T_{∞}^2, K	293

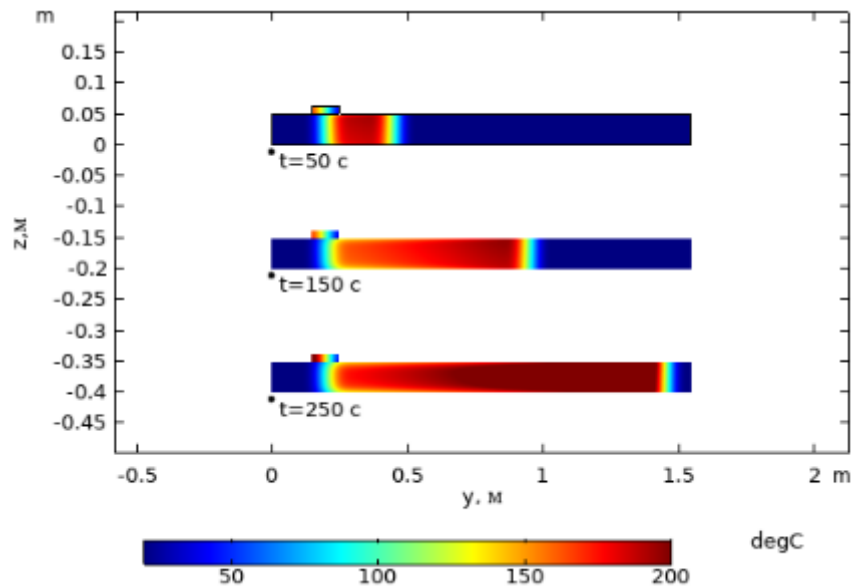
На Рисунке 2.3 показано, как происходит развитие температурного поля в битумном заполнителе деформационного шва. Скорость перемещения магнетрона, при которой битум достигает температуры перехода в текучее состояние (примерно 140-150 °С) под воздействием СВЧ излучения, для магнетрона I (М-116-50) $V = 0,02$ м/с (Рисунок 2.3 а), а для магнетрона II (М-168) – $V = 0,005$ м/с (Рисунок 2.3 б).

Магнетрон I генерирует электромагнитное излучение с электрической напряженностью, превышающей аналогичный параметр магнетрона II в два раза. Соответственно, мощность тепловых источников, формируемых за счет облучения

диэлектрика магнетроном I, превосходит эту величину для магнетрона II в четыре раза, согласно уравнению (2.2). Таким образом, излучатель большей мощности позволяет повысить скорость термообработки деформационного шва, увеличивая тем самым эффективность данного технологического процесса.



а)

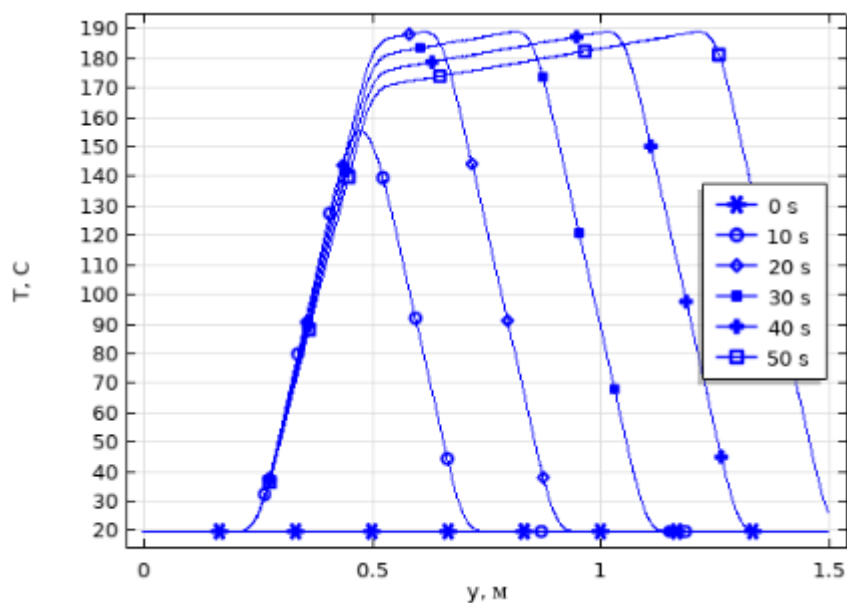


б)

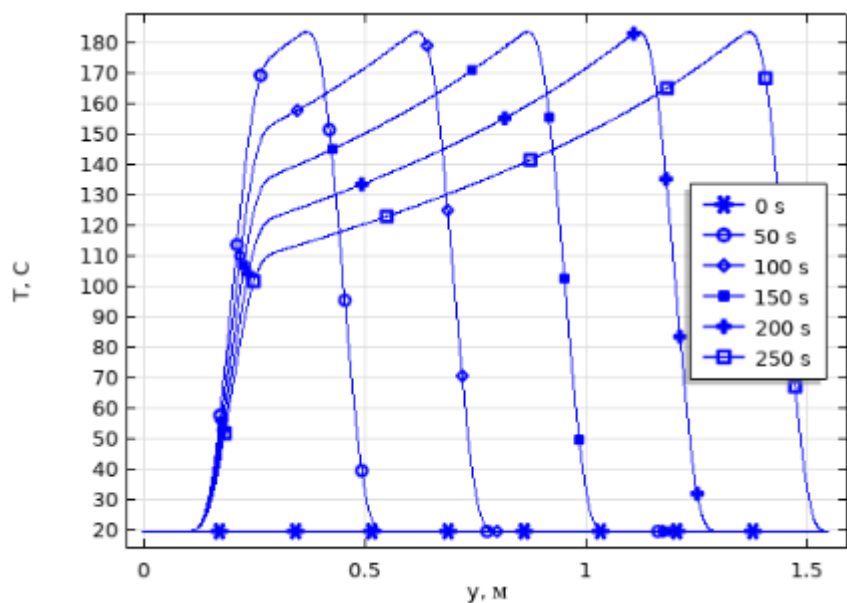
Рисунок 2.3 – Развитие температурного поля в вертикальной плоскости симметрии шва при использовании магнетронов I – а), II – б)

Практически равномерный температурный профиль по z -координате (Рисунок 2.3) связан с тем, что коэффициент поглощения электромагнитных волн в битуме достаточно мал, так что глубина проникновения волны L_{mw} существенно

превышает значение высоты слоя герметика, $L_{mw} \gg h$ ($L_{mw} \sim 2,53$ м для магнетрона I и $L_{mw} \sim 0,94$ м для магнетрона II).



а)



б)

Рисунок 2.4 – Зависимость температуры битума вблизи его поверхности от продольной координаты в различные моменты времени при использовании при использовании магнетронов I – а), II – б)

Зависимости, представленные на Рисунке 2.4 показывают, что температура битума, реализованная при СВЧ нагреве с использованием магнетрона I более однородна в направлении оси шва, чем для магнетрона II. Как видно из графиков

Рисунка 2.4, при смещении СВЧ излучателя типа I на один метр от фиксированной точки, температура материала снижается примерно на 20 °С, в то время как при перемещении излучателя типа II на аналогичное расстояние температура битума понижается на ~ 70 °С. Таким образом, для магнетрона I в выбранном для него режиме термообработки наблюдается более продолжительный период состояния текучести, что повышает эффективность технологической операции, ведущей к «залечиванию» мелких разрывов в герметизирующем слое деформационного шва.

Температурные зависимости, представленные на Рисунке 2.5, демонстрируют существенное влияние величины V - скорости перемещения источника СВЧ на формируемое температурное поле в герметике. Увеличение скорости V приводит к уменьшению времени воздействия тепла на каждую конкретную зону материала, снижая тем самым количество энергии, поглощенной материалом, что снижает в таком режиме максимально возможную температуру материала в герметизирующем слое, а значит и снижает эффективность термической обработки деформационных швов путем СВЧ нагрева.

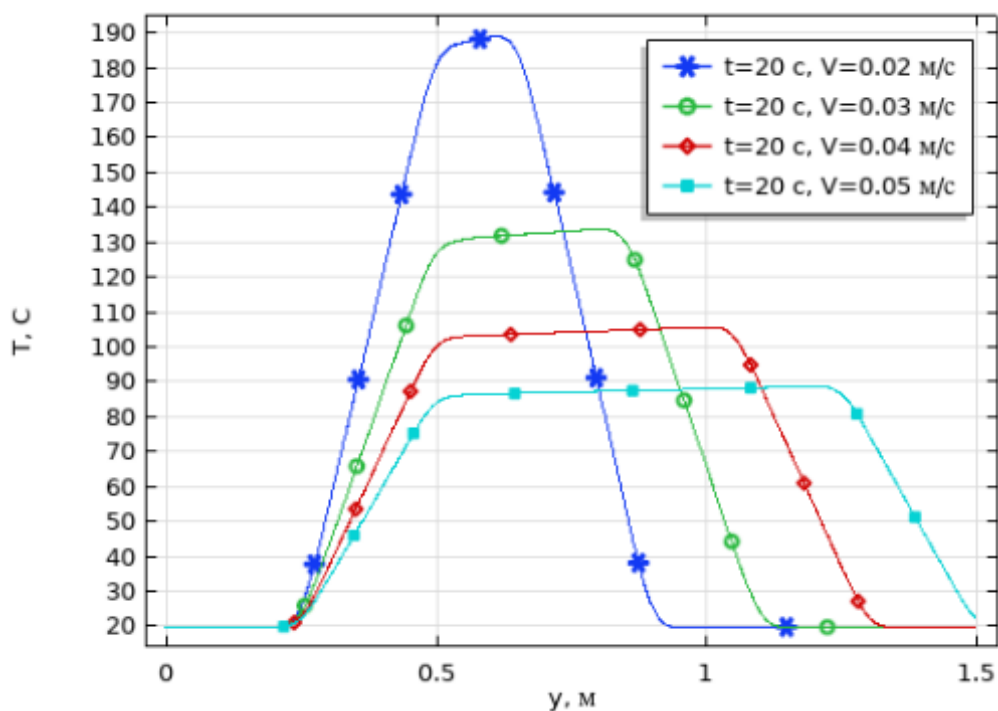


Рисунок 2.5 – Зависимость температуры битума вблизи его поверхности от продольной координаты при различных значениях скорости движения V , м/с СВЧ источника, использующего магнетрон I

Рисунок 2.6 иллюстрирует влияние на распределение температуры битума вдоль оси деформационного шва величины напряженности электрического поля E_0 . Расчет выполнен для магнетрона типа I. Уменьшение значения E_0 генерируемой электромагнитной волны вдвое влечет за собой уменьшение температуры разогрева битумного слоя (T , °C) примерно в три раза.

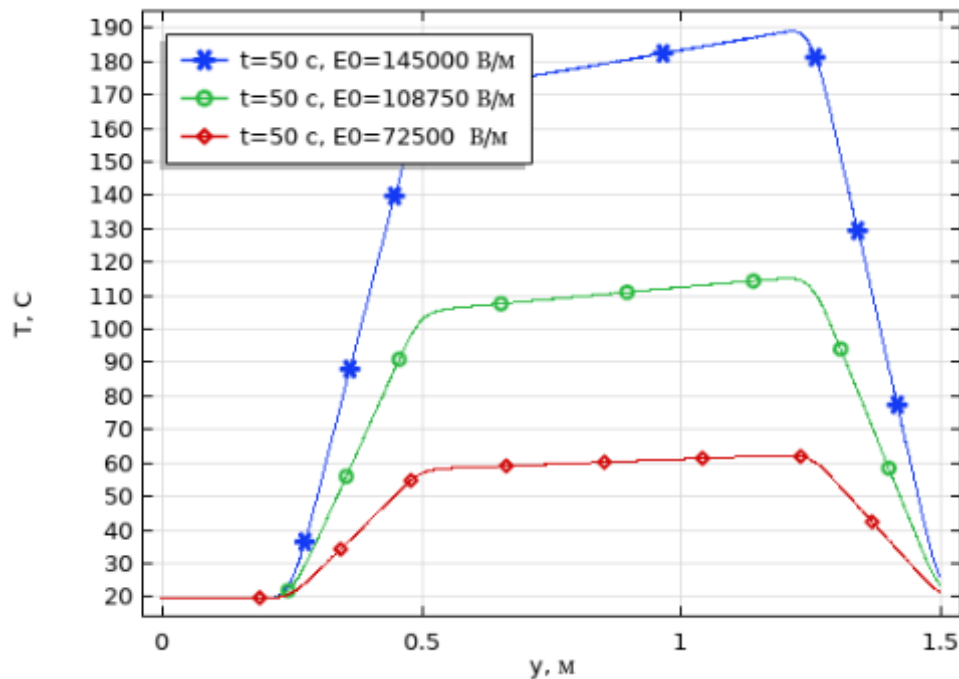


Рисунок 2.6 – Зависимость температуры битума вблизи его поверхности от продольной координаты при $V=0.02$ м/с для частоты излучения СВЧ источника $f=915$ МГц при различных значениях напряженности электрического поля E_0

2.2.3 Ограничения модели и задачи следующего этапа моделирования процесса диэлектрического нагрева деформационных швов цементобетонных покрытий

Проведенное математическое моделирование СВЧ термообработки элемента деформационного шва цементобетонного покрытия выполнено с существенными допущениями. В частности, не рассматривается реальная слоистая структура деформационного шва цементобетонных покрытий, не учитывается структура формируемой электромагнитной волны, не рассматриваются процессы теплопередачи в представительном объеме покрытия, который включает заполнители деформационного шва и окружающие фрагменты цементобетонных

плит. Поэтому полученные на основе математической модели (2.1-2.9) результаты являются предварительными. Они показывают, что перспектива выбранного направления исследования для практического использования имеется. Необходимо совершенствование теоретического подхода к исследованию процесса диэлектрического нагрева фрагмента покрытия и проведение натурных экспериментов.

2.3 Экспериментальное исследование нагрева деформационного шва цементобетонного покрытия

Для экспериментального обоснования эффективности применения способа СВЧ обработки деформационного шва цементобетонного покрытия создана специальная установка. Цель экспериментального исследования – установить время нагрева герметика в деформационном шве покрытия до температуры текучести, при которой происходит заплывание мелких дефектов, а также изучить, как изменяются значения температуры в различных зонах деформационного шва и окружающих бетонных плитах.

2.3.1 Описание экспериментальной установки и методика проведения эксперимента

Экспериментальная СВЧ установка представляет собой металлическую раму, на которой установлен излучатель с антенной в виде рупора, с возможностью его регулировки по высоте. С помощью колёс, установленных на раме, установку можно передвигать над обрабатываемым швом. Установка питается от сети переменного тока с напряжением 220 В и частотой 50 Гц.

Излучающий элемент установки – магнетрон фирмы Samsung модели OM75P, который генерирует мощность в 1000 Вт на частоте 2450 МГц. Он подключен к промышленному прямоугольному СВЧ волноводу BJ2211NS, изготовленному из алюминиевого сплава Т6061. Конструкция объединяет СВЧ

излучатель с блоком питания магнетрона в одном металлическом корпусе (Рисунок 2.7).

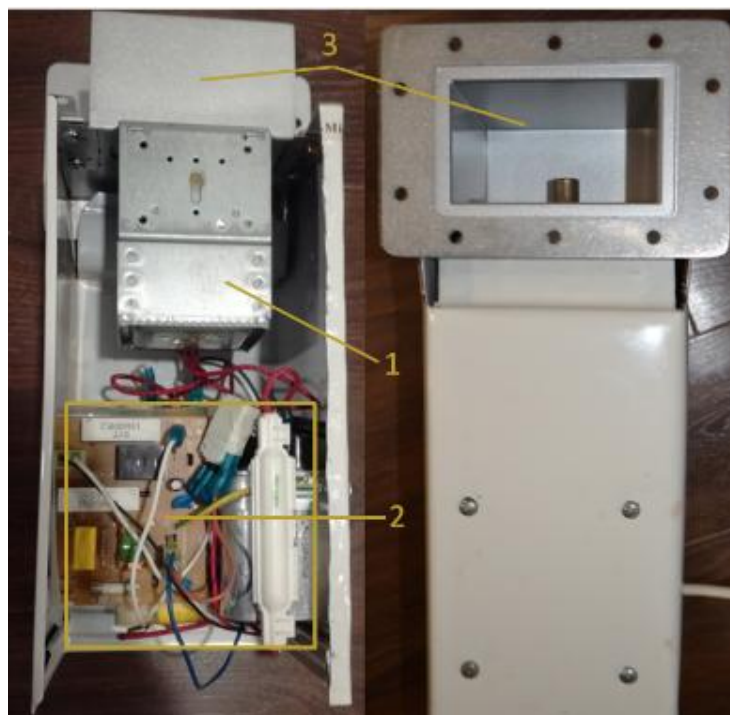


Рисунок 2.7 – Излучатель СВЧ установки: 1 – магнетрон; 2 – блок питания;
3 – волновод

На Рисунке 2.8 представлена экспериментальная СВЧ установка. Рупорная антенна 3, из алюминиевого сплава Т6061, прикреплена через фланцевое соединение к прямоугольному волноводу 2. Раскрыв рупора по периметру имеет защитный пояс 4, который представляет собой мелкоячеистую металлическую сетку. СВЧ антенна изготовлена в виде рупора расходящегося в магнитной плоскости (секторный Н-рупор). Рупорная антенна такого вида, улучшает направленность, и уменьшает отражение волн. Коэффициент отражения секторных рупоров близок к нулю [84,85].

При проектировании рупорной антенны были определены следующие геометрические параметры: длина образующей рупора – $L = 330$ мм; длина рупора – $R = 297$ мм; ширина раскрыва в Н-плоскости – $a_p = 300$ мм; угол раскрыва рупора – $2\Phi_0 = 60^\circ$; ширина волновода рупора – $a = 50$ мм; длина волновода рупора – $dv = 97$ мм (Рисунок 2.9).



Рисунок 2.8 – Экспериментальная СВЧ установка:
 1 – магнетрон с блоком питания; 2 – прямоугольный волновод; 3 – рупорная антенна; 4 – защитный пояс; 5 – подвижный каркас; 6 – кулер

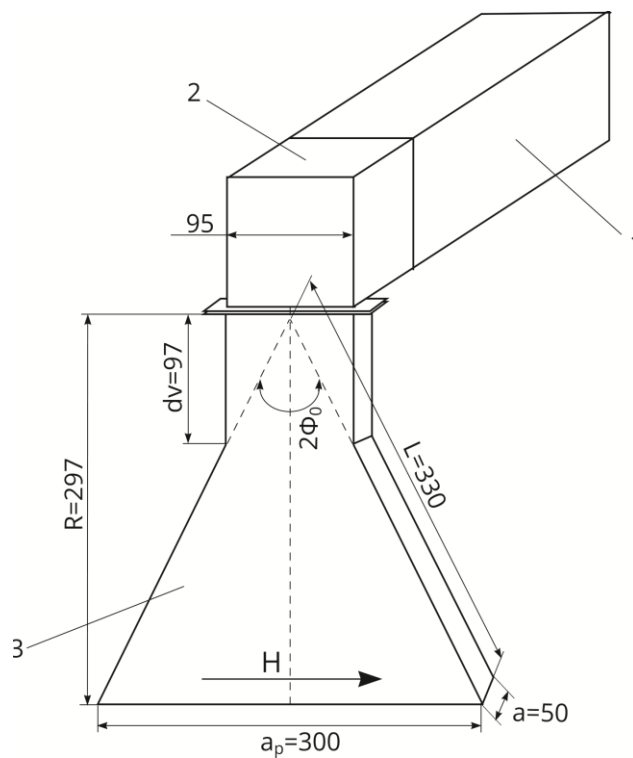


Рисунок 2.9 – Размеры рабочего блока СВЧ установки: 1 – блок питания;
 2 – излучатель СВЧ энергии; 3 – рупорная антенна

Для исключения попадания на магнетрон влаги и пыли между соединением антенны с волноводом установлена пластина из слюды. В комплексе эти элементы представляют собой рабочий блок установки для СВЧ термообработки деформационных швов, смонтированный на металлическом подвижном каркасе 5. Для стабилизации температуры магнетрона на корпусе рабочего блока 1 установлен кулер 6.

Использованные при проведении эксперимента материалы и оборудование, приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Материалы и оборудование, использованные при экспериментальном исследовании

Материалы и оборудование	Характеристики материалов и оборудования	Соответствие Российским стандартам	Изготовитель
Камень бордюрный БР100.30.15	Размер -1000x300x150 Класс бетона В30	ГОСТ 6665-91	ЖБИ завод Воронеж
Песок строительный	фракция 0,15-0,5 мм	ГОСТ 8736-93	Никольский карьер Воронеж
Цемент марки ЦЕМ I 42,5Н	портландцемент марки М500	ГОСТ 31108-2020	АО «Липецкцемент»
Герметик битумно-полимерный марки БП-Г25 «Ижора»	Температура размягчения по КиШ, °С, не ниже +80; Рабочая температура 140-180°С.	ГОСТ 30740-2000 ТУ 5772-009-11149403-2002	ЗАО «Растро» г. Санкт-Петербург
Шнур уплотнительный «Брит»	Ø 20 мм Теплостойкость более 200 °С	СТО 77310225.002-2012	ООО «ГАЗПРОМНЕФТЬ-БМ»
Магнетрон, модель OM75P	выходная мощность – 1000 Вт; частота излучения – 2450 МГц;	Соответствует Росстандарту	фирма «Samsung», Южная Корея
4 каналный цифровой промышленный измеритель температуры НТ-9815	-Диапазон измерения температуры: - 200 °С ~ 1372 °С Точность: > - 100 °С: ± 1 °С;	Соответствует Росстандарту	фирма «Hti», Китай
Датчик температуры ТР-01 (тип К)	Тип термопары – хромель-алюмель; Рабочая температура - до 250 °С.	Соответствует Росстандарту	фирма «S-Line Easter Electronic», Китай

Для проведения экспериментального исследования на открытом грунте устроена площадка из двух цементобетонных блоков размерами 1000x300x150 мм, уложенных на песчаное основание с зазором 15 мм, для имитации реального паза деформационного шва цементобетонного покрытия. Высота модельного

фрагмента покрытия, таким образом, составила 150 мм. Общая схема экспериментальной площадки показана на Рисунке 2.10.

На экспериментальной площадке выделены два участка для устройства двух вариантов деформационного шва. Длина каждого участка 500 мм.

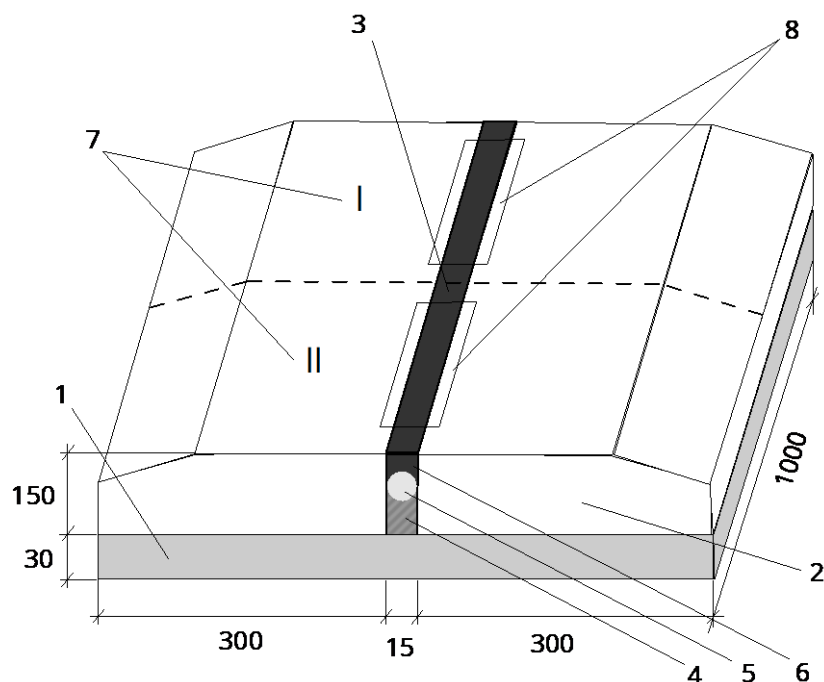
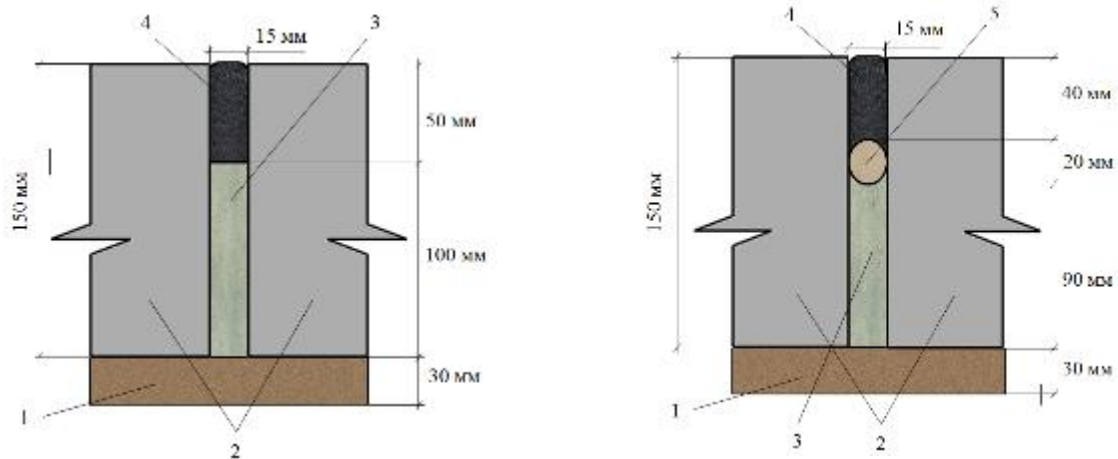


Рисунок 2.10 – Общая схема экспериментальной площадки: 1 – песчаное основание; 2 – цементобетонная плита; 3 – деформационный шов; 4 – пескоцементная смесь; 5 – уплотнительный шнур; 6 – герметизирующий материал; 7 – два экспериментальных участка; 8 – области СВЧ облучения.

На участке I шов выполнен по стандартной технологии с заполнением на $\frac{2}{3}$ высоты сухой пескоцементной смесью (ПЦС) состава 1:4 и на $\frac{1}{3}$ герметизирующим материалом (БПГ-25), с предварительной обработкой верхней части паза шва праймером (Рисунок 2.11 а). На участке II заполнение шва выполнено по той же технологии, но с запрессовкой между ПЦС и герметизирующим материалом уплотнительного шнура диаметром 20 мм (Рисунок 2.11 б).



а) шов без уплотнительного шнура б) шов с уплотнительным шнуром

Рисунок 2.11 – Конструкция деформационного шва:

1 – песчаное основание; 2 – цементобетонная плита; 3 – пескоцементная смесь;
4 – герметизирующий материал (БПГ-25); 5 – уплотнительный шнур «Брит»

Общий вид экспериментальной площадки с вмонтированными температурными датчиками показан на рисунке 2.12.

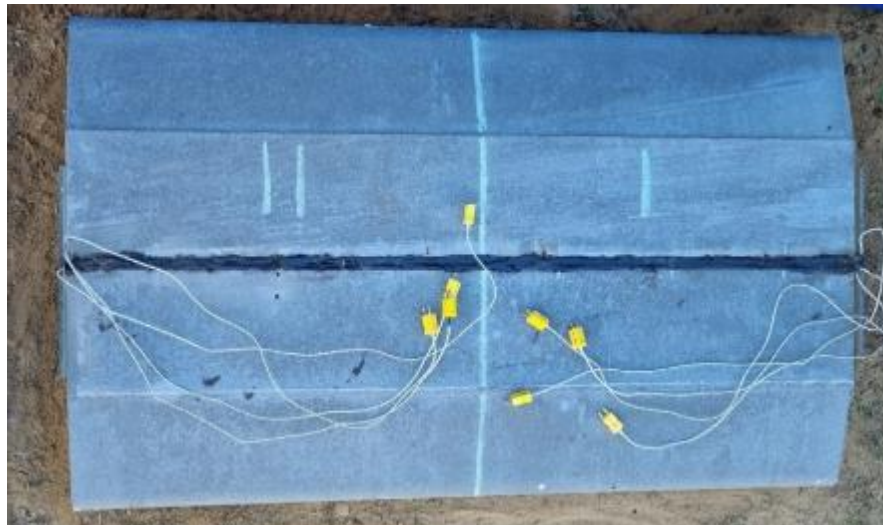


Рисунок 2.12 – Общий вид экспериментальной площадки

Измерение температуры в деформационном шве производилось четырехканальным цифровым промышленным измерителем температуры НТ-9815 [86] с датчиками, представляющими собой хромель-алюмелевые термоэлементы быстрого реагирования открытого типа ТР-01 (тип К по международной классификации), с максимальной рабочей температурой 250 °С [87].

В препринте авторов [88] дан анализ методологии проведения экспериментов различными учеными. Сделан вывод, что корректное применение термопары предполагает ее расположение строго перпендикулярно к направлению вектора электрического поля СВЧ волны и ее экранирование для предотвращения возникновения токов вдоль проводника и разрядов, вызываемых воздействием СВЧ поля. Кроме того, из-за проводящих свойств и высокой теплопроводности, термопары могут влиять на распределение электрического поля и отводить тепло из области исследования, что делает их применение оптимальным лишь для относительно больших образцов с массой не менее одного грамма. Оба условия корректного применения термопар при постановке экспериментального исследования были учтены.

Для проверки точности измерений после окончания процесса СВЧ воздействия на экспериментальный участок в течении 10 минут сравнивались показания датчика, расположенного в верхнем слое герметика (D4) и датчика закрытого типа, погруженного в герметик. На Рисунке 2.13, представлены показания датчиков D4 – 107,5 °С, погружного датчика – 100,7 °С. Разница показаний таким образом составила 6,8 °С.

Отличие показаний обусловлено, в том числе, тем, что датчик закрытого типа погружался вручную на небольшую глубину ~ 5 мм. Но эту глубину не удалось проконтролировать точно, и она отлична от глубины заделки датчика D4. Однако разница показаний двух термопар в поверхностном слое битума не превышает максимального значения случайной погрешности – 12,5 °С для доверительной вероятности 0,95 (п. 2.3.2).

Перед началом эксперимента было проведено сравнение показаний используемых в опытах термопар и жидкостного технического термометра ТТЖ-М между собой. Измерения проводились в емкости с водой, нагретой до 50 °С. Как видно из Рисунка 2.14 показания всех трех измерителей находятся в пределах 48 - 49 °С, что свидетельствует о достаточно точной калибровке термопар.



Рисунок 2.13 – Сравнение показаний датчиков температуры открытого и закрытого типа в приповерхностном слое герметика

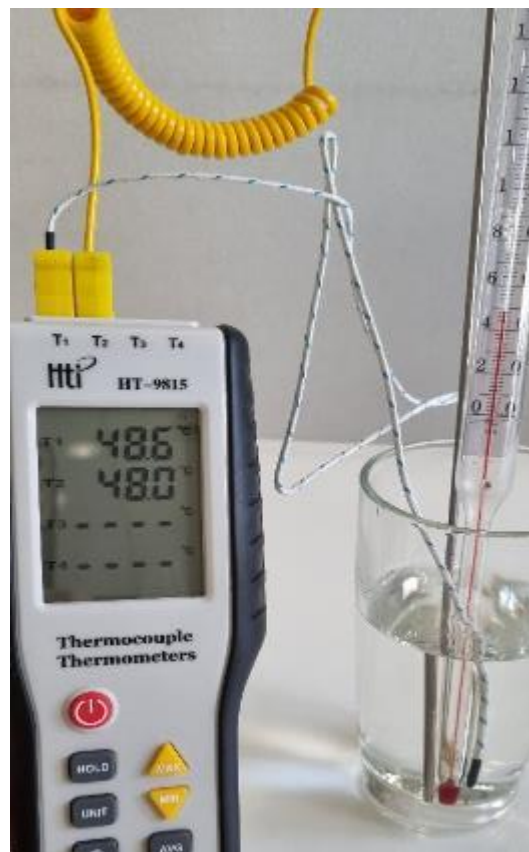
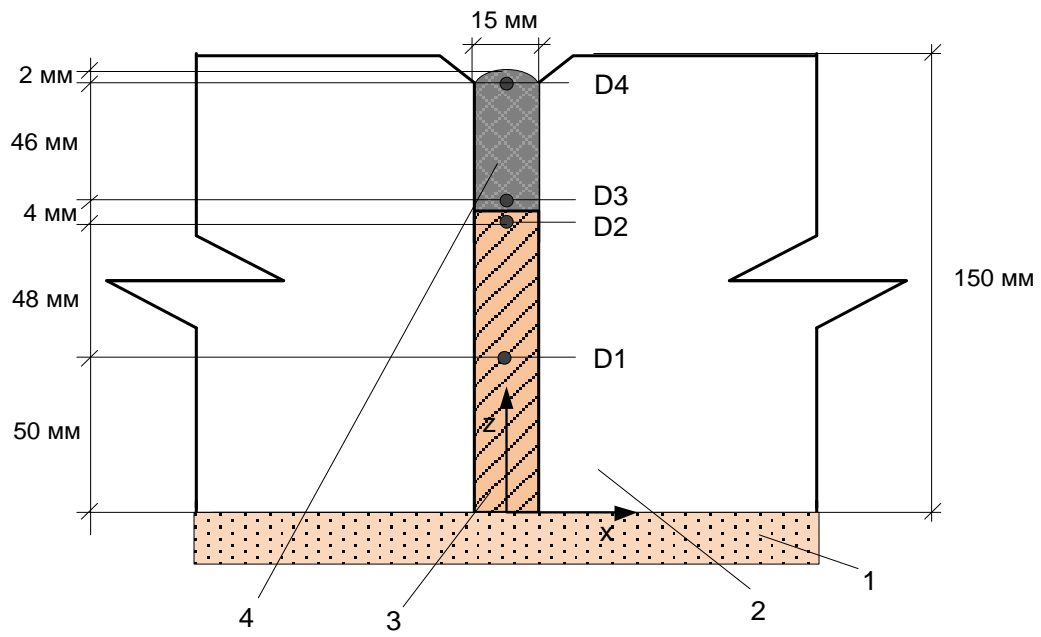
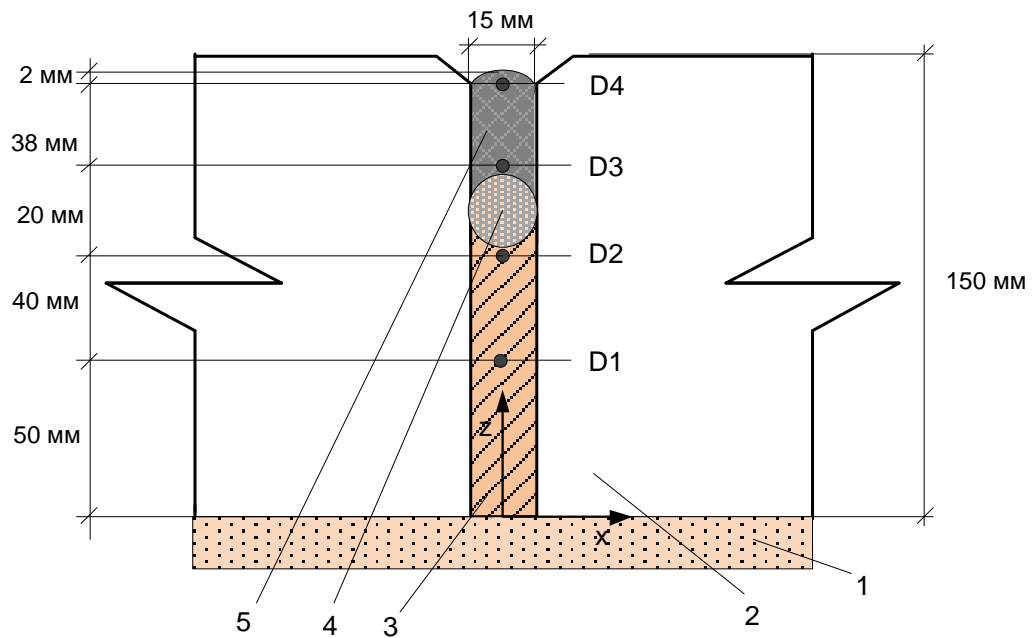


Рисунок 2.14 – Сравнение показаний термопар ТР-01 открытого и закрытого типа с показаниями термометра ТТЖ-М

Температурное измерение проводилось на четырех разных по высоте уровнях деформационного шва вдоль вертикальной оси симметрии рупорной антенны. Высота расположения измерительных точек отсчитывается от нижней границы модели покрытия, где координата z равняется нулю. На схеме (Рисунок 2.15 *а, б*) показано расположение датчиков температуры D1, D2, D3, D4 для участков двух- и трехслойной структуры шва (участки I и II на Рисунке 2.10). Следовательно, датчики D1 и D2 располагались в слое пескоцементной смеси, а датчики D3 и D4 – в герметизирующем материале.



а)



б)

Рисунок 2.15 – Схема расположения температурных датчиков в толще двухслойных а) и трехслойных б) швов с указанием расстояний между датчиками: 1 – песчаное основание; 2 – цементобетонная плита; 3 – пескоцементная смесь; 4 – герметизирующий материал; 5 – уплотнительный шнур «Брит»

Значения координаты z каждого датчика температуры для двух- и трехслойного деформационных швов приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Расположение температурных датчиков в толще шва

I участок (двухслойная структура шва)		II участок (трехслойная структура шва)	
№ датчика	Значение координаты z датчика, мм	№ датчика	Значение координаты z датчика, мм
D1	50	D1	50
D2	98	D2	90
D3	102	D3	110
D4	148	D4	148

Схема эксперимента представлена на Рисунке 2.16.

Исследование процесса нагрева компонентов деформационного шва проводилось в стационарном режиме. Режим работы СВЧ установки – методический. Перед началом эксперимента фиксировалась начальная температура на каждом датчике.

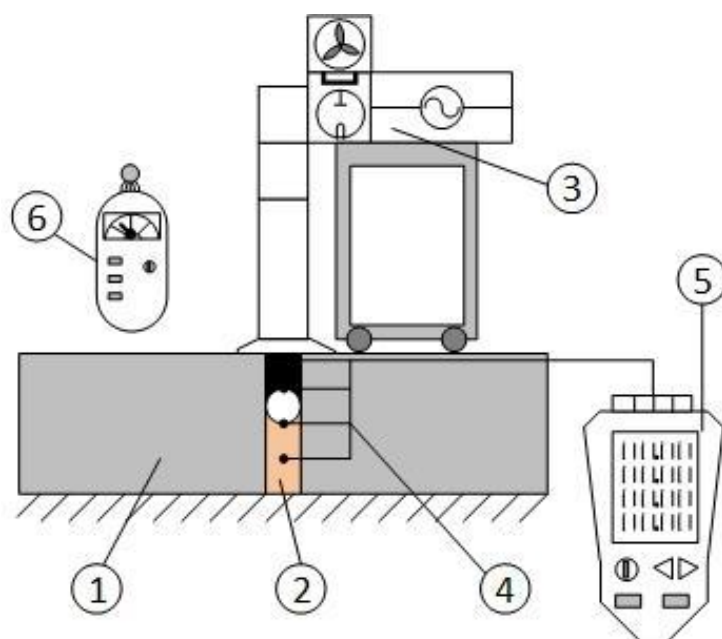


Рис. 2.16 – Схема проведения эксперимента: 1 – цементобетонное покрытие; 2 – деформационный шов; 3 – экспериментальная СВЧ установка; 4 – датчики температуры; 5 – измеритель температуры НТ-9815; 6 – прибор для контроля СВЧ излучения

Экспериментальная СВЧ установка размещалась на участке цементобетонного покрытия над деформационным швом так, чтобы совмещались продольная ось шва с осью симметрии апертуры рупорной антенны. Раскрыв рупорной антенны должен находиться максимально близко от поверхности шва.

После каждого воздействия устройства на шов через установленные промежутки времени производился контроль температуры в компонентах деформационного шва методом непосредственного измерения температуры датчиками D1-D4. Результаты измерений заносятся в таблицу. По окончании эксперимента проводился визуальный контроль обработанного участка шва.

Измерения на каждом из участков проводились с 3-х кратной повторяемостью для случая стационарного положения установки ($V=0$), при относительной влажности воздуха 45 % и температуре окружающего воздуха 25-27 °С. Деформационный шов облучался СВЧ полем в течение 10 минут с поминутным мониторингом показаний температуры. Показания датчиков температуры на I участке в различные моменты времени показаны на Рисунке 2.17.



Рисунок 2.17 – Показания температуры в шве на I участке:

1 – начальная температура датчиков; 2 – температура в шве через 5 минут облучения; 3 – температура в шве через 10 минут облучения

Каждый новый цикл измерений осуществлялся после возвращения температуры на исследуемом участке к начальным значениям. Вначале весь цикл измерений проводился на I участке, затем на II участке.

Таблица 2.5 – Средние значения температуры в деформационном шве на I участке в зависимости от времени нагрева, °C

№ участка/ № измерения	№ датчика	Начальная температура датчика, °C	Время обработки, мин									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I/1	D1	21,3	23,6	26,0	29,0	32,1	34,9	37,9	40,6	43,3	45,8	48,1
	D2	21,8	29,9	37,6	45,1	52,5	58,8	64,8	69,6	74,8	79,0	83,0
	D3	21,9	26,2	31,7	38,5	45,4	51,8	58,2	64,2	69,8	74,9	79,2
	D4	21,9	24,2	30,0	39,9	49,8	58,6	69,3	78,6	86,6	93,9	100,4
I/2	D1	21,4	25,3	29,1	32,8	36,6	40,2	43,6	46,8	49,9	52,5	54,8
	D2	21,7	31,0	38,9	46,1	52,5	59,2	65,2	70,9	75,7	78,1	81,4
	D3	21,9	27,0	32,8	38,7	44,4	50,3	55,5	60,8	65,8	70,0	73,6
	D4	22,1	24,9	30,4	38,2	46,2	54,3	62,0	70,0	77,7	85,8	91,6
I/3	D1	21,6	25,5	29,7	32,9	35,9	38,9	41,7	44,8	48,4	51,6	53,8
	D2	21,9	31,6	39,3	46,0	52,7	59,0	63,3	68,9	75,6	78,4	81,6
	D3	22,0	27,3	33,0	38,9	44,6	50,8	54,8	61,6	66,9	71,8	74,7
	D4	22,2	25,1	30,6	38,8	47,1	55,7	62,0	71,5	79,7	88,7	96,4

Средние значения температуры в толще шва двухслойной структуры на I участке в различные моменты времени, зафиксированные датчиками D1– D4, представлены в таблице 2.5 и на графиках Рисунка 2.18.

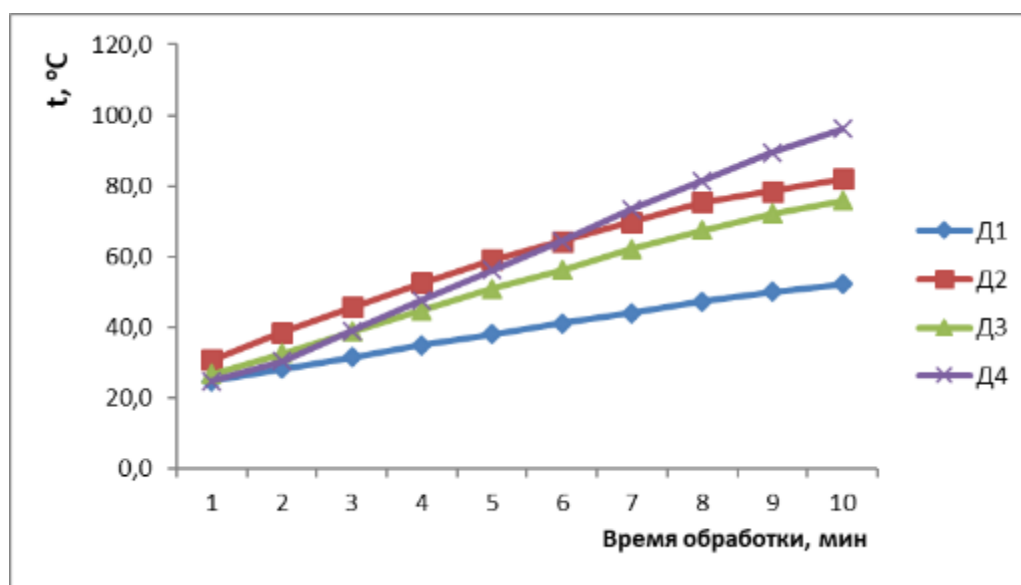


Рисунок 2.18 – Средние значения температуры в толще деформационного шва двухслойной структуры в различные моменты времени на I участке, зафиксированные датчиками D1– D4 (схема на Рисунке 2.14)

В ходе проведения эксперимента также осуществлялся контроль температуры в области цементобетонного покрытия в окрестности сопряжения с битумно-полимерным слоем деформационного шва. На II участке в цементобетонной плите вмонтировали два датчика температуры на глубине 1,5 см ниже поверхности покрытия и расстоянии 0,5 см (D5) и 2,5 см (D6) от края шва. Для обеспечения тесного прилегания датчиков к материалу плиты, возникшие вокруг них пустоты, заполнили материалом, полученным от сверления отверстий в плите (Рисунок 2.19).

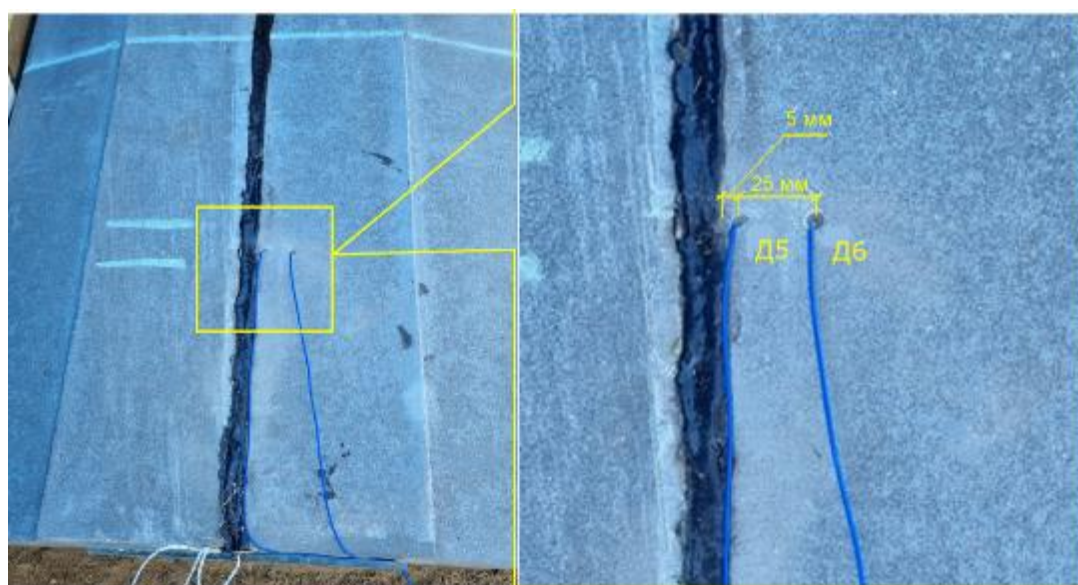


Рисунок 2.19 – Расположение датчиков температуры в цементобетоне.

Средние значения температуры в толще шва трехслойной структуры на II участке, зафиксированные датчиками D1– D6 в различные моменты времени представлены в таблице 2.6 и на графиках Рисунка 2.20.

Таблица 2.6 – Средние значения температуры в деформационном шве на II участке в зависимости от времени нагрева, °C

№ участка/ № измерения	№ датчика	Начальная температура датчика, °C	Время обработки, мин									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
II/1	D1	21,6	22,8	25,1	27,1	28,8	30,9	32,7	34,4	36,2	38,1	42,1
	D2	22,7	31,0	36,6	41,6	45,6	49,2	53,3	57,2	60,3	63,1	68,5
	D3	22,9	24,6	31,5	37,2	42,9	48,6	53,5	58,4	63,5	68,5	72,6

Продолжение таблицы 2.6

№ участка/ № измерения	№ датчика	Начальная температура датчика, °C	Время обработки, мин									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	D4	23,1	29,8	40,2	47,9	55,6	63,3	70,5	77,7	84,2	89,8	94,5
	D5	22,3	38,9	50,4	63,5	71,0	77,2	85,1	92,5	97,0	99,5	101,1
	D6	22,5	31,3	40,9	47,2	53,1	59,0	64,3	70,0	74,7	78,3	82,7
II/2	D1	20,3	23,8	25,9	28,2	30,7	33,6	35,9	38,0	40,2	42,2	44,4
	D2	21,8	32,1	38,5	44,0	49,0	53,0	56,2	59,8	62,6	66,2	67,9
	D3	21,5	25,1	30,4	37,1	44,4	52,1	59,1	64,3	69,9	75,0	80,5
	D4	22,2	30,3	40,4	50,7	61,1	70,8	78,8	85,5	91,4	96,5	100,7
	D5	24,7	39,6	49,6	58,5	67,7	72,5	79,6	85,8	91,6	98,2	100,9
	D6	25,2	33,1	39,3	45,2	50,0	56,2	58,9	62,8	66,8	70,3	73,6
II/3	D1	21,3	23,9	26,0	28,5	30,9	32,8	36,0	38,3	40,6	42,5	44,6
	D2	22,4	32,4	38,7	43,8	48,7	52,9	55,8	59,9	63,1	67,0	68,3
	D3	22,5	25,7	30,8	37,4	44,6	52,4	60,2	64,7	70,0	75,9	82,0
	D4	22,8	30,6	40,5	49,8	61,4	70,6	78,9	85,9	91,8	96,9	99,8
	D5	23,6	39,8	49,7	59,6	68,9	74,4	82,5	87,2	94,1	98,8	100,3
	D6	24,2	32,9	39,4	46,1	51,2	57,3	59,4	64,0	68,9	71,4	74,5

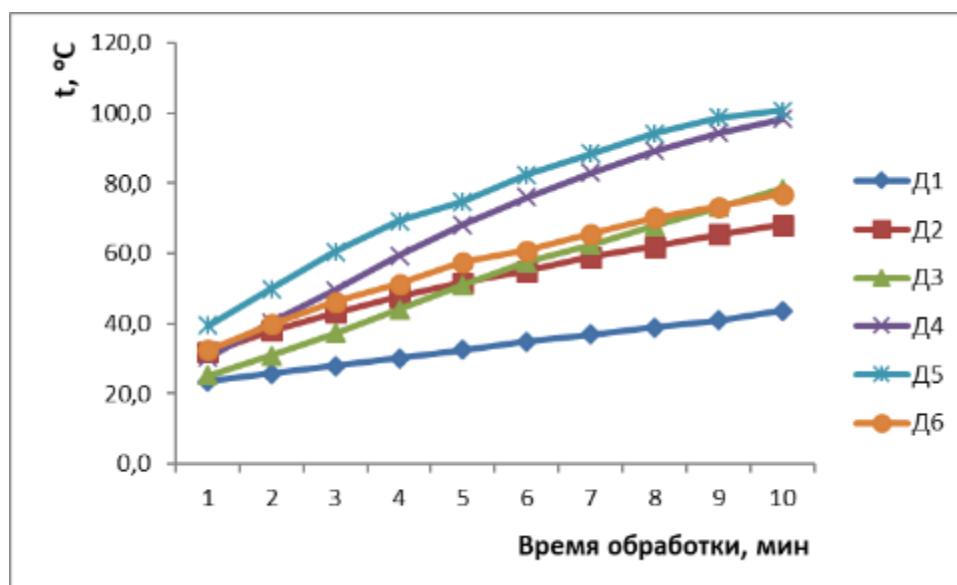


Рисунок 2.20 – Средние значения температуры в толще деформационного шва трехслойной структуры в различные моменты времени на II участке

По результатам проведенного экспериментального исследования можно сделать вывод, что, разогрев до температуры текучести (для БПГ-25 ~ 100 °C), при которой происходит заплывание мелких дефектов герметизирующего материала в деформационных швах обоих типов при заданных мощности и геометрических параметрах излучающей антенны происходит в интервале 8-10 минут.

Проведенные измерения показали, что область цементобетонного покрытия, граничащая с деформационным швом, прогревается существенно, что улучшает адгезию материала герметика к материалу плиты по разрабатываемой технологии по сравнению с традиционной [89].

2.3.2 Обработка результатов эксперимента

Анализ данных прямых измерений температуры проведен отдельно для каждой из позиций, выбранных для размещений датчиков в массе герметика (D3 – D4), пескоцементной смеси (D1 – D2), цементобетона (D5 – D6).

В каждой из таблиц A.1 – A.4, A.5 – A.10 (Приложение A) записаны результаты серий из $N = 11$ опытов для моментов времени $t = 0, 1, \dots, 10$ мин. с числом повторений $n = 3$. Всего 10 серий.

Математическое ожидание для функции отклика в любой момент времени определяется как среднее арифметическое значений температуры для трех повторений

$$M(T) \approx \bar{T}_j = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n T_{ju}, n = 3 \quad (2.10)$$

где n – число повторений опыта, T_{ju} – температура в опыте номер j при повторении номер u .

Дисперсия функции отклика в каждом опыте, дающая среднюю квадратичную погрешность измеряемой величины равна

$$S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (T_{ju} - \bar{T}_j)^2. \quad (2.11)$$

Так как число повторений опытов одинаково, то проверка однородности дисперсий проведена с помощью критерия Кохрена [90]:

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{j=1}^n S_j^2}, \quad (2.12)$$

где S_{\max}^2 – максимальное значение дисперсии в серии опытов.

При $G \leq G_{кр}$, дисперсия считается однородной, при этом опыты воспроизводимы. Отметим, что для варианта неравномерного дублирования опытов используют не критерий Кохрена, а критерии Фишера или Бартлетта [91].

Величина критического числа Кохрена $G_{кр}$ равна максимально возможному экспериментальному значению числа Кохрена G при котором справедливо утверждение о воспроизводимости эксперимента. При $G > G_{кр}$ эксперимент не воспроизводится.

Известно, что значение $G_{кр}$ определяется из таблиц, например, приведенных в [90]:

$$G_{кр} = G_{кр}(\alpha, k, df), \quad (2.13)$$

где α – уровень значимости, k – число дисперсий в опыте, df – число степеней свободы каждой дисперсии. В опытах $k = N = 11$, $df = n = 3$. Полагая $\alpha = 0,05$, имеем [92]

$$G_{кр} = G(0,05, 11, 3) = 0.4187. \quad (2.14)$$

Расчеты чисел Кохрена обоих опытов приведены в таблице 2.7 для всех серий. Из таблицы 2.7 видно, что все эксперименты воспроизводимы с вероятностью $p = 1 - \alpha = 95\%$.

Таблица 2.7 – Расчеты чисел Кохрена для двух- и трехслойного швов

№ датчика	Число Кохрена, G	
	участок I (двухслойная структура шва)	участок II (трехслойная структура шва)
D1	0,164927	0,223717
D2	0,20013	0,199716
D3	0,32223	0,291422
D4	0,205053	0,191445
D5	-	0,27694
D6	-	0,268769

Определим доверительный интервал Δ для опытов всех серий для заданной доверительной вероятности $p = 1 - \alpha$, умножая коэффициент Стьюдента $t_{\alpha, df}$ на стандартное отклонение среднего арифметического $S\bar{T}_j$:

$$\Delta_j = t_{\alpha, df} S_{\overline{T_j}}, \quad df = n - 1. \quad (2.15)$$

$$S_{\overline{T_j}} = \frac{S_j}{\sqrt{n}}. \quad (2.16)$$

Величина Δ_j является случайной абсолютной погрешностью измеренных значений температур $\overline{T_j}$. Для доверительной вероятности $P=0,95$ и числа измерений $n=3$ коэффициент Стьюдента $t_{\alpha, df} = 4,3$ [90].

Относительная случайная погрешность вычислена в процентах по формуле $\Delta_j / \overline{T_j} \times 100$.

Значения случайных погрешностей абсолютной и относительной приведены в таблицах А.1 – А.4, А.5 – А.10 (Приложение А). Из таблиц следует, что относительная случайная квадратичная погрешность в опытах колеблется от 1 % до 18 % для всех опытов на I и II участках.

Таким образом, для доверительной вероятности 0,95 максимальное значение случайной относительной погрешности составило 18 %.

Статистическая обработка результатов эксперимента определила стандартное отклонение среднего значения температурных измерений, выполненных для временной последовательности $t=0, 1, 2, \dots, 10$ мин, как не превышающее 3 °С. Для доверительной вероятности 0,95 максимальное значение случайной абсолютной погрешности составило 12,5 °С.

Расчеты показали, что ряд опытов проведены более удачно, чем остальные и случайная абсолютная погрешность Δ_j не превосходит 2 °С. В этом случае значение абсолютной погрешности определяется с учетом погрешности средств измерений:

$$\Delta_j = \sqrt{(\Delta_j)^2 + \Delta_{cu}^2} \quad (2.17)$$

где Δ_{cu} – погрешность средств измерений.

Погрешность термометра составляет $\Delta_{cu} = 1^\circ\text{C}$ для изучаемого диапазона температуры. Вкладом Δ_{cu} можно пренебречь, задавшись необходимой точностью учета абсолютной погрешности.

2.4 Выводы

1. С целью *предварительной* оценки времени нагрева герметика до температуры текучести сформулирована математическая модель процесса нагрева выделенного элемента деформационного шва цементобетонного покрытия в *ограниченной постановке*.

2. Проведено численное исследование математической модели СВЧ нагрева деформационного шва цементобетонного покрытия, подтверждающее возможность интенсивного нагрева герметизирующего материала до температуры текучести, который приводит к ликвидации стартовых очагов разрушения верхнего слоя шва.

3. Спроектированы и созданы лабораторная установка и модель фрагмента жесткого цементобетонного покрытия для проведения экспериментального исследования нестационарного температурного поля в деформационном шве цементобетонных покрытий.

4. Проведены измерения температуры в элементах деформационного шва. Установлено, что достижение температуры текучести герметика на основе битума БПГ-25 при неподвижном положении лабораторной установки с излучателем мощностью 1000 Вт на частоте 2450 МГц составило 10 мин.

5. Проведенные измерения показали, что область цементобетонного покрытия, граничащая с деформационным швом, прогревается существенно, что улучшает адгезию материала герметика к материалу плиты.

6. Получены зависимости температуры от времени в фиксированных точках двух- и трехслойных деформационных швов. Статистическая обработка результатов эксперимента определила стандартное отклонение среднего значения температурных измерений, выполненных для временной последовательности $t=0, 1, 2, \dots, 10$ мин, как не превышающее $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для доверительной вероятности 0,95 максимальное значение случайной абсолютной погрешности составило $12,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Абсолютная погрешность с учетом погрешности средств измерений не превышает $13,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Относительная случайная квадратичная погрешность в опытах не превышает 18 % на I и II участках.

3. Математическое моделирование процесса нагрева двух- и трехслойного заполнителя деформационного шва в электромагнитном поле СВЧ диапазона

Для выбора эффективных режимов СВЧ термообработки деформационных швов цементобетонных покрытий необходимо изучить закономерности развития температурного поля в зависимости от большого числа геометрических, режимных и физических факторов. Математическая модель, исследованная в главе 2, предварившая постановку экспериментального изучения тепловых процессов при диэлектрическом нагреве деформационного шва, имеет ряд существенных ограничений. В частности, в этой модели не учитывается неоднородная структура генерируемой электромагнитной волны в двух- и трехслойном шве, что непосредственно влияет на распределение мощности тепловых источников в материалах шва. Кроме того, в модели не рассматривались процессы теплопередачи в цементобетонных плитах, пескоцементной смеси и уплотнителе.

В данной главе разработана математическая модель, на основе которой возможен подбор наиболее эффективных режимов СВЧ нагрева герметизирующего материала в шве, обеспечивающих длительную и надежную эксплуатацию цементобетонных покрытий в критически важной инфраструктуре. На данном этапе исследования задача оптимизации режимов термообработки покрытий не ставится. Выполняется прогнозирование распределения температуры и его особенностей в слоях деформационного шва и бетоне при СВЧ энергоподводе с учетом достаточно большого комплекса геометрических, теплофизических, электрофизических и конструктивных параметров.

3.1 Математическая модель

Многослойный деформационный шов (Рисунок 3.1), разделяющий бетонные блоки, создается с использованием установленных промышленных методик. В

основание шва засыпается слой пескоцементной смеси, на который укладывается гибкий уплотнитель из вспененного полиэтилена. Защиту деформационного шва должен обеспечить верхний герметизирующий слой. Допустимо формирование деформационного шва без уплотнительного шнура. Ширина шва составляют приблизительно 1,5 сантиметра, высота шва - 15 сантиметров.

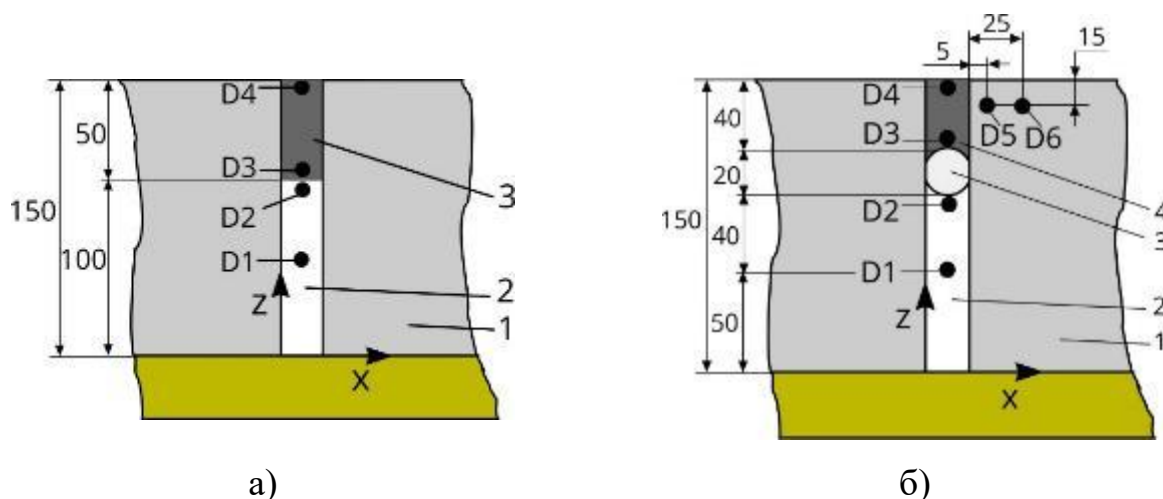


Рисунок 3.1 – Устройство деформационного шва трехслойного – а), двухслойного – б); 1 – цементобетонная плита; 2 – пескоцементная смесь; 3 – уплотнительный шнур; 4 – герметизирующий материал

Область моделирования, представленная на Рисунке 3.2, включает следующие элементы:

- волновод V_1 ;
- воздушная прослойка V_2 ;
- деформационный шов и бетонные плиты V_3 .

Область моделирования имеет границы, в число которых входят

- поверхности волновода Γ_{11} ;
- ограждение воздушной прослойки между фрагментом и волноводом, выполненное из материала с высокой проводимостью с целью минимизации потерь энергии электромагнитного излучения 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 раскрывом рупора антенны Γ_{32} .

Математическая модель процесса СВЧ нагрева выделенного составного элемента цементобетонного покрытия построена в предположении изотропии теплофизических и электрофизических свойств всех материалов.

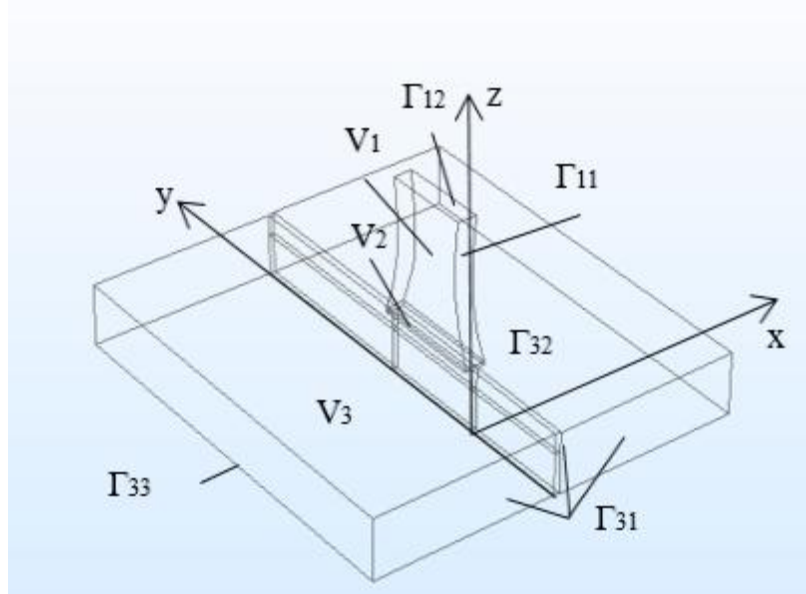


Рисунок 3.2 – Расчетная схема

Для описания распределения вектора напряженности электрического поля, взаимодействующего с диэлектрическим материалом, воспользуемся уравнением Гельмгольца, которое получают, используя уравнения Максвелла для случая отсутствия в среде свободных зарядов и токов проводимости, полагая, что поле является монохроматическим

Анализа структуры электрического поля проводится в объеме, который объединяет волновод V_1 , воздушную прослойку V_2 , и фрагмент покрытия с деформационным швом V_3 . Допущение о монохроматичности поля для среды без свободных зарядов в отсутствие токов проводимости позволяет применить для этого анализа уравнение Гельмгольца [93, 94]:

$$\begin{aligned}\Delta \tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r}) + \gamma^2 \tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r}) &= 0, \quad \mathbf{r} \in V_1 \cup V_2 \cup V_3, \\ \gamma &= \omega \sqrt{\tilde{\epsilon}_a \tilde{\mu}_a} = \beta - i\alpha, \\ \tilde{\epsilon}_a &= \epsilon_a (1 - i \cdot \operatorname{tg} \delta), \\ \tilde{\mu}_a &= \mu_a \cos \delta_M - i \mu_a \sin \delta_M.\end{aligned}\tag{3.1}$$

Здесь \tilde{E} – комплексная амплитуда вектора напряженности электрического поля, B/m ; r – радиус-вектор точки пространства, m ; γ – комплексный коэффициент распространения; $\varepsilon_a = \varepsilon\varepsilon_0$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость; $\mu_a = \mu\mu_0$ – абсолютная магнитная проницаемость; ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды; μ – относительная магнитная проницаемость среды; β – коэффициент фазы (волновое число), rad/m ; α – коэффициент затухания m^{-1} ; ω – круговая частота, c^{-1} ; $i = \sqrt{-1}$, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, F/m ; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, Gn/m ; δ_m – угол магнитных потерь; $tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; Δ – дифференциальный оператор Лапласа. Электрическая и магнитная постоянные равны соответственно: $\varepsilon_0 = 10^{-9}/(36\pi) F/m$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} Gn/m$.

Микроволновой генератор излучает волны с заданной входной мощностью, P_{in} и частотой f , которые передаются через волновод с проводящими стенками, скомбинированный из секториального рупора и призматической части.

Волновод спроектирован таким образом, что одна грань антенны значительно уже другой, при этом расширение рупора выполнено вдоль H -плоскости, что соответствует длинной стороне поперечного сечения волновода. Предполагается, что тип возбуждаемой волны – H_{10} .

Для анализа тепловых процессов используется уравнение теплопроводности [75]. Тепловая задача в волноводе не рассматривается. Исследование распределения температуры проводится в зоне V_3 , включающей деформационный шов и сопряженные с ним бетонные плиты.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + I_{mw}, \quad r \in V_3, \quad (3.2)$$

где T – температура, K ; t – время, s ; ρ – плотность материала, kg/m^3 ; c_p – удельная теплоёмкость при постоянном давлении, $Dж/(kgK)$; λ – коэффициент теплопроводности, $Bm/(mK)$; I_{mw} – удельная поглощенная мощность СВЧ излучения, Bm/m^3 .

Плотность источников внутреннего тепловыделения в составной расчетной

области при воздействии СВЧ-излучения определяется с помощью соотношения вида [53,54]

$$I_{mw} = 0.5\omega\varepsilon_0\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot E^2.$$

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

$$x_A = 0, y_A = L_1 + Vt. \quad (3.3)$$

Точка A – полюс – произвольная точка передвижного устройства излучения, L_1 – координата полюса A по оси y 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

$$I_{mw}(t, x, y, z) = 0.5\omega\varepsilon_0\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot [E(x, y - Vt, z)]^2; L_1 = 0. \quad (3.4)$$

Заметим, что условие $V = \text{const}$ не является принципиальным. Более того, как показал опыт исследования, переменная скорость движения источника может дать более равномерную картину нагрева деформационного шва, в частности, при использовании мобильных систем из нескольких антенн.

Рассмотрим систему граничных условий для обеих частей поставленной задачи - электродинамической и тепловой.

Тангенциальные компоненты электрического поля остаются непрерывными на всех внутренних поверхностях раздела между зонами из различных материалов.

$$E_{\tau+} = E_{\tau-}. \quad (3.5)$$

Металлические элементы волновода и ограждения воздушного зазора не включаются в область моделирования, но их наличие обуславливает на поверхностях Γ_{11} и Γ_2 постановку граничного условия идеального проводника, для которого тангенциальная компонента вектора напряженности электрического поля здесь обращается в нуль:

$$E_\tau = 0, \mathbf{r} \in \Gamma_{11} \cup \Gamma_2. \quad (3.6)$$

На верхней границе волновода Γ_{12} , где генерируется электромагнитная ТЕ-

волна (волна типа H_{10}) значения компонент вектора напряженности электрического принимаются равными

$$E_z = 0, E_y = 0, E_x = E_0, \mathbf{r} \in \Gamma_{12}. \quad (3.7)$$

Амплитуда волны E_0 для немагнитных сред, где $\tilde{\mu}_a = \mu_a$, вычисляется, следуя [93-95], в предположении, что энергия магнетрона полностью трансформируется в энергию волны H_{10} в рупоре, что справедливо, если на участке генерации волны ее отражение минимально:

$$P_{in} = \frac{ab}{4Z} E_0^2, Z = \frac{Z_0}{\sqrt{1 - (\lambda_0 / \lambda_{кр})^2}}, Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}. \quad (3.8)$$

Здесь P_{in} мощность излучения, генерируемого магнетроном, Вт; Z – характеристическое сопротивление волновода для электромагнитной волны типа H_{10} , Ом; Z_0 – характеристическое сопротивление вакуума; a, b – размеры сечения прямоугольного волновода, м; λ_0 – длина волны генератора, м; $(\lambda_{кр})_{H_{10}} = 2a$ – критическая длина волны в прямоугольном волноводе.

На внешних границах составной области V_3 установлены условия абсолютного поглощения

$$\mathbf{n} \times (\nabla \times \mathbf{E}) = 0, \mathbf{r} \in \Gamma_{31} \cup \Gamma_{32} \cup \Gamma_{33}, \quad (3.9)$$

где \mathbf{n} – вектор внешней нормали к поверхности, ∇ – вектор "набла".

Граничное условие (3.9) сформировано для замены бесконечного пространства, где распространяется электромагнитная волна, на ограниченную зону с целью численной реализации математической модели. Такое ограничение расчетной области неизбежно вносит погрешность в результаты вычислительного эксперимента. Известен ряд научных работ, посвященных созданию искусственных граничных условий и анализу их влияния на адекватность решений волновых уравнений [96, 97].

В начальный момент времени распределение T принято равномерным:

$$T(\mathbf{r}, 0) = T_0, \mathbf{r} \in V_3. \quad (3.10)$$

На внутренних границах выполняются условия идеального теплового контакта, предполагающие непрерывность температуры и равенство тепловых потоков.

На внешних границах фрагмента покрытия происходит конвективная передача тепла, а на свободной поверхности Γ_{32} учитывается эффект радиационного охлаждения (нагрева). Таким образом, для границы Γ_{32} записано граничное условие третьего рода:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{32}} = \alpha_{32} (T|_{\Gamma_{32}} - T_c) + \varepsilon_3 \sigma_0 [T|_{\Gamma_{32}}^4 - T_c^4], \quad (3.11)$$

где σ_0 - постоянная Стефана-Больцмана $Bm/(m^2 K^4)$; T_c - температура воздуха, K ; ε_3 - степень черноты материала (плиты или герметика); α_i - коэффициент конвективной теплоотдачи границе Γ_i , $Bm/(m^2 \cdot K)$, $i=31, 3P, 32, 33$.

На той части поверхности фрагмента Γ_{3P} , которая контактирует с воздушной прослойкой в проекции апертуры антенны,

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{3P}} = \alpha_{3P} (T|_{\Gamma_{3P}} - T_c). \quad (3.12)$$

Граничные условия для температуры на боковых поверхностях расчетного элемента (Γ_{31}) в общем случае записываются как условия симметрии.

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\Gamma_{31}} = 0. \quad (3.13)$$

Отметим, что в расчетах, которые проводились с целью проверки адекватности математической модели, граничное условие (3.13) не использовалось. Вместо него применялось условие конвективной теплоотдачи, поскольку в условиях эксперимента модель цементобетонного покрытия имела свободные боковые грани:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{31}} = \alpha_{31} (T|_{\Gamma_{31}} - T_c). \quad (3.13')$$

На границе фрагмента и основания Γ_{33} записано условие Ньютона-Рихмана

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{33}} = \alpha_{33} (T|_{\Gamma_{33}} - T_{\infty}^{(3)}), \quad (3.14)$$

где $T_{\infty}^{(3)}$ - средняя температура грунта, K .

Математическая модель диэлектрического нагрева деформационного шва

(3.1-3.14) позволяет учитывать изменения электрофизических характеристик материала от температуры. В этом случае модель является сопряженной, а ее анализ требует использования значительных вычислительных ресурсов. Из опубликованных данных опытов известно, что температурные зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь для компонент используемых материалов в рабочих температурных диапазонах существенно нелинейны. Однако механизма этой нелинейности часто не изучен, что требует продолжения экспериментальных и теоретических исследований в этой научной области. Поэтому в представленной работе считается, что электрофизические параметры материалов не зависят от температуры, и, как это принято, например в [57], на первом этапе решается стационарная задача электродинамики, на втором - нестационарная задача теплопроводности. Решение электродинамической задачи обеспечивает расчет распределения внутренних источников тепла в исследуемом объеме, которое используется в постановке тепловой задачи.

Математическая модель (3.1-3.14) является трехмерной. Она сложна для аналитического исследования, которое, конечно, имеет значительное преимущество перед численным исследованием [72]. В этой связи модель реализована с использованием методов вычислительной математики в трехмерной постановке на программной платформе COMSOL Multiphysics [79].

3.2 Валидация математической модели интенсивного нагрева деформационного шва и прилегающих плит цементобетонного покрытия

Математическая модель диэлектрического нагрева (3.1-3.14) разработана с целью определения режимных параметров предложенной технологической операции, что возможно после успешной валидации модели, предполагающей анализ и сопоставление данных из теоретических расчетов и практических испытаний. Для обоснования адекватности модели проведен расчет температурного поля в двухслойном и трехслойном деформационном шве (см.

Рисунок 2.11), а также в окружающих цементно-бетонных плитах. В соответствии с условием эксперимента излучатель считался неподвижным.

3.2.1 Расчетные параметры

В условиях эксперимента мощность магнетрона с частотой излучения $f=2450$ МГц составила $P_{in}=1$ кВт. Параметры раскрыва рупора имеют значения $a=50$ мм, $b=300$ мм. Высота воздушной прослойки между поверхностью шва и апертурой антенны составляет 10 мм. Высота пирамидальной секции волновода равна 200 мм. Размеры призматической секции 50x95x97 (все величины в миллиметрах).

Бетон, пескоцементная смесь, уплотнительный шнур и битумно-полимерный герметик представляют собой сложные многофазные и многокомпонентные среды.

В таблице 3.1 приведены термические и электрические характеристики данных материалов.

Значения коэффициентов теплопроводимости и удельной теплоемкости при постоянном давлении для материалов, используемых как заполнители деформационных швов, а также для бетона соответствуют данным [98].

Для расчета диэлектрических и тепловых свойств мастики использовалось правило смеси, основываясь на предположении, что битум и резиновая крошка с мелкопористой структурой являются ее доминирующими составляющими. Специфические физические свойства этих составляющих были определены в соответствии с данными, которые известны из научной литературы [99-102].

Параметры для уплотнителя установлены на основе правила смесей для полиэтилена высокой плотности (HDPE), который содержит большую долю пор, насыщенных воздухом [102]. Текстура материала шнура отличается высокой пористостью, т.е. высоким объемным содержанием газовой фазы.

Физико-механические свойства пескоцементного состава определяется пропорциями песка и цемента, а также влагосодержанием. Для оценок электрофизических параметров этой смеси использованы данные

экспериментальных работ [103, 104].

Диэлектрические свойства бетона были определены на основании исследований, представленных в публикации [105]. В указанной работе установлено, что электрофизические характеристики бетона зависят от широкого спектра факторов, среди которых важную роль играют химический состав вяжущего, заполнителей, технологических примесей и модификаторов, а также температурные условия последующей термообработки.

Таблица 3.1 – Тепло- и электрофизические параметры материалов

Параметр	Бетон	Уплотнительный шнур из вспененного полиэтилена высокого давления	Пескоцементная смесь	Герметик на основе битума
Плотность, ρ , $кг/м^3$	2200	97	1212	1048
Удельная теплоемкость при постоянном давлении, c_p , $Дж/(кг \cdot K)$	837	1115	1080	1613
Коэффициент теплопроводности, λ , $Вт/(м \cdot K)$	1,51	0,0635	1	0,61
Относительная диэлектрическая проницаемость, ϵ'	6	1,13	5	2,6
Тангенс угла диэлектрических потерь, $tg\delta$	0,031	0,00002	0,045	0,006
Степень черноты, ϵ_3	0,94	-	-	0,98

Значения начальной температуры материалов в расчетной области, температуры окружающей среды, температуры грунта выбраны в соответствии с условиями опытов: $T_0=295 \text{ K}$, $T_c=300 \text{ K}$, $T_{\infty}^{(3)}=295 \text{ K}$.

Коэффициенты теплоотдачи в граничных условиях (3.11-3.12, 3.13', 3.14) заданы следующим образом: $\alpha_3=\alpha_{32}=\alpha_{33}=12 \text{ Вт}/(м^2 \cdot K)$, $\alpha_{3p}=2 \text{ Вт}/(м^2 \cdot K)$. В зимних условиях коэффициент теплоотдачи α_{33} должен быть изменен с учетом явлений

промерзания и оттаивания грунта. Также, для уточнения распределения температуры в грунте могут быть использованы метеорологические данные [111]. Волновод по условиям лабораторного эксперимента остается неподвижным, $V=0$.

3.2.2 Численное исследование математической модели интенсивного СВЧ нагрева двухслойного деформационного шва в условиях натурального эксперимента

Результаты лабораторного эксперимента, проведенного для двухслойного деформационного шва, полученные с помощью датчиков D1-D4 (Рисунок 3.1а), и результаты вычислительного эксперимента на основе математической модели (3.1-3.14) показаны на Рисунке 3.3. Координаты z расположения контрольных точек для двухслойного шва в соответствии с рис. 3.1 для D1 - 0.05 м, D2 – 0.098 м, D3 – 0.102 м, D4 – 0.148 м.

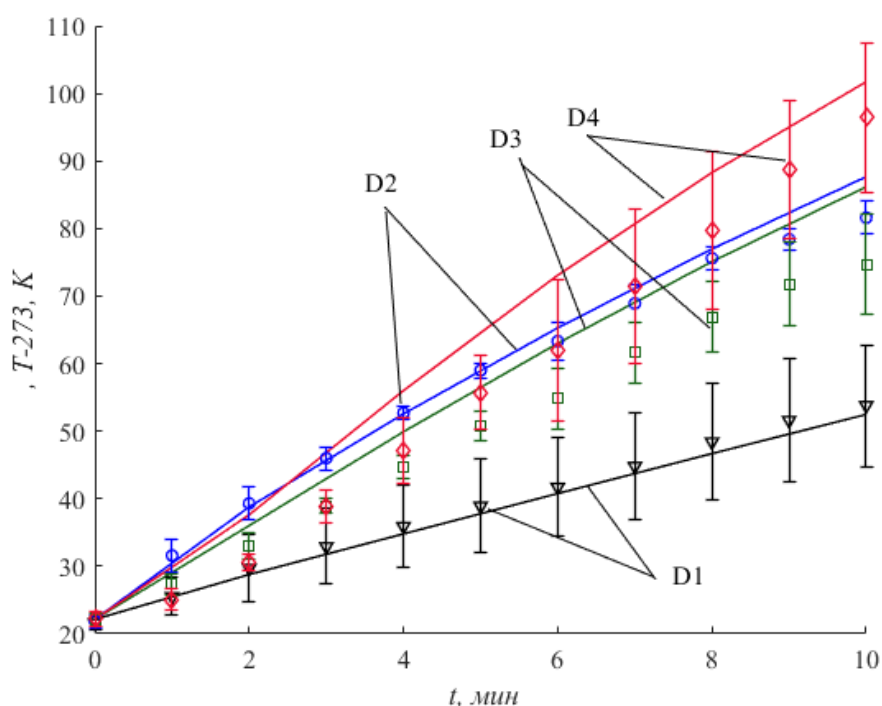


Рисунок 3.3 – Экспериментальные и расчетные значения температуры при диэлектрическом нагреве двухслойного шва. Маркированные кривые – эксперимент, непрерывные кривые – расчет

Сравнивая данные расчета и опыта за весь десятиминутный период СВЧ обработки деформационного шва можно сделать вывод об удовлетворительном

совпадении расчетных и экспериментальных значений температуры как в слое герметика, так и в слое пескоцементной смеси [106]. На графиках Рисунка 3.3 указаны доверительные интервалы, определенные для каждого момента времени, когда проводилась фиксация температуры. Все расчетные температурные кривые лежат в границах доверительных интервалов.

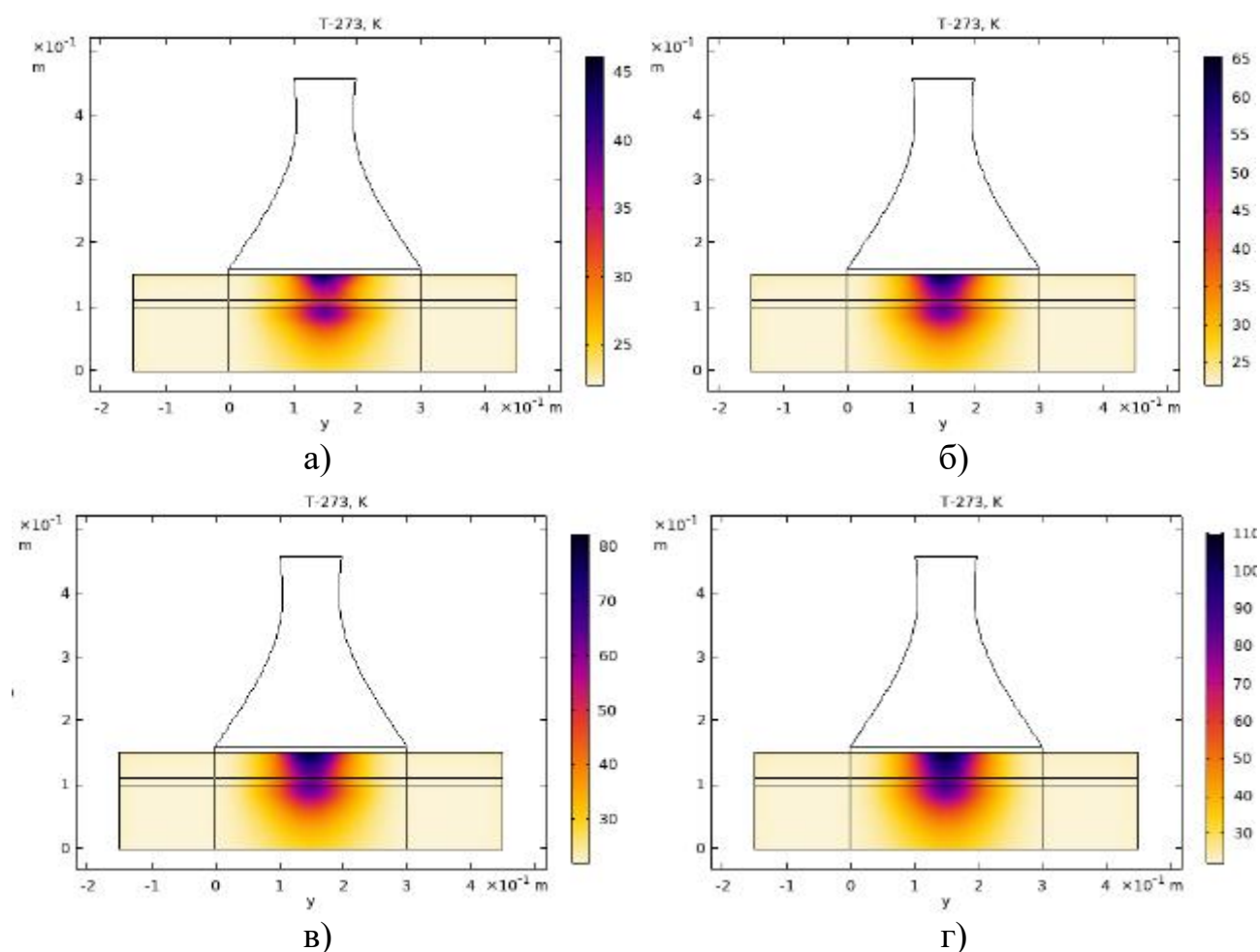


Рисунок 3.4 – Температурное поле в двухслойном деформационном шве при $t=2$ мин – а), 4 мин – б), 6 мин – в), 10 мин – г)

Некоторые результаты математического моделирования развития температурного поля, для условий лабораторного эксперимента с неподвижным излучателем, в котором использован бытовой магнетрон, изображены на Рисунках 3.4 а-г. Характер созданного стационарного электромагнитного поля, инициирующего такой разогрев обоих слоев деформационного шва (на первом участке модельного покрытия), иллюстрирует Рисунок 3.5.

В начале процесса диэлектрического нагрева деформационного шва, по истечению первых двух минут, в слоях герметика и пескоцементной смеси фиксируются две изолированные зоны с максимальной температурой примерно $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Рисунок 3.4 а). Такой характер температурного поля обусловлен нелинейным распределением вектора напряженности электрического поля в деформационном шве, а также диэлектрическими свойствами материалов, заполняющих паз шва. Постепенно происходит расширение зон прогрева и в герметизирующем материале и в пескоцементной смеси, при этом увеличивается среднее значение температуры в каждом слое (Рисунок 3.4 б-в).

По завершению процесса к десятой минуте происходит слияние указанных зон за счет механизма теплопроводности (Рисунок 3.4 г). Температура в слое герметика повышается до значения $\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, осуществляется цель СВЧ воздействия – переход полимерно-битумной мастики в жидкое состояние. Отметим, что в данной конструкции волновода, эффективный нагрев герметика происходит преимущественно в центральной части апертуры антенны, что вызвано деформацией формы генерируемой электромагнитной волны в волноводе. Возможно привлечение специалистов в электротехнологиях к реализации предлагаемого способа профилактической обработки деформационных швов может исправить этот недостаток путем создания более совершенной антенны.

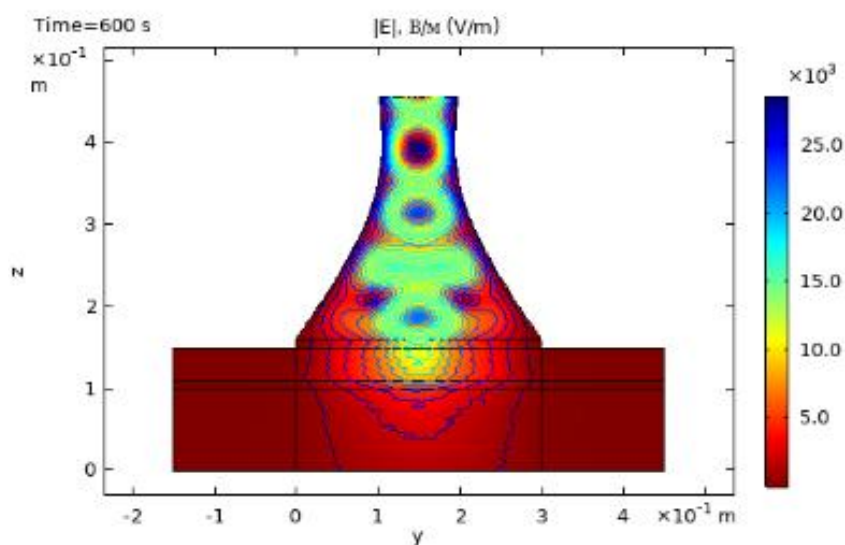


Рисунок 3.5 – Распределение модуля вектора напряженности электрического поля $|E|$, В/м в плоскости симметрии двухслойного шва

3.2.3 Численное исследование математической модели интенсивного СВЧ нагрева трехслойного деформационного шва в условиях натурального эксперимента

Результаты лабораторного эксперимента, проведенного для двухслойного деформационного шва, полученные с помощью трех групп датчиков D1-D2 в пескоцементной смеси, D3-D4 в герметике и D5-D6 в бетоне вблизи шва (схема расположения датчиков на Рисунке 3.1 б), и результаты вычислительного эксперимента на основе математической модели (3.1-3.14) показаны на Рисунках 3.6-3.7.

Сравнивая данные расчета и опыта за весь десятиминутный период СВЧ обработки деформационного шва, можно сделать вывод об удовлетворительном совпадении расчетных и экспериментальных значений температуры в слоях герметика и пескоцементной смеси, а также в окружающих бетонных плитах [107]. На графиках Рисунков 3.6-3.7 указаны доверительные интервалы, определенные для каждого момента времени, когда проводились измерения. Все расчетные температурные кривые лежат в границах доверительных интервалов.

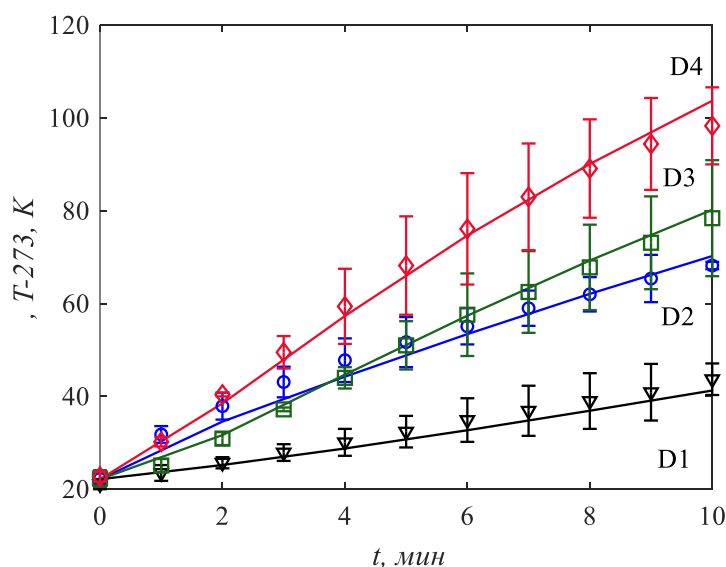


Рисунок 3.6 – Экспериментальные и расчетные значения температуры при диэлектрическом нагреве трехслойного шва. Маркированные кривые – эксперимент, непрерывные кривые – расчет

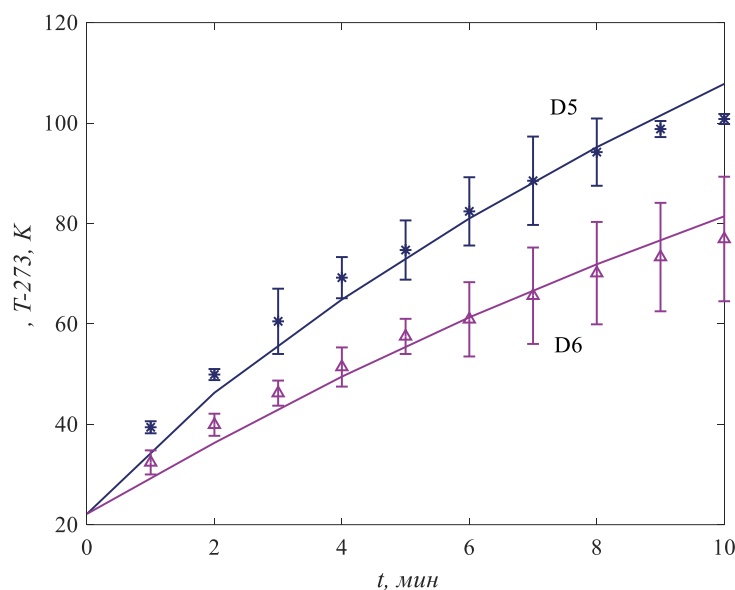


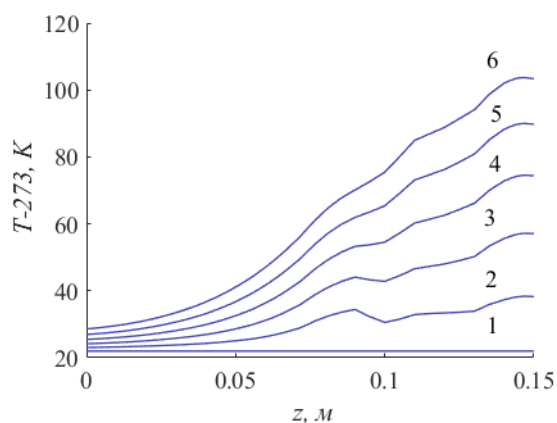
Рисунок 3.7 – Экспериментальные и расчетные значения температуры в бетоне вблизи трехслойного шва. Маркированные кривые – эксперимент, непрерывные кривые – расчет

Ниже представлены результаты математического моделирования развития температурного поля в элементе цементобетонного покрытия для условий лабораторного эксперимента с неподвижным излучателем (Рисунки 3.8-3.10),

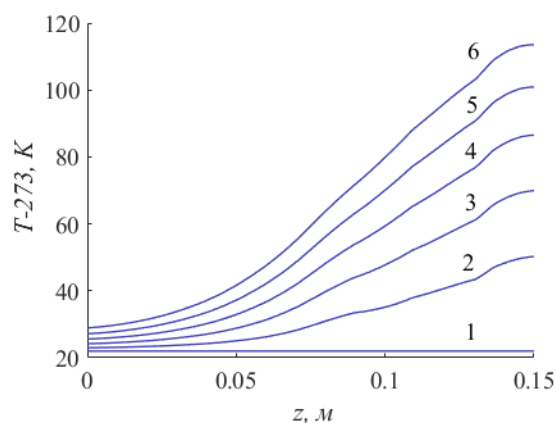
Графики Рисунка 3.8 *a* демонстрируют изменения температуры по толщине деформационного шва вдоль оси симметрии волновода последовательно через каждые две минуты СВЧ нагрева. Температурные профили, полученные для второй и четвертой минуты термообработки, имеют экстремумы (кривые 1-2).

Это означает, что температура в более глубоких слоях шва, занятых пескоцементной смесью, оказывается выше, чем в верхних слоях деформационного шва, заполненных герметизирующим материалом. Такая тенденция отмечалась и в экспериментальных зависимостях (см. кривые D2-D3 на Рисунке 3.6). Этот эффект обусловлен, с одной стороны, экстремальным характером изменения модуля вектора напряжённости электрического поля (Рисунок 3.9), определяемого структурой порождаемой электромагнитной волны и, с другой стороны, большим различием диэлектрических характеристик ϵ и $\text{tg}\delta$ герметика и пескоцементной смеси. Вклад всех перечисленных факторов определяет мощность тепловых источников и быстроту роста температуры в

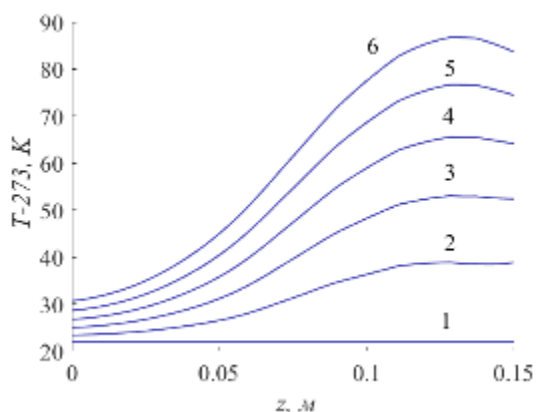
данной точке фрагмента. Кривые 5 и 6 на Рисунке 3.8 а уже не имеют экстремумов. Сглаживание температурных зависимостей обусловлено достаточно интенсивными процессами теплопроводности в материалах шва и теплообмена на их общей границе.



а)



б)



в)

Рисунок 3.8 – Профиль температуры в различные моменты времени $t=0$ мин – 1, 2 – 2, 4 – 3, 6 – 4, 8 – 5, 10 – 6 в деформационном шве при $x=7.5$ мм, $y=150$ мм – а); в бетоне при $x=12.5$ мм, $y=150$ мм – б); в бетоне при $x=32.5$ мм, $y=150$ мм – в)

Температура в бетоне в зоне непосредственного облучения достигает максимальных показателей на поверхности плиты, как показано на Рисунке 3.8 б. В области плиты, расположенной за пределами проекции рупора антенны на горизонтальную поверхность, температурный максимум сдвигается вглубь (см. Рисунок 3.8 в), что связано с эффектами радиационного и конвективного охлаждения внешней поверхности плиты [107,108].

Изменение температуры в цементобетонном покрытии зависит от распределения и мощности тепловых источников, которые создаются за счет

механизма взаимодействия электромагнитного поля с материалами деформационного шва и окружающих плит.

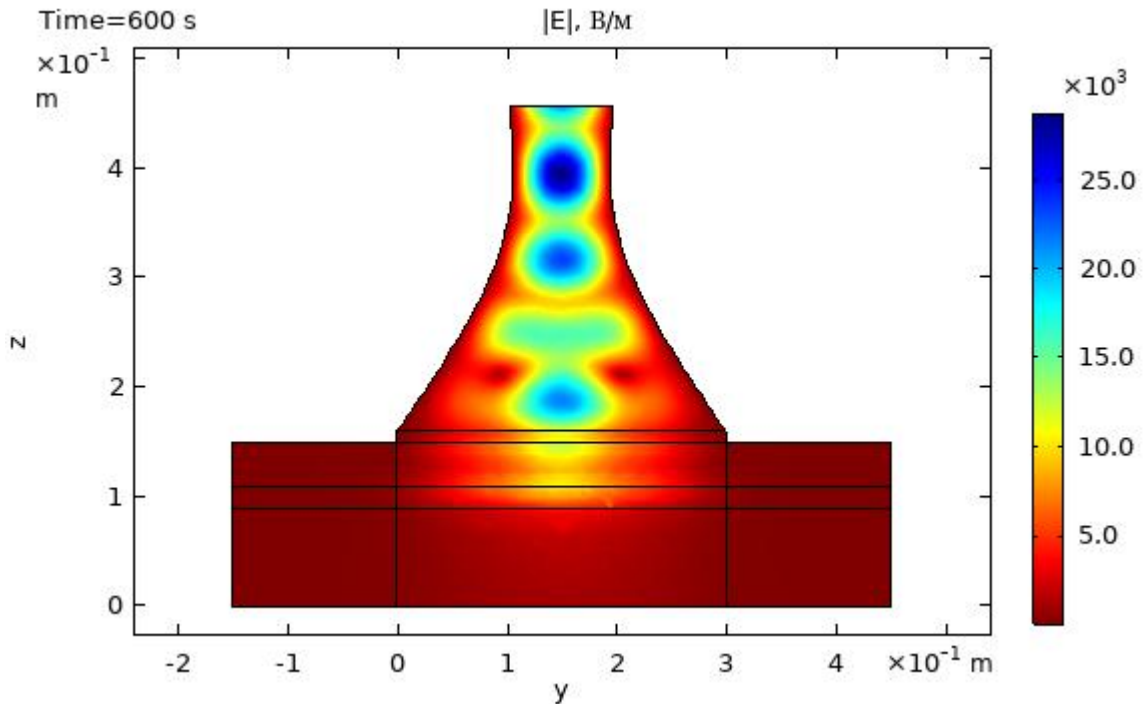


Рисунок 3.9 – Распределение модуля вектора напряженности электрического поля $|\mathbf{E}|$, В/м в вертикальной плоскости симметрии трехслойного шва ($x=a_{\text{ш}}/2$)

На Рисунке 3.9 показано распределение модуля вектора напряженности электрического поля в продольной плоскости симметрии шва. Следует отметить, что форма генерируемой электромагнитной волны изменяется по высоте волновода. Как показывают расчеты, из трех значений проекций вектора \mathbf{E} на оси координат, наибольшей является проекция E_x . Область покрытия, под раскрывом рупора подвергается облучению существенно разной интенсивности. Величина модуля вектора напряженности электрического поля $|\mathbf{E}|$ является наибольшей в центральной зоне, а к периферии ее значение понижается, что особенно заметно в направлении оси шва (Рисунок 3.9).

Поглощение энергии электромагнитной волны при взаимодействии с заполнителями деформационного шва, обладающими диэлектрическими свойствами, приводит к существенному уменьшению ее амплитуды.

Указанные особенности распределения модуля вектора напряженности

электрического поля $|\mathbf{E}|$ определяют, в основном, характер температурного поля в деформационном шве (Рисунок 3.10). Значения $|\mathbf{E}|^2$ влияют на мощность источников тепловыделения, поэтому высокотемпературная зона также располагается в верхней центральной области под раскрывом рупорной антенны. Эта зона постепенно со временем расширяется, т.к. за счет теплопередачи происходит прогрев соседних участков. Скорость прогрева зависит от коэффициента температуропроводности материалов заполнителей. При этом температура заполнителей имеет тенденцию снижаться от поверхности шва в глубину по вертикали.

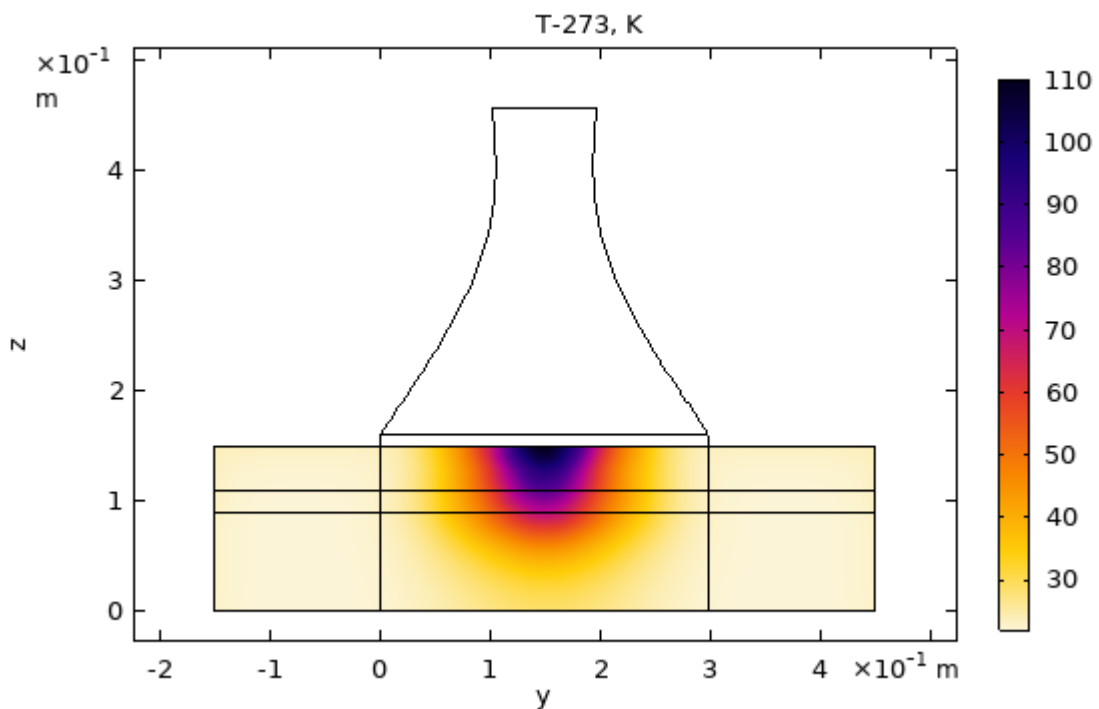


Рисунок 3.10 – Распределение поля температуры при $t=10$ мин в вертикальной плоскости симметрии трехслойного шва

Температура текучести герметика достигнута за 10 минут при неподвижном излучателе СВЧ бытового типа. Ожидается, что использование более мощных магнетронных систем ускорит этот процесс [61].

3.3 Результаты вычислительного эксперимента для выбора режимов термообработки трехслойного деформационного шва цементобетонного покрытия

Использование микроволнового обогрева для ремонта небольших дефектов в герметизирующем слое деформационных швов требует обоснованного выбора конструктивных и технологических параметров, чтобы обеспечить максимально эффективную скорость восстановления цементобетонных покрытий. Одним из критических параметров является скорость движения мобильной микроволновой установки. В конкретных текущих условиях эксплуатации должна быть задана такая скорость перемещения излучателя, которая достаточна для нагрева средства герметизации шва до необходимой температуры текучести, но не допускает чрезмерного превышения определенного температурного порога. Значение скорости зависит от характеристик электромагнитного поля СВЧ и диэлектрических свойств материалов, используемых при устройстве шва.

Для анализа поставленной задачи используется программный пакет COMSOL Multiphysics применительно к математической модели, сформулированной выше - (3.1-3.14). В работе задействованы основной модуль и дополнительный модуль для анализа теплопередачи в твердых телах «Heat Transfer in Solids» [79]. В этом параграфе проведены вычислительные эксперименты для деформационного шва трехслойной структуры.

3.3.1 Влияния скоростного режима СВЧ установки на эффективность нагрева герметизирующего материала трехслойного деформационного шва цементобетонного покрытия

В предложенном методе обеспечение надежности цементобетонных покрытий достигается за счет периодического обновления состояния деформационных швов путем расплавления герметизирующего слоя с использованием подвижного источника СВЧ излучения. Как показали предварительные оценки (п. 2.2), эффективность диэлектрического нагрева, и, как

следствие, качество обновления герметизации шва зависит от частоты, мощности и скорости движения излучателя

В данном параграфе представлены результаты вычислительных экспериментов на базе математической модели (3.1-3.14), которые демонстрируют, как скоростной режим СВЧ установки влияет на интенсивность нагрева трехслойного деформационного шва.

Теплофизические параметры задачи, а также характеристики диэлектриков имеют значения, записанные в таблице 3.1. Используемый источник излучения обладает мощностью 75 кВт и работает на частоте 915 МГц. Размеры нижней части волновода, имеющей прямоугольное сечение, составляют ширину 50 мм и длину 300 мм. Верхняя часть волновода также прямоугольной формы, имеет ширину 50 мм и длину 237.5 мм. Воздушный зазор имеет высоту 10 мм. Высота пирамидального сегмента волновода составляет 90 мм, а призматического – 242.5 мм.

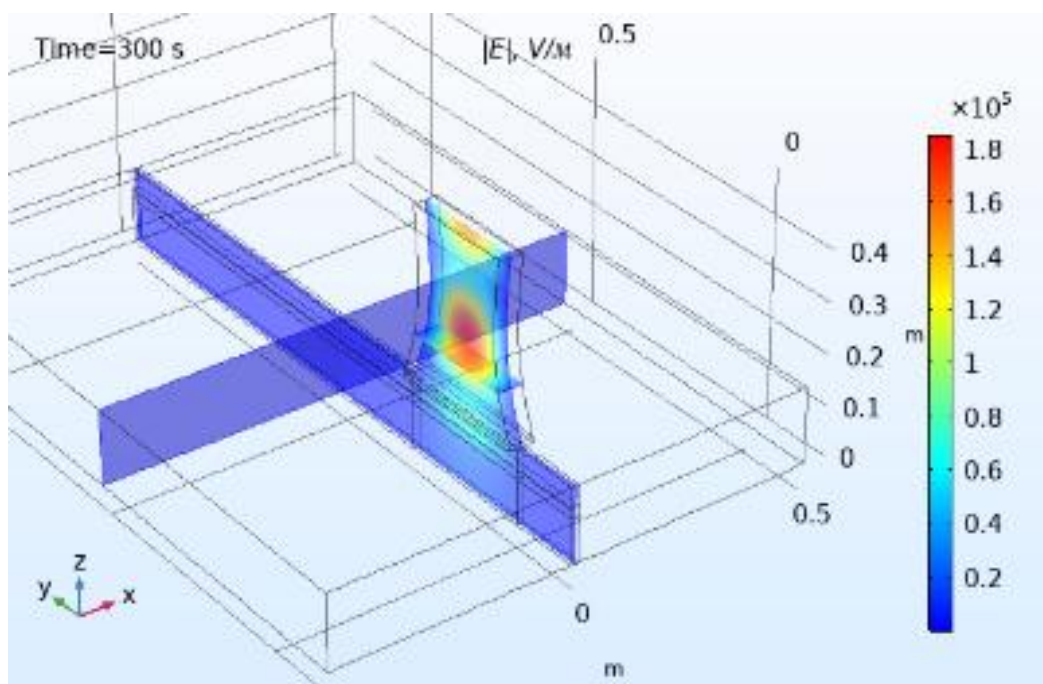


Рисунок 3.11 – Объемное распределение модуля вектора напряженности электрического поля $|E|$, В/м

Рисунок 3.11 представляет характер распределения модуля вектора напряженности электрического поля по объемам волновода и фрагмента цементобетонного покрытия. Рисунок 3.12 иллюстрирует соответствующую расчетную зависимость величины $|\mathbf{E}|$ от вертикальной координаты z на выделенном отрезке оси волновода. Эта зависимость носит существенно нелинейный характер, что определяет неоднородный характер формируемого температурного поля.

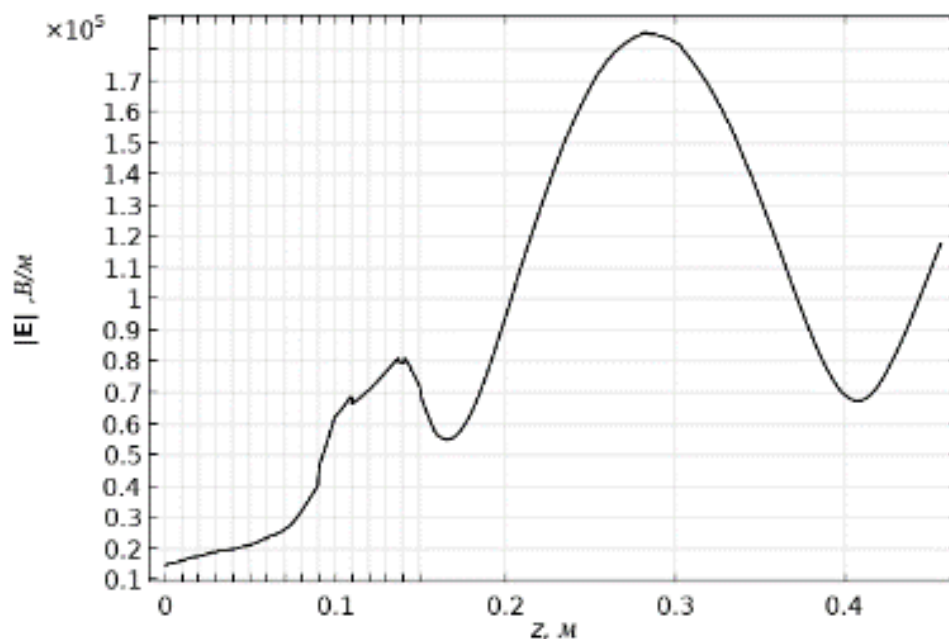
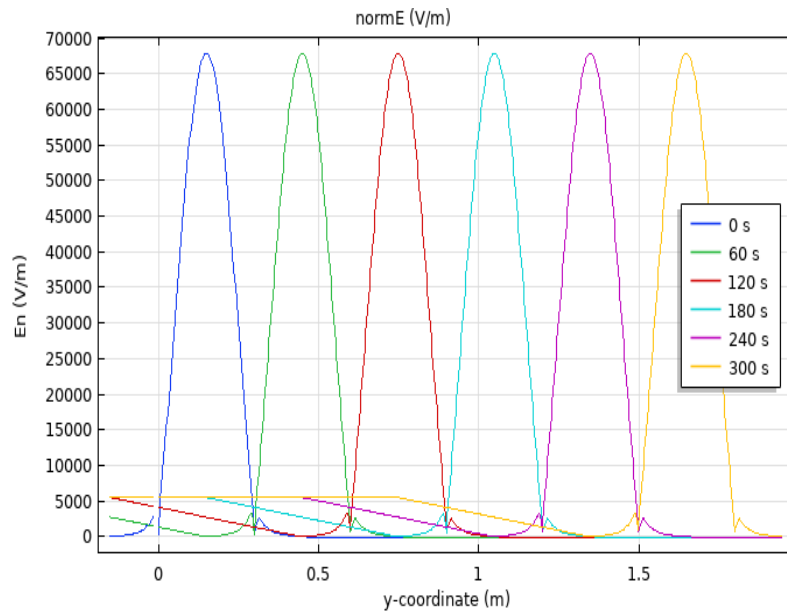
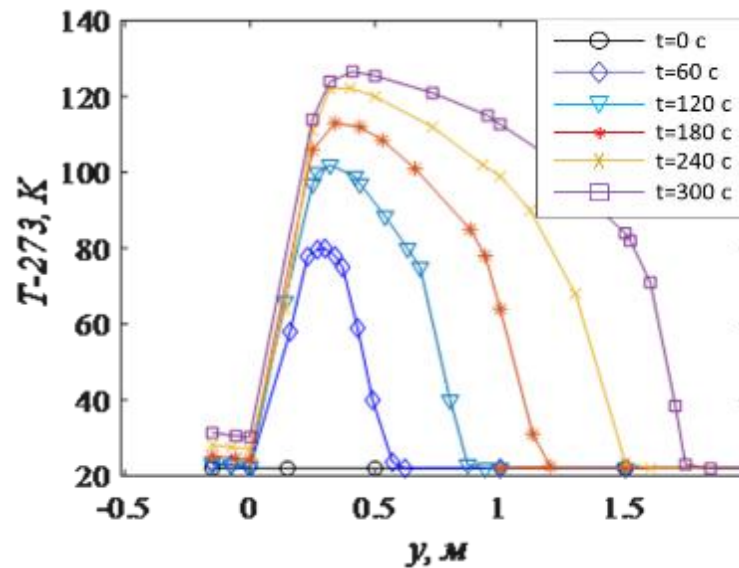


Рисунок 3.12 – Зависимость модуля вектора напряженности электрического поля $|\mathbf{E}|$, В/м от вертикальной координаты z дополнительной оси, совпадающей с осью симметрии волновода

Двигаясь вдоль деформационного шва, модуль СВЧ обработки создает в материалах изменяющееся во времени поле тепловых источников, мощность которых зависит от текущего распределения вектора напряженности электрического поля. Рисунок 3.13 *a* иллюстрирует смещение вдоль оси шва зоны электромагнитного воздействия вместе с движущейся установкой. Значения $|\mathbf{E}|$ на данном графике относятся к точкам на верхней границе шва.



а)

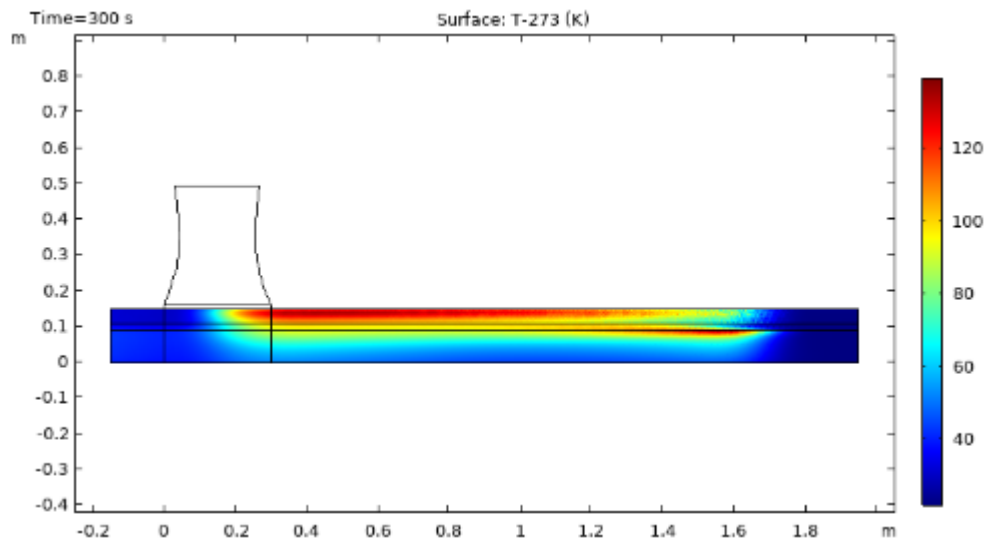


б)

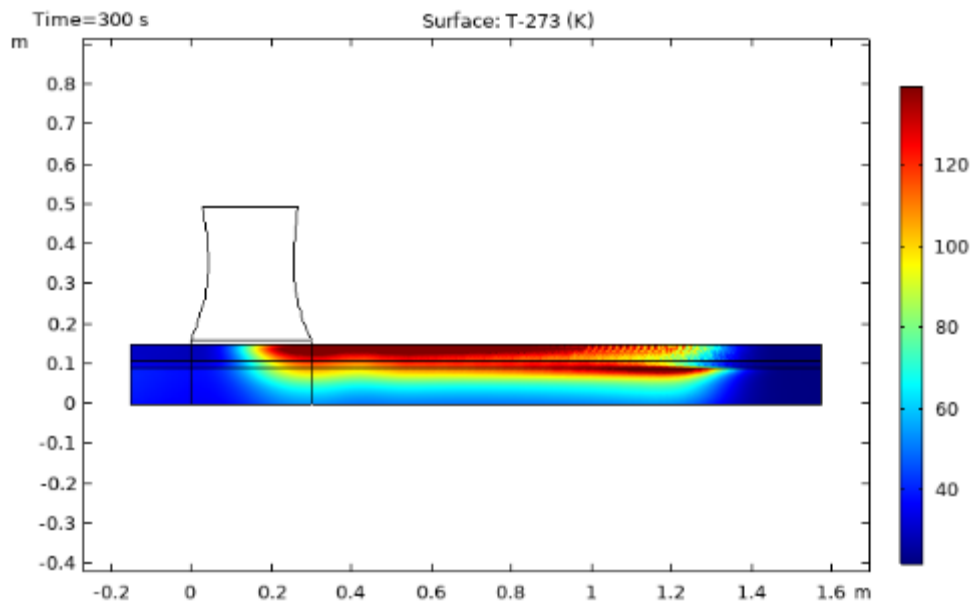
Рисунок 3.13 – Модуль вектора напряженности электрического поля $|E|$, В/м – а) и температура T , К – б) на поверхности герметика вдоль продольной оси трехслойного шва в различные моменты времени при $V=0,005$ м/с

Графики Рисунка 3.13 б показывают, как происходит рост температуры в поверхностном слое герметика при движении СВЧ установки со скоростью 5 мм/с. Особенности распределения температуры вдоль оси шва определяются как мощностью тепловых источников в обрабатываемом материале, так и его теплофизическими свойствами, определяющими скорость процессов теплообмена.

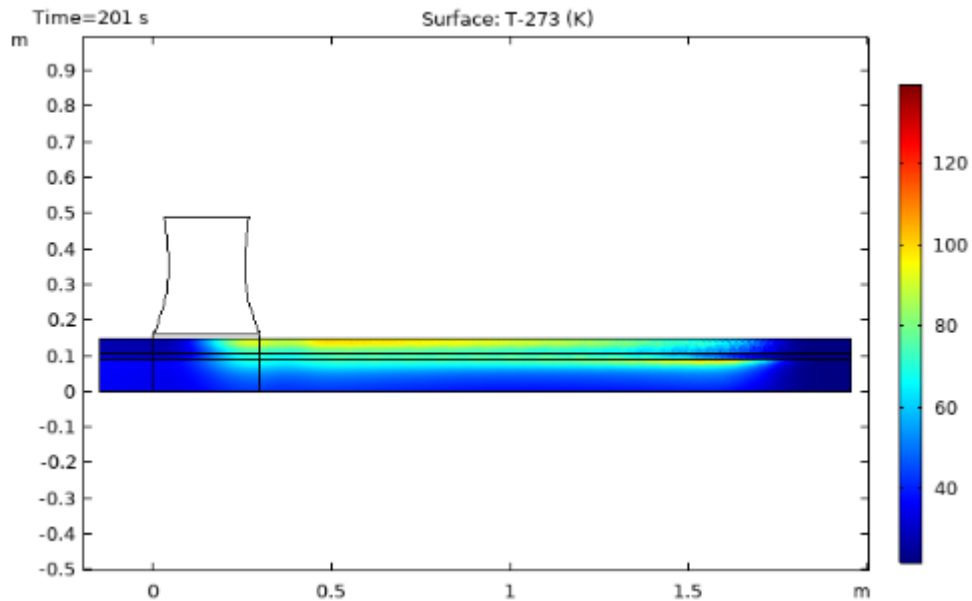
Рисунок 3.14 представляет результаты расчетов, иллюстрирующие роль скорости движения генератора излучения в процессе тепловой обработки деформационных швов. При скорости излучателя $V=0.005$ м/с поверхностные слои герметика нагреваются до температуры, достаточной для их текучести и ликвидации мелких дефектов (при заданном комплексе входных параметров модели) (Рисунок 3.14 а).



а)



б)



в)

Рисунок 3.14 – Динамика температурного распределения в продольном сечении симметричного трехслойного шва со временем при различных значениях скорости перемещения СВЧ агрегата
 $V=0,005 \text{ м/с}$ – а); $0,00375 \text{ м/с}$ – б); $0,0075 \text{ м/с}$ – в)

Если увеличить скорость установки 1,5 раза до $V=0.0075 \text{ м/с}$ (Рисунок 3.14 в), температура нагрева оказывается недостаточной для эффективного размягчения битумного герметика. Понижение скорости агрегата в два раза до величины $V=0.0025 \text{ м/с}$ (Рисунок 3.14 б) приводит к чрезмерному повышению температуры, достигающей предела (температуры вспышки), при котором возможно возгорание материала.

Таким образом, применение метода математического моделирования позволяет подобрать наиболее производительные и безопасные режимные параметры для процесса термической обработки деформационных швов в цементобетонных покрытиях. В перечень ключевых параметров, влияющих на эффективность СВЧ термообработки, входят мощность и частота микроволнового излучения, а также скорость перемещения источника излучения [109-111].

3.3.2 Интенсификация процесса термообработки трехслойных деформационных швов с использованием мобильных систем с несколькими СВЧ антеннами

Желательно повысить производительность оборудования для СВЧ нагрева деформационного шва, поскольку для выбранного комплекса входных параметров математической модели, скорость движения устройства, оснащенного 75-киловаттным магнетроном на частоте 915 МГц, составила всего 0.3 м/мин (п.3.2.1) [112]. Поэтому в данном параграфе рассмотрены возможности интенсификации процесса микроволнового нагрева герметизирующего материала в деформационном шве за счет комбинации нескольких антенн, перемещающихся вдоль оси шва одновременно друг за другом. Выполнена оценка эффективности такого подхода. Важно подчеркнуть, что главное достоинство применяемой технологии заключается не в скорости обработки деформационных швов, а в возможности длительной непрерывной эксплуатации покрытия высокого качества.

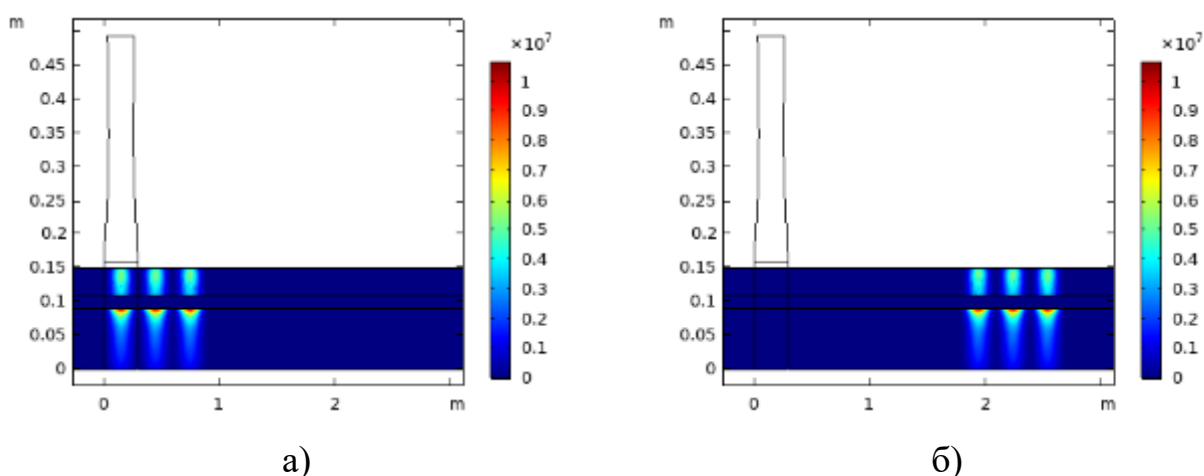


Рисунок 3.15 – Распределение плотности тепловых источников I_{mw} , Вт/м³ в трехслойном деформационном шве при перемещении мобильной системы с тремя антеннами со скоростью 0.9 м/мин для $t=0$ с – а), 120 – б)

Рисунок 3.15 демонстрирует процесс облучения деформационного шва с помощью передвижной системы трех антенн. Здесь показано, как сформировано поле тепловых источников, которое перемещается как жесткое целое по прямолинейной траектории. На Рисунке 3.15 это поле зафиксировано в начале и

конце периода движения мобильной системы. Для цепи волноводов, имеющих геометрию, описанную, в частности, в п. 3.3.1 зоны интенсивного нагрева от каждого из них не пересекаются. Эти зоны уже, чем длинная сторона нижнего сечения рупорной антенны.

Анализ распределения плотности тепловых источников I_{mw} показывает, что диэлектрический нагрев полимерного шнура не будет иметь места, что обусловлено весьма низким значением тангенса угла диэлектрических потерь полиэтилена. Заметно более равномерное распределение мощности тепловых источников в герметике по сравнению областью, занятой пескоцементной смесью.

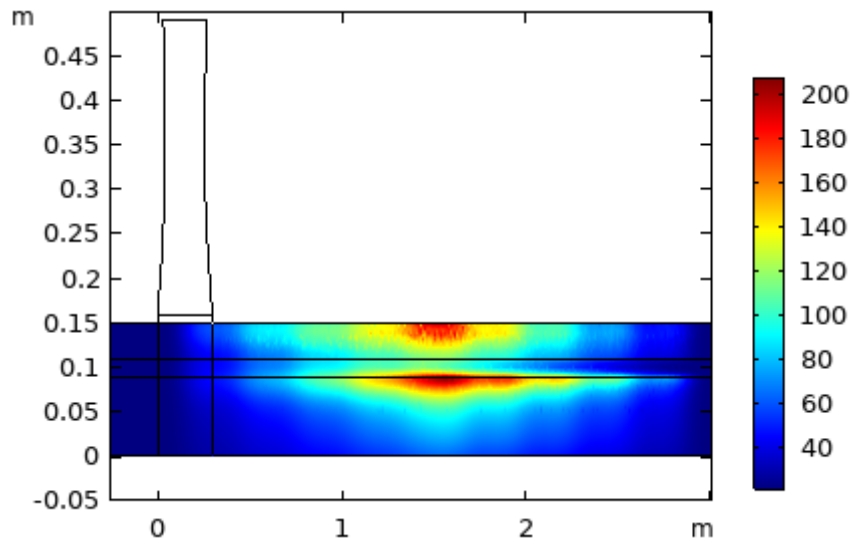
При использовании микроволнового излучения данной спецификации следует ожидать значительное повышение температуры в верхних слоях пескоцементной смеси (под шнуром), в то время как нижние слои, соприкасающиеся с землей, будут нагреваться меньше из-за существенного затухания амплитуды электромагнитной волны (Рисунок 3.12).

Из Рисунка 3.16 следует, что включение дополнительных волноводов в структуру мобильного оборудования значительно быстрее увеличивает температуру герметика. При скорости передвижения $V=0.9$ м/мин за время 100 секунд, устройство СВЧ с пятью антеннами нагревает герметик в верхнем слое до примерно 200 °С, в то время как система с тремя антеннами способна нагреть этот материал за тот же период до приблизительно 140 °С.

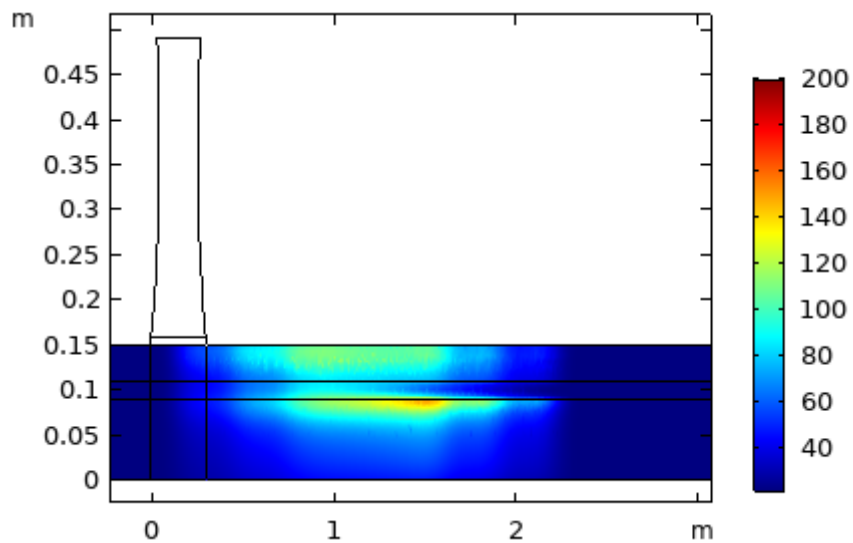
Графики, представленные на Рисунке 3.17 иллюстрируют эволюцию температурных профилей, построенных параллельно оси шва в четырех зонах расчетного фрагмента покрытия: в герметизирующем слое, в уплотнительном шнуре, в пескоцементной смеси, в бетоне.

Из графиков следует, что изменение температуры носит колебательный характер, что обусловлено неравномерным распределением мощности источников тепловыделения при использовании системы волноводов выбранного типа (Рисунок 3.15). При смещении антенны в некоторой области прекращается производство тепловой энергии вследствие взаимодействия электромагнитной волны с диэлектриком. При этом материал частично теряет накопленное тепло за

счет явления теплопроводности. Однако вскоре в этот же район продвигается следом другой источник, вызывая повторный диэлектрический нагрев до более высоких температур. Амплитуда колебаний температуры тем больше, чем выше значение средней температуры (Рисунок 3.17 *а-г*).



а)



б)

Рисунок 3.16 – Распределение температуры $T-273$, К в вертикальной плоскости симметрии трехслойного деформационного шва при СВЧ обработке мобильными системами из пяти антенн – а), трех – б), для момента времени $t=100$ с. $V=0.9$ м/мин

Из графиков на Рисунке 3.17 *б* видно, что несмотря на малую мощность тепловых источников, температура уплотнительного шнура достаточно высока,

достигая значения приблизительно $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Этот результат указывает на то, что рост температуры здесь обусловлен теплообменом с прилегающими разогретыми слоями герметика и пескоцемента. Ниспадающие ветви температурных кривых в полиэтилене отличаются от аналогичных участков для остальных материалов монотонным характером. Это связано с тем, что СВЧ обработка не нагревает уплотнительный шнур, и на расчетном перемещении мобильной системы, по участку $2\text{ м} < y < 3\text{ м}$, а интенсивность теплообмена шнура с прилегающими к нему слоями пока недостаточно высока.

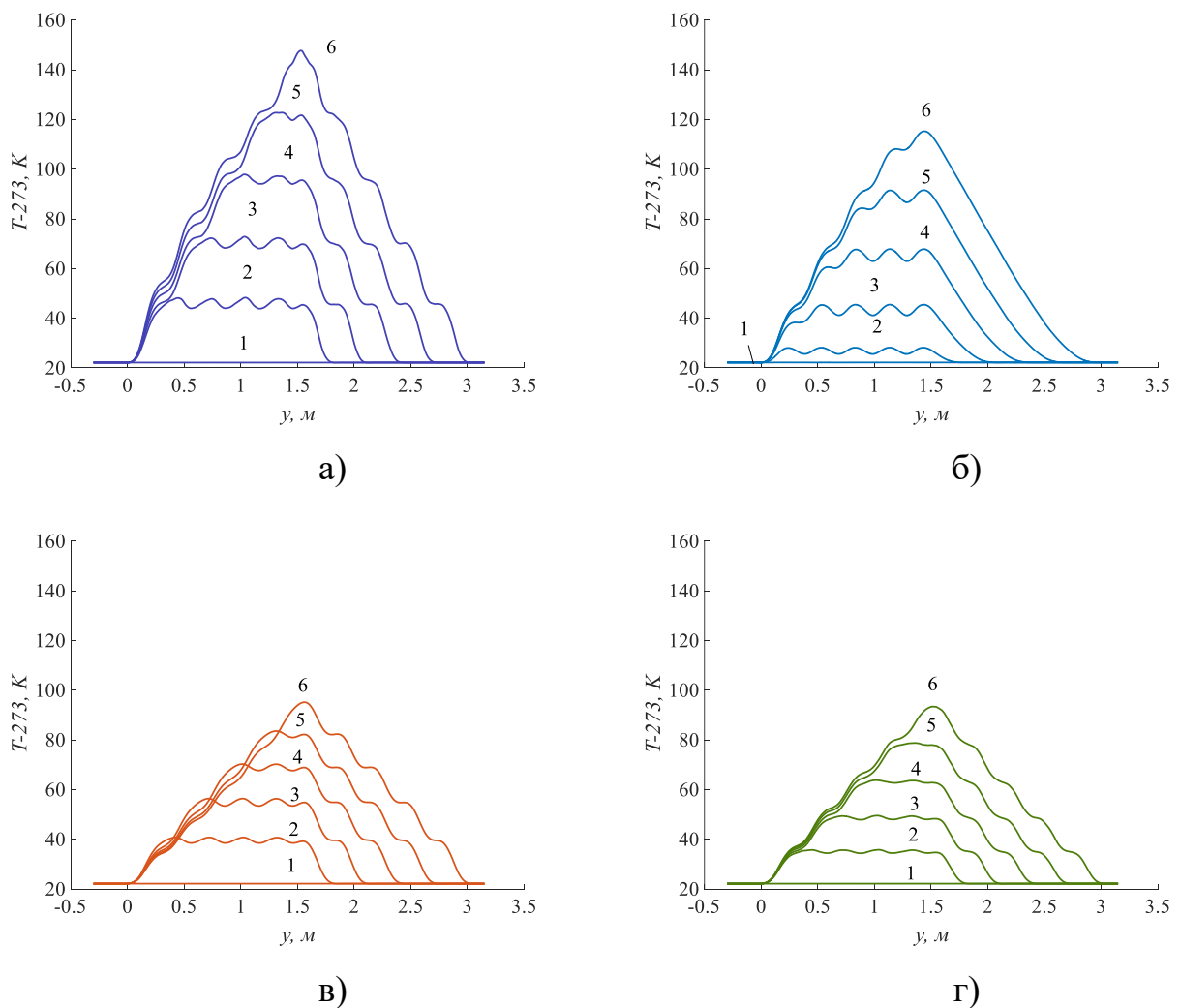
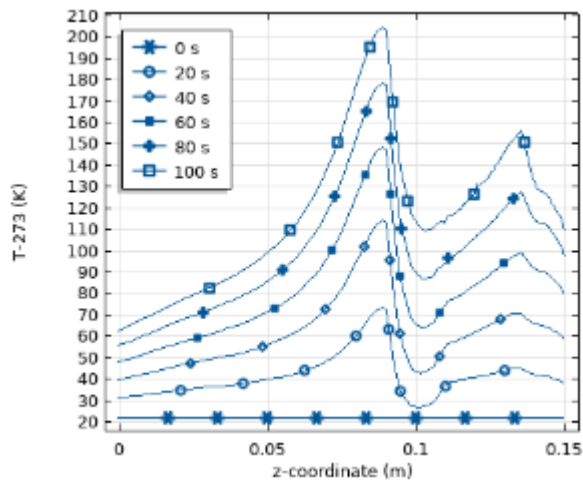


Рисунок 3.17 – Изменение температуры $T, \text{ K}$ при термообработке деформационного шва с использованием мобильного комплекса из пяти антенн при $t=0 \text{ с} - 1, 20 - 2, 40 - 3, 60 - 4, 80 - 5, 100 - 6$ вдоль линий, расположенных параллельно оси шва в герметике – а), области, занятой шнуром из вспененного полиэтилена – б), пескоцементном композите - в), бетоне – г). Прямые проходят через центр симметрии поперечного сечения каждого слоя заполнителя (а, б, в) и точку с координатами $x=2a_{ш}, z=H-h_1/2 - \text{г})$

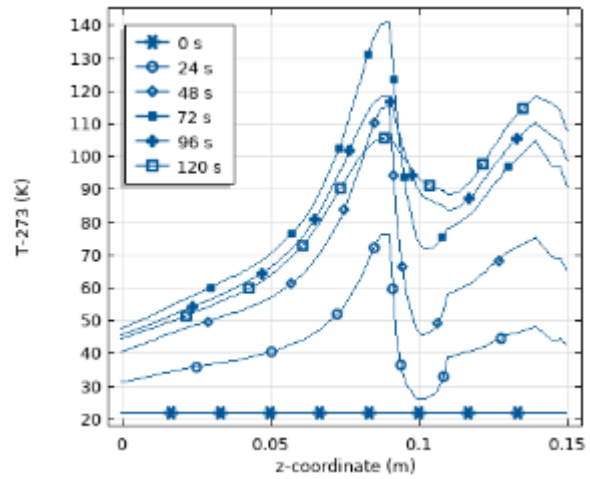
Вычислительный эксперимент показал, температура в бетонной плите вблизи деформационного шва принимает достаточно большие значения (Рисунок 3.17 *з*). Это явление связано, во-первых, с эффективным теплообменом, поскольку бетон обладает достаточно высокой теплопроводностью. Во-вторых, распространение электромагнитной волны в бетоне активизирует диэлектрический нагрев, что увеличивает его нагрев. Интенсивность диэлектрического нагрева в бетонной плите падает с увеличением расстояния от шва, что обусловлено затуханием амплитуды колебаний вектора напряженности электрического поля в структуре бетона.

Графики на рисунке 3.18 позволяют проанализировать влияние количества задействованных волноводов в мобильной СВЧ системе. Здесь представлены результаты расчета вертикальных профилей температуры в режиме СВЧ обработки, который соответствует Рисунку 3.16 *а* при $y=1,5$ м (при $y=1,5$ м температура герметика принимает наиболее высокие значения для выбранного комплекса входных параметров). Из графиков видно, что независимо от количества волноводов, формы температурного профиля подобны.

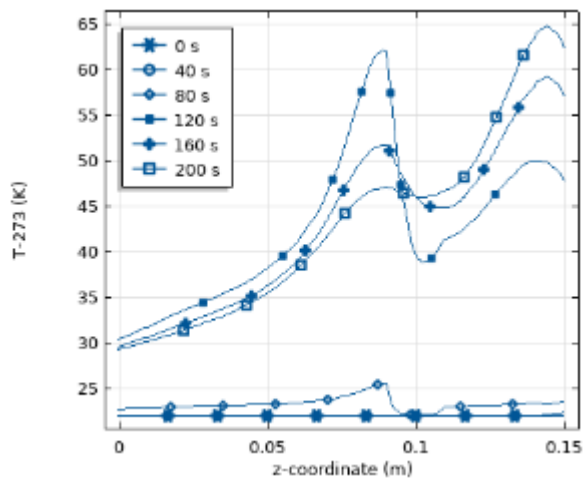
В профилях выделяются ряд температурных экстремумов. Среди них два максимума и один минимум. Первый максимум – в герметизирующем материале около внешней границы и второй – в смеси песка с цементом у внутренней границы с шнуром. Температурный минимум относится к позиции в уплотнительном шнуре, что отражает сравнительно низкий нагрев в этой области по сравнению с зонами, заполненными другими материалами. Как показывают проведенные расчеты, разница между наибольшим и наименьшим значением температуры в профиле, зависит от количества используемых волноводов. Максимальный перепад температур в вертикальном температурном профиле наблюдается при использовании пяти волноводов, минимальный – при одном [112].



а)



б)



в)

Рисунок 3.18 – Изменение температуры T , К в различные моменты времени вдоль вертикального отрезка, проведенного через точку с координатами $x=a_{ul}/2$, $y=1.5$ м при СВЧ обработке трехслойного деформационного шва мобильной системой из 5 антенн – а), 3 – б), 1 – в)

3.4 Результаты вычислительного эксперимента для выбора режимов термообработки двухслойного деформационного шва цементобетонного покрытия

В данном параграфе на основе математической модели (3.1-3.14) проведено численное исследование для упрощенного варианта заполнения деформационного шва в два слоя. В отличие от трехслойного шва в двухслойном шве не используется уплотнительный шнур из вспененного полиэтилена высокой плотности. Такой шнур дает дополнительную защиту от проникновения влаги в основание цементобетонного покрытия. Однако в определенных, как правило, стесненных условиях при строительстве формируют деформационный шов из

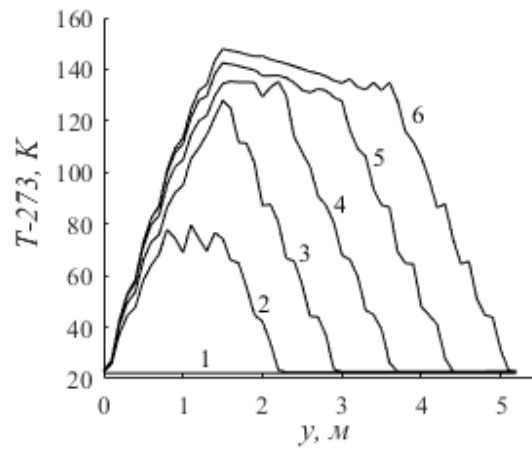
двух слоев. Следует отметить, что прокладка двухслойных швов осуществляется достаточно часто. Валидация модели (3.1-3.14) для двухслойного шва проведена в п. 3.2.2. Для двухслойного шва высотой H введены обозначения высоты слоев: толщина верхнего слоя – h_1 , толщина нижнего слоя – h_2 .

Значения тепло- и электрофизических свойств герметизирующего материала, пескоцементной смеси и бетона соответствуют данным, приведенным в таблице 3.1.

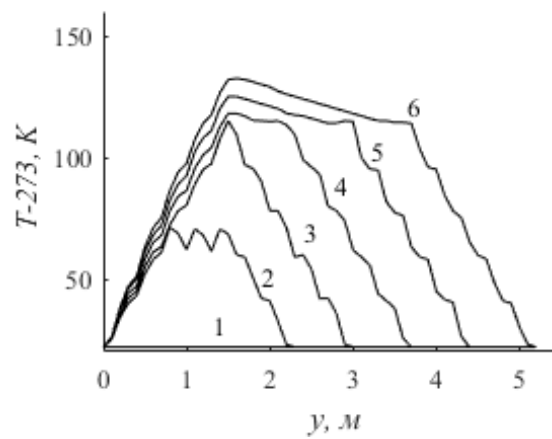
Мобильная СВЧ система аналогична рассмотренной выше для термообработки трехслойного шва и включает пять волноводов с геометрическими характеристиками, указанными в п. 3.3.1, с магнетронами мощностью 75 кВт, работающих на частоте 915 МГц.

На Рисунке 3.19 представлено изменение трех горизонтальных температурных профилей в битумном слое, двухслойного деформационного шва. Период обработки равен 6 минутам. Данные получены при эксплуатации микроволновой установки со скоростью $V=0,015$ м/с.

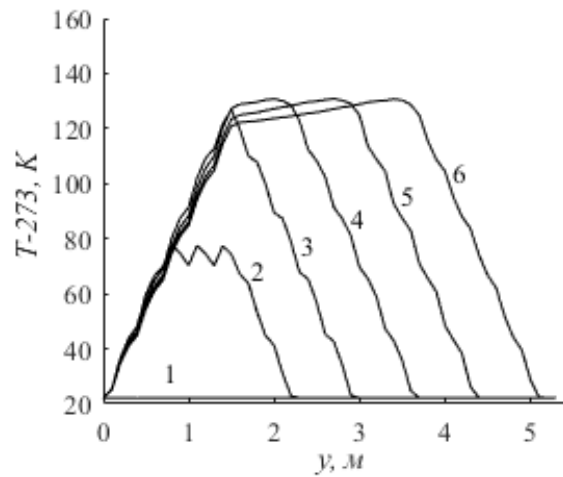
Каждая рупорная антенна излучает электромагнитную волну, которая характеризуется специфическим распределением вектора напряженности электрического поля. При взаимодействии электромагнитного поля с диэлектриком верхнего слоя шва формируется неоднородное поле тепловых источников, которое приводит к существенно нелинейным горизонтальным профилям температуры на начальной стадии переходного процесса (кривые 2 на Рисунке 3.19 *а-в*). Далее с ростом температуры герметика амплитуда возмущений температуры уменьшается (кривые 3-6 на Рисунке 3.19 *а-в*). Также амплитуда возмущений температуры становится меньше для температурных профилей, которые построены на горизонталях, расположенных глубже.



а)



б)



в)

Рисунок 3.19 – Изменение температуры T , К в герметике вдоль прямых, параллельных оси шва, принадлежащих его плоскости симметрии $z=H-a$), $H-h_1/2-b$), $H-h_1-v$) при СВЧ обработке двухслойного деформационного шва мобильной системой из 5 антенн для $V=0,015$ м/с в различные моменты времени $t=0$ с – 1, 48 – 2, 96 – 3, 144 – 4, 192 – 5, 240 – 6

При скорости передвижения установки $V=0,015$ м/с максимальное значение температуры реализуется на верхней границе деформационного шва. Сравнение значений температуры битума у нижней границы битумного слоя и по оси симметрии (кривые 6 на Рисунке 3.19 б-в) показывает, чем низ слоя битума может быть прогрет значительно, чем в центре. Данный температурный градиент обусловлен тепловым взаимодействием между битумом и прилегающим к нему более нагретым слоем пескоцементной смеси.

Теплоотдача от верхней границы битумного заполнителя в окружающую атмосферу способствует его охлаждению (кривые 3-6 на Рисунке 3.19, а-б). Условия теплообмена на поверхности контакта битума и пескоцементной смеси, наоборот, вносят дополнительный вклад в нагрев герметика в нижней части шва (кривые 3-6 на Рисунке 3.19 в).

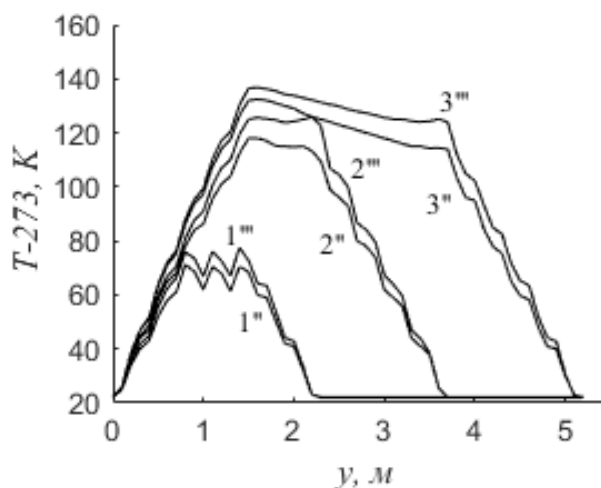


Рисунок 3.20 – Профили температуры в слое герметика вдоль направления, параллельного оси симметрии шва, при $z=H-0.025$ м, для двухслойного (1''-3'') и трехслойного (1'''-3''') деформационных швов при скорости мобильной СВЧ системы $V=0,015$ м/с: в различные моменты времени $t=48$ с – 1'' и 1''', 144 – 2'' и 2''', 240 – 3'' и 3'''

Моделирование СВЧ нагрева двух- и трехслойного деформационного шва при одинаковых условиях обработки показало, что температура герметика в трехслойной конструкции выше, чем в двухслойной (Рисунок 3.20). Разница

значений температуры в верхнем заполнителе, например, в его центре, достигает приблизительно 10 К для двух видов швов. 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.

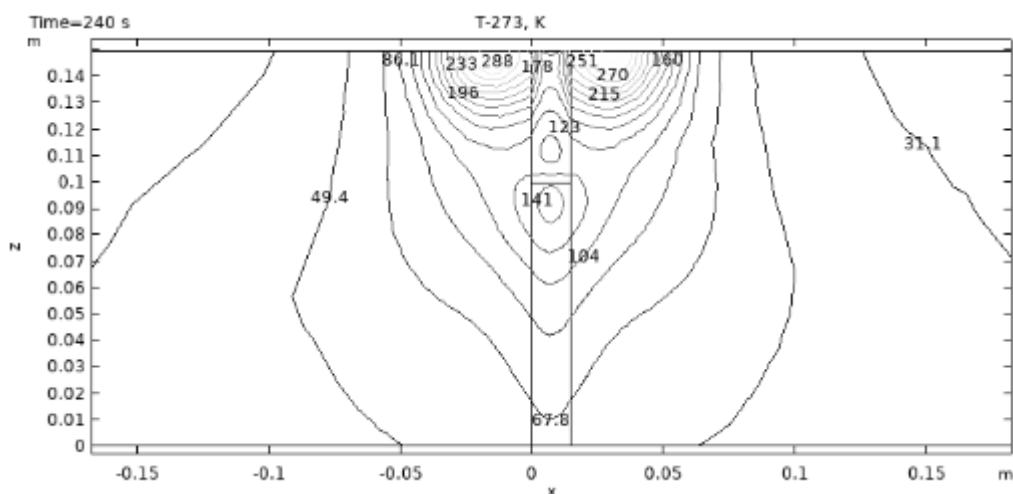
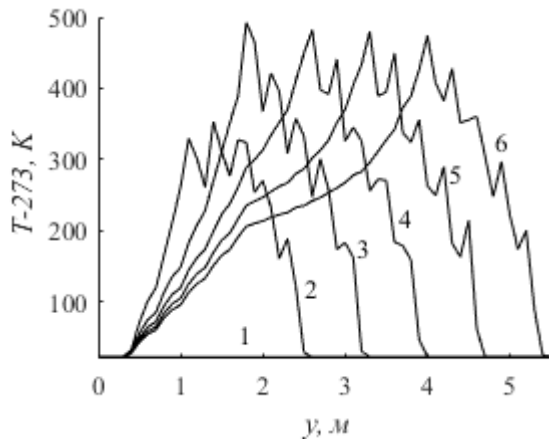


Рисунок 3.21 – Изотермы в двухслойном деформационном шве и окружающих бетонных плитах в сечении перпендикулярном оси симметрии шва при $y=3$ м, $V=0,015$ м/с, $t=240$ с

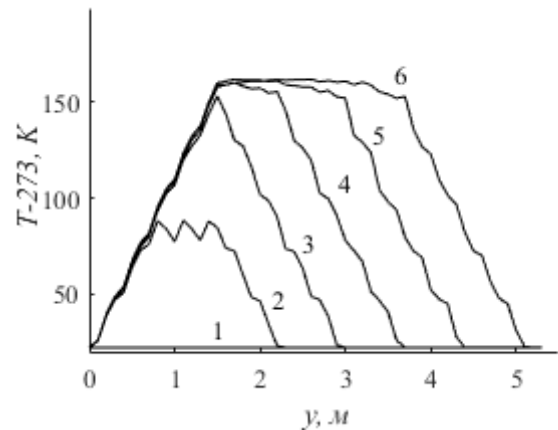
На Рисунке 3.21 показаны температурные изолинии в том поперечном сечении фрагмента, где фиксируется максимальная температура ($y=3$ м, $t=240$ с). Наибольшее значение температуры бетона более чем на 100 К превышает наибольшее значение температуры герметизирующего материала на основе битума. При удалении от зоны деформационного шва температура бетона снижается за счет теплоотвода в объем бетонной плиты, в грунт и атмосферу.

Вычислительный эксперимент прогнозирует значительное повышение температуры бетона, причем особенно в той поверхностной части фрагмента покрытия, которая находится вблизи деформационного шва (см. Рисунок 3.22 а). Известно, что критические значения температуры бетона на портландцементной основе, приводящие к разрушению цементного камня, составляют 250–300 °С. Огнеупорные бетоны могут сохранять прочность при значительно более высоких

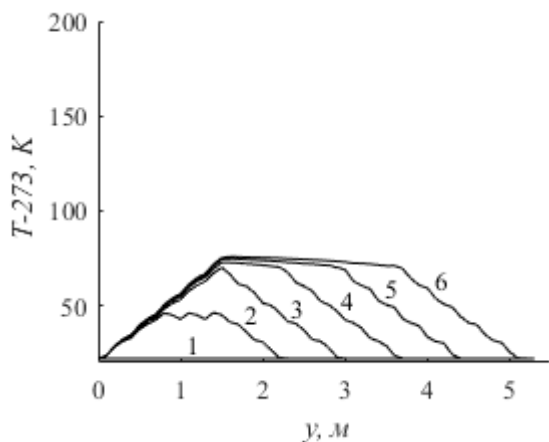
температурах, до 700-800 °С и более. Анализ изотерм показывает, что глубокие слои бетона демонстрирует быстрое остывание. Так на глубине $z=h_2$, которая соответствует границе раздела между заполнителями, устанавливается температура примерно 75 °С (см. Рисунок 3.22 в).



а)



б)



в)

Рисунок 3.22 – Горизонтальные профили температуры T , К в бетонной плите ($x=2a_{ш}$) вдоль прямых, параллельных оси шва, ($z=H-a$, $H-h_1/2-b$, $H-h_1-e$), при СВЧ обработке двухслойного деформационного шва мобильной системой из 5 антенн при $V=0,015$ м/с в различные моменты времени $t=0$ с – 1, 48 – 2, 96 – 3, 144 – 4, 192 – 5, 240 – 6

Температура песчано-цементной смеси на той же высоте $z=h_2$ оказывается несколько выше, чем температура на этой высоте в окружающих бетонных плитах (Рисунок 3.23). В частности, это связано с тем, что тангенс диэлектрических потерь заполнителя шва нижнего слоя превышает аналогичный показатель для бетона в 1.5 раза [113].

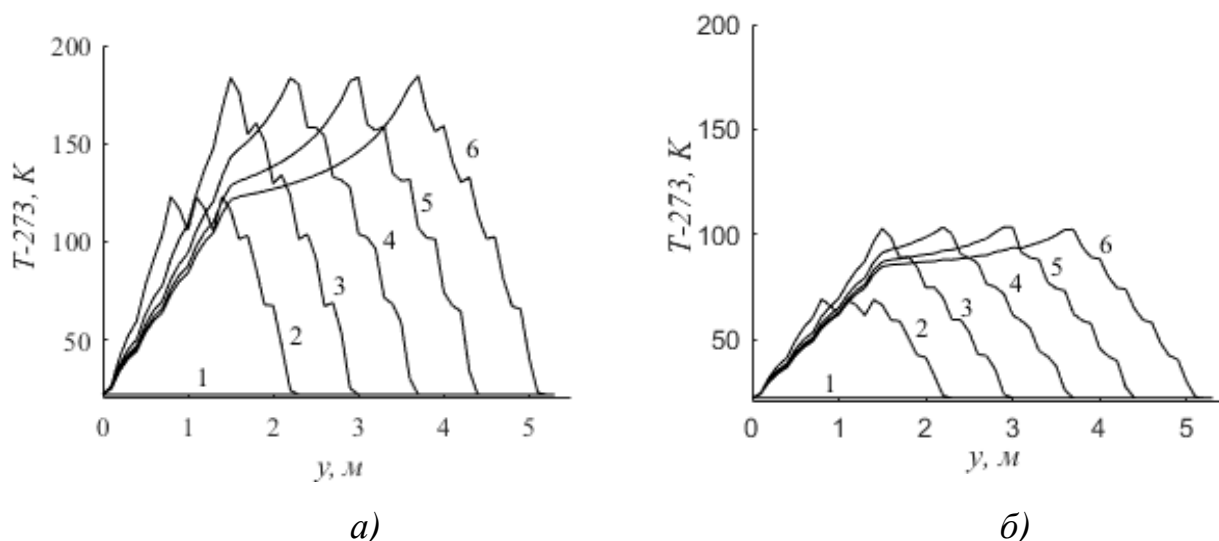


Рис. 3.23 – Изменение температуры T , К в слое пескоцемента вдоль прямых, параллельных оси шва, принадлежащих его плоскости симметрии ($z = h_2 - a, h_2/2 - b$), при СВЧ обработке двухслойного деформационного шва мобильной системой из 5 антенн при $V=0,015$ м/с в различные моменты времени $t=0$ с – 1, 48 – 2, 96 – 3, 144 – 4, 192 – 5, 240 – 6

Графики на Рисунке 3.24 позволяют проанализировать влияние скорости перемещения излучающего СВЧ устройства на процесс нагрева герметизирующего заполнителя деформационного шва. Температурные кривые на Рисунке 3.24 построены вдоль оси симметрии битумного слоя. Варьировалась скорость движения мобильной СВЧ системы. Для выбранных условий расчета при пониженной скорости движения $0,02$ м/с температура битума оказывается слишком низкой для оптимального прогрева. Когда же скорость 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.

Модельные расчеты показывают, что анализируя динамику температурных полей в герметике для комплекса конкретных внешних условий, режимных и материальных параметров можно прогнозировать скорость движения мобильной установки СВЧ нагрева, которая обеспечит переход герметика в текучее состояние на период «залечивания» в его объеме стартовых очагов разрушения. При этом температура герметика в процессе СВЧ нагрева не выйдет на аварийный уровень, т.е. ее величина не превысит температуру вспышки. Соблюдение этих двух

условий гарантирует безопасность и эффективность процесса [113]. Значения температурных пределов герметизирующего материала зависят от состава композиции. Для битума (без модификаторов) температура текучести составляет 130-150 °С, а температура вспышки - примерно 220-230 °С).

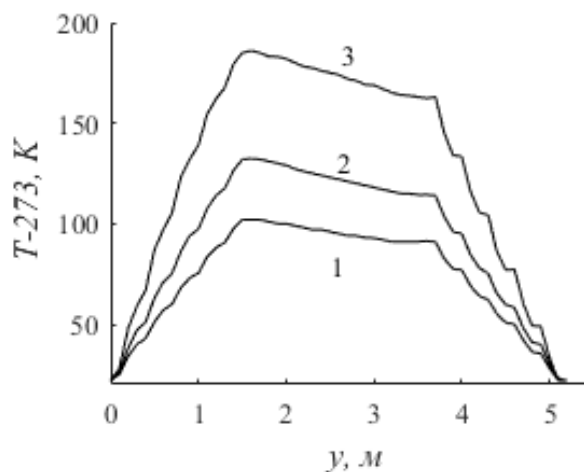


Рисунок 3.24 – Профили температуры в вдоль оси симметрии слоя битума слое герметика вдоль направления, параллельного оси симметрии двухслойного шва ($z=H-0.025$ м), при различной скорости мобильной СВЧ системы из 5 антенн на одинаковом перемещении $s=3.6$ м: $V=0.02$ – 1, 0.015 – 2, 0.01 м/с – 3

3.5 Выводы

1. Получена сопряженная нестационарная математическая модель СВЧ нагрева фрагмента цементобетонного покрытия с деформационным швом.

2. На основе результатов натурного эксперимента СВЧ нагрева деформационных швов, как двух- так и трехслойных, доказана адекватность предложенной математической модели.

3. Выявлены особенности неравномерного прогрева слоев деформационного шва в переходном режиме, обусловленные немонотонным убыванием модуля вектора напряженности электрического поля от поверхности покрытия в глубину.

4. Показано, что при обработке трехслойного деформационного шва в расчетных условиях применение 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 существенно ниже температуры вспышки.

5. Установлено, что в рассмотренных условиях диэлектрические свойства бетона обеспечивают интенсивный прогрев окружающих бетонных плит в окрестности деформационного шва. При удалении от зоны шва температура бетона существенно понижается, за счет оттока тепла в объем плиты, к грунту и окружающему воздуху.

6. На примере мобильных СВЧ систем из нескольких рупорных антенн для термической обработки деформационных швов показано, что математическая модель (3.1-3.14) позволяет определить эффективную и безопасную скорость перемещения этой системы в зависимости от комплекса режимных, и конструктивных параметров, а также тепло- и электрофизических свойств материалов.

4. Технические решения и технико-экономическое обоснование эффективности применения способа профилактической СВЧ обработки деформационных швов для поддержания высоких эксплуатационных характеристик цементобетонных покрытий

Результаты теоретического и экспериментального исследования интенсивного нагрева деформационных швов цементобетонных покрытий определили направление поиска технических решений, которые позволяют реализовать на практике идею профилактической термообработки герметизирующего материала шва с использованием СВЧ энергии с целью восстановления мелких дефектов (сколов, трещин, каверн с малым характерным размером), не дожидаясь существенных видимых повреждений. Периодическое проведение работ такого типа будет поддерживать на высоком уровне эксплуатационных качества деформационных швов, увеличит межремонтные сроки, обеспечивая определенный экономический эффект. Выполнение таких работ не требует длительного вывода из эксплуатации участков дорожного полотна или взлетно-посадочной полосы.

В данной главе рассмотрены технические решения, защищенные патентами РФ [114, 116, 118] (Приложение Б), обеспечивающие поддержание высокого качества деформационных швов цементобетонных покрытий. Реализация данного способа достигается путем периодического нагрева герметизирующего материала до состояния текучести с помощью мобильного источника электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, перемещающегося вдоль шва.

4.1 Самоходное устройство для обработки швов цементобетонных покрытий СВЧ излучением

Для реализации способа предлагается самоходное устройство с установленными на нем силовым блоком, СВЧ - излучателем, компрессорным устройством, дозатором праймера. Схема устройства представлена на Рисунке 4.1 (патент № 208062 U1 РФ) [114].

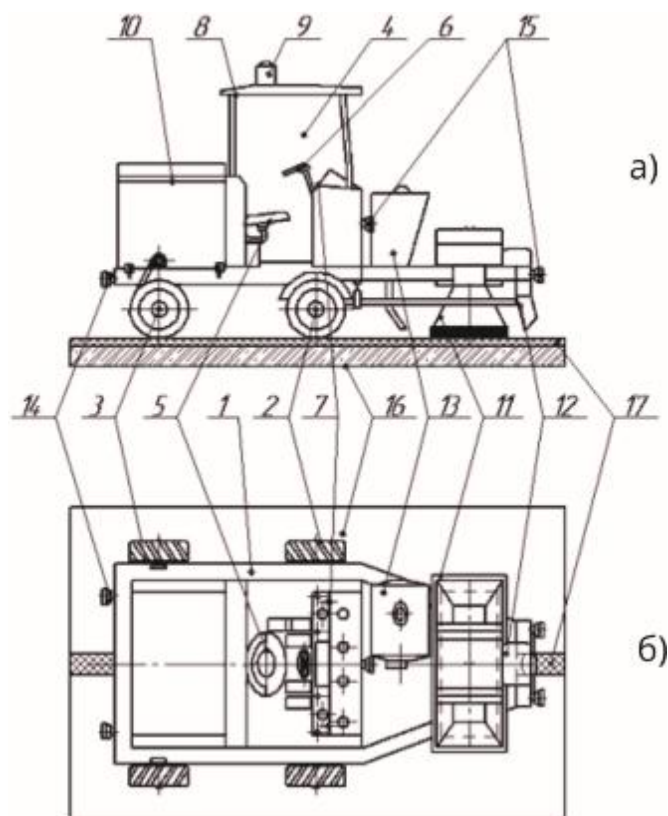


Рисунок 4.1 – Конструкция самоходного устройства для обработки швов цементобетонных покрытий: 1 – передвижная рама; 2 – ведомые колеса; 3 – ведущие колеса; 4 – рабочее место оператора; 5 – сиденье оператора; 6 – руль; 7 – панель управления; 8 – рамный тентовый навес; 9 – проблесковое сигнальное устройство; 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 [114]

Данное устройство обеспечивает плавный и равномерный нагрев герметика в деформационном шве. Герметизирующий материал переходит в текучее состояние и восстанавливает утраченные рабочие свойства, потерянные при эксплуатации в результате старения, циклических нагрузок, испарения легких фракций мастики. Регулирующее устройство электропривода, позволяет сохранять плавность хода самоходной установки и необходимый скоростной режим, обеспечивающий нагрев герметизирующего материала до необходимого значения температуры, при которой герметизирующий материал переходит в текучее состояние [114].

Для термообработки швов цементобетонных покрытий целесообразно применять СВЧ излучатель, содержащий сварной наружный металлический корпус специальной геометрической формы с нижним прямоугольным сечением $a \times b$ (Рисунок 4.2), который формирует плоскую монохроматическую волну типа H_{10} (патент № 210068 U1 РФ) [116].

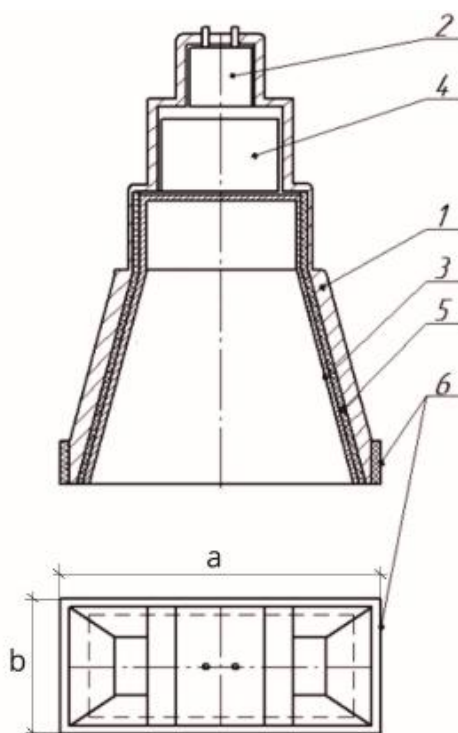


Рисунок 4.2 – Конструкция СВЧ излучателя для обработки швов цементобетонных покрытий: 1 – наружный металлический корпус; 2 – магнетрон; 3 – рупорный излучатель; 4 – модуль направления СВЧ поля; 5 – изолирующая решетка; 6 – наружный изолирующий пояс [116]

Конструкция состоит из камер в виде набора призм и пирамид, где размещены следующие элементы: магнетрон, соединенный через волновод с пирамидальным рупорным излучателем, модуль направления СВЧ поля, внутренняя экранирующая изолирующая решетка, наружный изолирующий пояс, выполненный из металлической сетки с ячейкой размером меньше длины волны, размещённый по нижнему периметру корпуса в области контакта с обрабатываемой поверхностью. Размеры рупорного излучателя рассчитываются в зависимости от характеристик применяемого магнетрона, геометрических

параметров деформационного шва и теплофизических характеристик герметизирующего материала.

Предлагаемая конструкция рабочего органа СВЧ установки обеспечивает сфокусированное воздействие в нужной зоне термообработки в требуемом временном периоде.

Конструктивно рабочий орган СВЧ-установки может монтироваться на металлической раме (Рисунок 4.3), которая выполнена в виде передвижной платформы, оборудованной поворотными колесами. Такая конструкция обеспечивает свободу маневрирования и возможность изменения направления движения вдоль траектории обрабатываемого шва. Для достижения высокой точности позиционирования рабочего органа относительно поверхности шва, должна быть предусмотрена функция регулировки его высоты. Питание магнетрона осуществляется от электрогенератора. Перемещение всей установки может осуществляться как вручную оператором, так и в автоматическом режиме с использованием электропривода, приводящего в движение ведущие колеса.

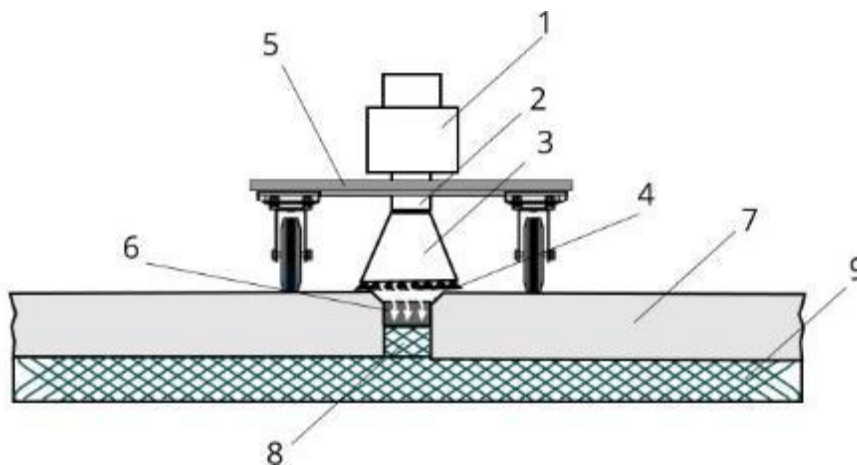


Рисунок 4.3 – Конструкция рабочего органа СВЧ установки для тепловой обработки деформационных швов: 1 – блок питания с СВЧ генератором; 2 – линия передачи СВЧ энергии; 3 – рупорная антенна (секторный Н-рупор); 4 – экранирующий пояс; 5 – передвижная платформа; 6 – герметизирующий материал; 7 – цементобетонная плита; 8 – пескоцементная смесь; 9 – цементно-песчаное основание

Принцип функционирования СВЧ-устройства основан на следующем: рупорный излучатель позиционируется над зоной деформационного шва и совершает поступательное движение вдоль него с заданной скоростью, обеспечивая нагрев герметизирующего материала до состояния текучести.

4.2 Способ профилактики преждевременного разрушения деформационных швов цементобетонных покрытий

В результате проведенного исследования запатентован способ профилактики преждевременного разрушения деформационных швов цементобетонных покрытий (патент № 2783131 С9 РФ) [118]. Согласно предлагаемой методике, самоходное устройство, рассмотренное в пар. 4.1 с установленными на нем силовым блоком, СВЧ - излучателем, компрессорным устройством, дозатором праймера, доставляется на участок покрытия, подлежащий обработке. Оператор выставляет устройство таким образом, чтобы деформационный шов находился посередине передвижной рамы, определяет направление движения визиром, включает силовой блок через блок управления. В силовом блоке включается электрогенератор посредством запуска ДВС, питающий СВЧ излучатель, компрессор, после чего установка перемещается над зоной деформационного шва с заданной скоростью. Перед обработкой шва СВЧ излучателем, компрессорное устройство воздухом предварительно продувает шов, очищая его от мусора и пыли. Оператор включает СВЧ-излучатель, который прогревает герметик шва до температуры текучести, далее при необходимости, из емкости, направленной струей на нагретый герметик подается праймер, добавляющий легкие фракции в материал заполнителя шва, улучшая его свойства сцепления с жестким материалом покрытия. Далее этой процедуре подвергаются все участки цементобетонного покрытия с поврежденными деформационными швами.

Под воздействием СВЧ нагрева происходит самозалечивание небольших дефектов, включая незначительные разрывы в герметизирующем материале

потерю сцепления герметика с поверхностью цементобетонных плит. Важно подчеркнуть, что изготовители герметизирующих материалов рекомендуют не подвергать герметик повторному нагреванию больше одного раза. Однако, исследование, проведенное в [119], показывает, что микроволновое воздействие не оказывает негативного влияния на физико-механические характеристики герметика, а обработка микроволнами органического связующего материала способствует увеличению прочности и устойчивости асфальтобетона.

Предлагаемая технология восстановления рабочих свойств деформационных швов с помощью СВЧ обработки может включать в себя ряд операций:

анализ состояния элементов покрытия имеющих незначительные дефекты в швах, маркировку поврежденных участков непосредственно на цементобетонном покрытии с составлением схемы дефектов покрытия (если доля таких дефектных швов превышает $2/3$ от их общей длины, рекомендуется провести превентивную СВЧ обработку всех швов);

размещение СВЧ устройства над обрабатываемой зоной покрытия, так, чтобы, раскрыв рупорной антенны располагался максимально близко к поверхности покрытия, а область шов находилась в центре раскрыва рупорной антенны;

запуск СВЧ устройства и движение его с установленной скоростью над деформационным швом;

при необходимости введение легких фракций герметика в материал заполнителя шва;

мониторинг температуры обработанного герметика в деформационном шве с помощью приборов для контроля температуры и визуальный осмотр обработанного участка шва на предмет устранения дефектов в герметизирующем материале шва;

отключение устройства после обработки участка шва и перемещение на следующий участок в соответствии со схемой дефектов покрытия.

При наличии дефектов, остающихся после термообработки необходимо уменьшить скорость движения устройства, увеличив тем самым, время обработки герметика в шве, делая поправку на температуру окружающего воздуха и покрытия, а также на особенности состава герметизирующего материала.

4.3 Исследование вопросов безопасной работы персонала с установкой для СВЧ нагрева битумно-полимерного герметика в деформационном шве

Применение способа СВЧ обработки деформационных швов цементобетонных покрытий на практике может быть реализовано только при строгом соблюдении мер безопасности для персонала. Микроволновое излучение может негативно влиять на здоровье и вызывать в теле человека порой необратимые изменения [71, 120, 121].

Ниже представлены результаты, полученные в ходе измерений плотности потока энергии электромагнитного поля с помощью экспериментальной СВЧ установки. Эти данные важны при оценке соответствия разрабатываемого метода профилактики деформационных швов цементобетонных покрытий установленным нормам технической безопасности рабочего персонала.

В Российской Федерации нормы по максимально разрешенной интенсивности электромагнитных полей (ЭМП) определены рядом нормативно-регулирующих документов [122, 123, 124].

В соответствии с источниками [122, 123, 124], оценка и нормирование уровней электромагнитного излучения в частотном диапазоне от 30 кГц до 300 ГГц выполняется на основе показателя энергетической экспозиции (ЭЭ). Данный показатель обозначает меру воздействия электромагнитного поля определенной интенсивности за установленный период времени. Для частотного спектра от 300 МГц до 300 ГГц расчет энергетической экспозиции производится по следующей формуле:

$$\text{ЭЭ}_{\text{ПЭ}} = \text{ППЭ} \times T, \quad (4.1)$$

где ППЭ обозначает плотность потока энергии ($\text{мкВт}/\text{см}^2$); Т – продолжительность воздействия за одну смену в часах, ч.

Установленное нормативное максимально допустимое значение энергетической нагрузки на работников в течение рабочего дня не должно превышать $200 \text{ мкВт}/\text{см}^2 \cdot \text{ч}$ [122, 123, 124].

При кратковременном воздействии (до 12 мин. за рабочую смену) предельно допустимый уровень плотности потока энергии электромагнитного излучения не должен превышать $1000 \text{ мкВт}/\text{см}^2$ (для условий локального облучения кистей рук $5000 \text{ мкВт}/\text{см}^2$) [122, 123, 124].

Предлагаемая методика СВЧ термообработки деформационных швов исключает необходимость постоянного присутствия персонала в зоне действия излучающей антенны на протяжении всей рабочей смены. В задачи обслуживающего персонала могут входить регулировка положения рупора относительно оси шва, а также периодический визуальный контроль корректного позиционирования рабочего органа СВЧ установки над деформационным швом для обеспечения наиболее эффективной обработки шва.

Следовательно, необходимо определить безопасную область вокруг СВЧ установки, где уровень плотности потока электромагнитной энергии не будет превышать безопасную норму ($1000 \text{ мкВт}/\text{см}^2$) для кратковременного воздействия на персонал, а также допустимое время нахождения работников в зоне работы СВЧ установки в зависимости от их удаленности от источника излучения.

Исследование проводились применительно к экспериментальной лабораторной СВЧ установке, описанной в п. 2.3.1 [117].

Таблица 4.1 – Технические параметры измерителя уровня ППЭ

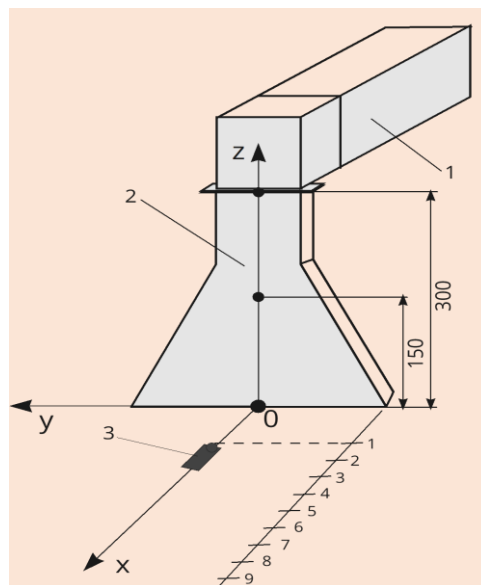
Модель прибора	НТ-М2
Диапазон измерения плотности потока энергии	от 0 до $9,99 \text{ мВт}/\text{см}^2$
Погрешность	$\pm 1 \text{ дБ}$
Предельное значение сигнализации	$5,0 \text{ мВт}/\text{см}^2$
Диапазон частот	$2,45 \text{ ГГц}$
Эксплуатационные параметры	температура воздуха – $0-50^\circ\text{C}$; относительная влажность воздуха – 10-80 %

Измерение мощности излучения проводилось прибором для определения уровня ППЭ, технические параметры которого указаны в таблице 4.1, в соответствии с документацией устройства [125].

На Рисунке 4.4 показаны экспериментальная СВЧ установка с измерителем уровня ППЭ и схема проведения эксперимента.



а)



б)

Рисунок 4.4 – СВЧ установка с измерителем уровня ППЭ – а) и схема проведения эксперимента – б). На схеме показаны: 1 – блок питания с магнетроном; 2 – рупорный волновод; 3 – измеритель плотности потока энергии ЭМП

Измерения проводились со снятым защитным экраном в нижней части рупорной антенны. Применительно к размерам экспериментальной СВЧ установки максимальная высота расположения измерителя уровня ППЭ от поверхности покрытия по оси Z составила 30 см (Рисунок 4.4 б).

Разработана и апробирована следующая экспериментальная методика для оценки электромагнитной безопасности работников при эксплуатации установки СВЧ-диапазона.

1. Прибор для измерения уровня ППЭ позиционируется в начальной точке (позиция 1 соответствующая координатам $X = 30$ см, $Z = 0$).

2. Измеряется плотность потока энергии (ППЭ) вдоль боковой грани рупора. Перемещение измерителя осуществляется по оси X (позиции 1-9, шаг 10

см) согласно схеме эксперимента (Рисунок 4.5 б).

3. Последовательно проводятся аналогичные измерения ППЭ при значениях $Z = 15$ см и $Z = 30$ см. Для обеспечения достоверности на каждой позиции измерение проводится с трехкратным повторением, и в качестве итогового значения используется среднее арифметическое.

4. Выполняется статистическая обработка полученных экспериментальных данных. Определяется аппроксимирующая зависимость ППЭ от координат X и Z . Допускается результаты измерений представить в виде таблиц.

5. Определяется минимальное безопасное расстояние от СВЧ установки до рабочего персонала при выполнении краткосрочных технологических операций.

6. Рассчитывается максимально допустимое время нахождения рабочих в зоне воздействия СВЧ установки в течение рабочей смены.

Таблица 4.2 и Рисунок 4.5 демонстрируют средние значения плотности потока энергии в пространстве для исследуемой экспериментальной СВЧ установки.

Таблица 4.2 – Средние значения ППЭ в зависимости от расстояния до СВЧ установки, при значении $Y = 0$ см

Показания измерителя ППЭ, мкВт/см^2	Значения координаты X , см								
	30	40	50	60	70	80	90	100	110
$Z = 0$ см	4880	3900	2120	1600	540	410	160	140	110
$Z = 15$ см	5150	4940	3390	2500	1730	1300	1180	690	610
$Z = 30$ см	5510	4980	4260	2950	1710	1320	1080	910	770

Анализ данных, представленных на Рисунке 4.5, демонстрирует, что безопасное расстояние от СВЧ установки в условиях эксперимента, при котором предельно допустимые значения ППЭ электромагнитного поля не превышают установленной нормы 1000 мкВт/см^2 , составляет примерно 1 м.

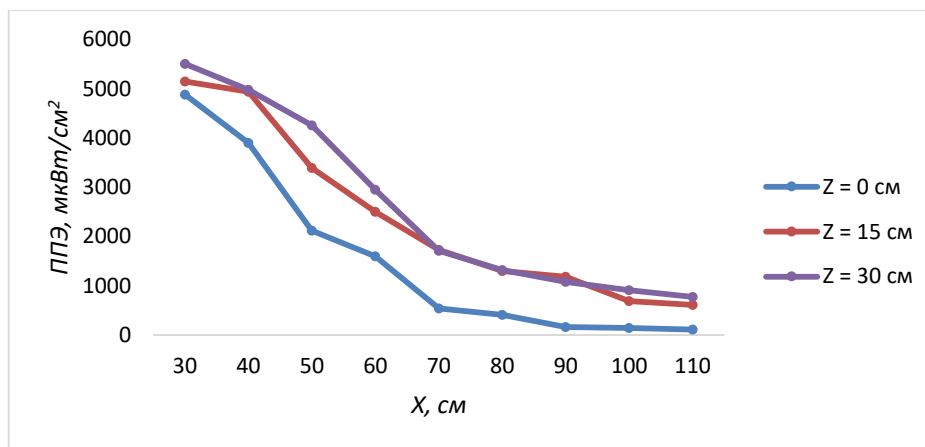


Рисунок 4.5 – Взаимосвязь между величиной уровня ППЭ и удаленностью от источника СВЧ излучения при различном значении координаты Z

Используя значения плотности потока энергии из таблицы 4.2 и формулу (4.1), определено максимальное время пребывания рабочего вблизи установки (T). При предельной энергетической экспозиции $ЭЭ=200 \text{ мкВт/см}^2 \cdot \text{ч}$, рассчитанные значения T приведены в таблице 4.3. Например, на расстоянии 50 см от установки, максимальное время кратковременного пребывания рабочего составляет 3 мин.

Таблица 4.3 Расчетное максимальное время (T) пребывания рабочего в зоне действия СВЧ установки в зависимости от расстояния

$X, \text{ см}$	30	40	50	60	70	80	90	100	110
$T, \text{ мин}$	2	2	3	4	7	9	11	13	16

Для СВЧ систем разной мощности, применяемых для нагрева герметизирующего материала деформационных швов цементобетонных покрытий, необходимо индивидуально определять безопасные расстояния и допустимое время пребывания персонала, руководствуясь разработанной экспериментальной методикой. Эта методика позволяет установить безопасную зону вокруг установки, которая соответствует нормам СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» [126].

4.4 Техничко-экономическое обоснование применения способа профилактики преждевременного разрушения деформационных швов цементобетонных покрытий с использованием СВЧ нагрева

В соответствии с применяемой методикой, экономическая обоснованность внедрения новых технических разработок, изобретений и рационализаторских предложений основывается на оценке их экономического эффекта, который рассчитывается для годового объема выпуска новой продукции в определенный расчетный год. Этот год обычно наступает после завершения запланированного периода на освоение производства, чаще всего это второй или третий год после начала массового производства продукции или применения новой технологии. Для изобретений и рационализаторских предложений расчетный год для определения годового экономического эффекта – это первый год их фактического использования.

Годовой экономический эффект от внедрения новой техники заключается в совокупной экономии производственных ресурсов – труда, материалов и инвестиций. Полученная за счет производства и применения новой техники экономия, напрямую способствует увеличению национального дохода.

Определение годового экономического эффекта осуществляется путем сопоставления общей стоимости использования базовой и новой техники. Эта общая стоимость, или приведенные затраты, складывается из текущих расходов на производство (себестоимости) и нормативной прибыли. Расчет приведенных затрат (З) осуществляется по формуле:

$$З = С + E_n \times K, \quad (4.2)$$

где: З – приведенные затраты на единицу продукции или работы, руб.; С – себестоимость единицы продукции или работы, руб.; К – размер удельных капитальных вложений в производственные активы, руб.; E_n – нормативный коэффициент, оценивающий эффективность капитальных вложений.

Для обеспечения эффективной оценки экономической выгоды от внедрения новой технологии на уровне всего национального хозяйства и учитывая, что

запуск ее производства потребует дополнительных ресурсов, в экономических расчетах применяется стандартизированный коэффициент экономической эффективности инвестиций, установленный на уровне 0,15.

Когда исследуется годовой экономический эффект, важно обеспечить сопоставимость сравниваемых вариантов новой и базовой техники по следующим характеристикам:

- объему выпускаемой продукции, создаваемой с применением новой техники (технологии);
- качественным показателям;
- фактору времени;
- социальным факторам производства и использования продукции, включая влияние на условия труда, безопасность, здоровье населения и состояние окружающей среды.

Определение стоимости текущих и капитальных ремонтов аэродромных или дорожных покрытий производят в соответствии с номенклатурой и объемом ремонтно-строительных работ. Например, ремонт цементобетонного покрытия может включать в себя замену разрушенных участков плит, устранение сколов кромок плит, герметизацию деформационных швов, консервацию сквозных трещин и т.д. [127].

В настоящее время используют различные методы для расчета сметной стоимости работ. Наиболее распространенными являются базисно-индексный и ресурсный методы. На примере цементобетонного аэродромного покрытия рассчитаем годовой экономический эффект по предлагаемой в настоящем исследовании технологии ремонта швов покрытия по следующим исходным данным:

1. Годовой объем работ по ремонту швов в расчете на покрытие из цементобетона размером 2500х45 м – 33 565 м шва.
2. Оптовая цена 1 т битумной мастики – 12 960 руб.
3. Инвентарно-расчетная стоимость машины для нагрева швов – 900 000 руб.

4. Годовая производительность машины – 63 тыс. м шва.

5. Расход основных материалов и размер прямых затрат при классической технологии ремонта швов покрытия толщиной 20 см на 1000 м² (согласно ГЭСН и ФЕР 31-2001 часть 31 «Аэродромы», таблица 31-01-058-01, с переходом в текущий уровень цен для Воронежской области) [128, 129, 130]:

расход битумной мастики – 0,07 т;

основная заработная плата рабочих-строителей – 1646 руб.;

основная заработная плата машинистов – 1268 руб.;

затраты труда рабочих-строителей – 6,04 чел./ч;

затраты труда машинистов – 3,86 чел./ч;

затраты на эксплуатацию заливщика швов – 6 300 руб.

6. Расход основных материалов и размер прямых затрат при предлагаемой технологии ремонта швов* покрытия толщиной 20 см на 1000 м²:

основная заработная плата машинистов – 1268 руб.;

затраты труда машинистов – 3,86 чел.-ч;

затраты на эксплуатацию установки для нагрева швов – 8 260 руб.

*Примечание: предполагается отсутствие использования рабочих-строителей и материалов при применении предлагаемой технологии нагрева швов. Затраты труда машинистов и их зарплата взяты по аналогии с традиционной технологией, стоимость эксплуатации установки рассчитана по Методике определения сметных цен на эксплуатацию машин и механизмов по формуле в ценах на текущий период:

$$C_{\text{маш}} = A_{\text{см}} + P + Э + C + Г + П, \quad (4.3)$$

где: $A_{\text{см}}$ – затраты на амортизационные отчисления на полное восстановление машин и механизмов за период их эксплуатации, руб./маш.-ч; P – затраты на выполнение текущего и капитального ремонта, технического обслуживания, диагностирования машин и механизмов, на замену быстроизнашивающихся частей, руб./маш.-ч; $Э$ – затраты на энергоносители, руб./маш.-ч; C – затраты на смазочные материалы, руб./маш.-ч; $Г$ – затраты на гидравлическую жидкость,

руб./маш.-ч; П – затраты на перебазировку машин и механизмов, включая затраты на монтаж, демонтаж и выполнение погрузочно-разгрузочных операций (при наличии).

1. Расчет удельных капитальных затрат:

$$K1 = 0 \text{ руб.};$$

$$K2 = Ц / Пр = 900\,000 / 63\,000 = 1\,428 \text{ руб./100 м шва.}$$

2. Определение размера приведенных затрат по технике:

$$З_{пр1} = 10\,121 \text{ руб. / 100 м шва};$$

$$З_{пр2} = 9\,528 + 0,12 \times 1\,428 = 9\,699 \text{ руб. / 100 м шва.}$$

$$\Xi = 335,65 \times (10\,121 - 9\,528) = 199\,040 \text{ руб.}$$

Согласно расчетам, экономический эффект от внедрения предлагаемого способа термообработки деформационных швов жесткого аэродромного покрытия составит 199 040 руб. (Таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Сравнительные показатели затрат по стандартной и предлагаемой методикам ремонта деформационных швов

Наименование затрат	Ед. измерения	Удельные затраты на ремонт 100 м шва		Экономия + Перерасход –	
		по традиционной технологии	по предлагаемой технологии	на 100 м шва	на годовой объем работ
Прямые затраты:					
– материалы	руб.	0,07x12960=907	–	+907	+304 434,55
– эксплуатация машин	руб.	6 300	8260	-1 960	-657 874
– основная заработная плата рабочих-строителей	руб.	1 646	–	+1 646	+552 479,90
– заработная плата машинистов	руб.	1 268	1 268	0	0
Итого:	руб.	10 121	9 528	+593	+199 040,45

Таким образом, применение предложенной технологии профилактического ремонта деформационных швов цементобетонных покрытий позволит увеличить межремонтные сроки, тем самым сокращая затраты на проведение капитального ремонта покрытия.

4.5 Выводы

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

2. 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.

3. 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 установки на расстоянии 50 см не должен превышать 3 минуты.

4. Обоснована экономическая эффективность применения разработанного способа профилактической СВЧ обработки деформационных швов цементобетонных покрытий. Годовой экономический эффект от внедрения предлагаемого способа термообработки деформационных швов на примере аэродромного цементобетонного покрытия применительно к СВЧ установке мощностью 50 КВт оценивается в 199 040 руб. в сравнении с традиционной технологией ремонта деформационных цементобетонных покрытий.

Заключение

В диссертационной работе представлены результаты экспериментального и теоретического исследования процессов нестационарного теплообмена при СВЧ нагреве двух- и трехслойных деформационных швов цементобетонных покрытий.

Основные результаты работы заключаются в следующем.

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 квадратичная 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.

Список сокращений и условных обозначений

T – температура, K ;

t – время, c ;

x, y, z – декартовы координаты, m ;

ρ – плотность, kg/m^3 ;

c_p – удельная теплоёмкость диэлектрика при постоянном давлении, $Dж/(kg\ K)$;

λ – коэффициент теплопроводности, $Вт/(м\ K)$;

I_{mw} – удельная поглощенная мощность СВЧ излучения, $Вт/м^3$;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды;

$tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь;

f – частота излучения, $Гц$;

E – напряженность электрического поля, $В/м$;

ε_0 – электрическая постоянная, $Ф/м$;

D – показатель поглощения, $м^{-1}$;

E_0 – напряженность электрического поля на поверхности облучаемого материала, $В/м$;

λ_{mw} – длина электромагнитной волны, $м$;

$T_{\infty}^{(1)}, T_{\infty}^{(2)}$ – средняя температура бетонных плит вблизи боковых поверхностей шва и под деформационным швом, K ;

α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи, $Вт/(м^2\ K)$;

σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана $Вт/(м^2\ K^4)$;

T_c – температура воздуха, K ;

α_c – коэффициент конвективной теплоотдачи, $Вт/(м^2\ K)$;

ε_c – степень черноты материала шва;

V – скорость, $м/с$;

\tilde{E} – комплексная амплитуда вектора напряженности электрического поля, $В/м$;

r – радиус вектор точки пространства, $м$;

γ – комплексный коэффициент распространения;

ε_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость;

μ_a – абсолютная магнитная проницаемость;

μ – относительная магнитная проницаемость среды;

β – коэффициент фазы (волновое число), rad/m ;

α – коэффициент затухания m^{-1} ;

ω – круговая частота, s^{-1} ;

ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, F/m ;

μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, Hn/m ;

σ – удельная проводимость, Cm/m ;

δ_m – угол магнитных потерь;

Δ – дифференциальный оператор Лапласа;

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, m ;

λ_0 – длина волны генератора, m ;

$(\lambda_{кр})_{H10}=2a$ – критическая длина волны в прямоугольном волноводе, m ;

n – вектор внешней нормали к поверхности;

∇ – вектор «набла»;

a_p – размер раскрыва в H -плоскости, m ;

L – длина образующей рупора, m ;

R – длина рупора, m ;

$2\Phi_0$ – угол раскрыва рупора;

dv – длина волновода рупора, m .

Список литературы

1. Строительство цементобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов. Методические рекомендации. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. Федеральное автономное учреждение «Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве», Москва, 2018. – 122 с.,

2. Пособие по проектированию аэродромных покрытий. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. Федеральное автономное учреждение «Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве», Москва, 2020. – 116 с.

3. СТО СРО «СОЮЗДОРСТРОЙ» СТО 017 НОСТРОЙ 2.25.220 - 2018 (СТО 60452903 СОЮЗДОРСТРОЙ 2.1.1.3.3.2.01 - 2018) «Автомобильные дороги. Устройство и капитальный ремонт монолитных цементобетонных покрытий. Правила, контроль выполнения и требования к результатам работ» : издание официальное : утвержден и введен в действие Решением Совета СРО «СОЮЗДОРСТРОЙ» от 20 февраля 2018 г., протокол № 7 – Москва : «СОЮЗДОРСТРОЙ», 2018. – 100 с.

4. ГОСТ 30740-2000 Материалы герметизирующие для швов аэродромных покрытий : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Госстроя России от 4 июля 2001 года № 67 : дата введения 2002-01-01 – Москва : Госстрой России, ГУП ЦПП, 2001. – 22 с.

5. Межгосударственный стандарт ГОСТ 32872-2014 "Дороги автомобильные общего пользования. Герметики битумные. Технические требования" (введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 февраля 2015 г. N 113-ст). Automobile roads of general use. Bituminous sealants. Technical requirements. Дата введения 2015-07-01 – Москва : Стандартинформ, 2015. – 8 с.

6. СП 491.1325800.2020. Аэродромы. Правила обследования технического состояния. – Минстрой России, 2019. – 61 с.

7. Седергрэн Г.Р. Дренаж дорожных одежд и аэродромных покрытий / Г. Р. Седергрэн; Пер. с англ. Н. Г. Савуси, Э. Я. Филипповой. – М.: Транспорт, 1981. 279 с.

8. Кульчицкий В.А. и др. Аэродромные покрытия. Современный взгляд. – М.: Физико-математическая литература, 2002. 528 с.

9. Каримова, А.А., Парамонова, М.И. Разрушения и ремонт искусственных покрытий взлетно-посадочных полос // Alfabuild. 2019 № 2(9). С. 17-28.

10. Суладзе, М. Д. О классификации дефектов покрытий аэродромов жесткого типа / М. Д. Суладзе, В. К. Федулов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2013. – № 4(35). – С. 89а-93.

11. Соболев Е.Е., Бураков А.В., Сопец В.В. Анализ дефектов деформационных швов жестких аэродромных покрытий // Актуальные вопросы науки и техники. / Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. № 6, г. Самара, – НН: ИЦРОН, 2019. 63 с. – С. 40-43.

12. Глушков Г.И., Бабков В.Ф., Тригони В.Е. и др. Жесткие покрытия аэродромов и автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1994. 349 с.,

13. Филимонова О.Н., Енютина М.В., Никулин С.С., Костылева Л.Н. Оценка состояния аэродромных покрытий и анализ материалов для их упрочнения «Воздушно-космические силы. Теория и практика» № 2, июнь 2017 С. 61-75.

14. Терегулова Э.Р. Перспективы применения жестких дорожных одежд при строительстве автомобильных дорог и аэродромов, и проблемы их конструирования и расчета. Известия КГАСУ. – Казань. – 2011. – № 4 (22). – 420 с. – С. 389-396.

15. ОДМ 218.3.036-2013. Рекомендации по технологии санации трещин и швов в эксплуатируемых дорожных покрытиях. Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), Москва, 2013. – 59 с.

16. ОДМ 218.3.028–2013. Методические рекомендации по ремонту и содержанию цементобетонных покрытий автомобильных дорог. Федеральное дорожное агентство (Росавтодор). Москва, 2015, 56 с.

17. СТО ФГУП «АГА(А)» 4.4 - 2021 Аэродромы гражданские. Покрытия аэродромные цементобетонные. Восстановление работоспособности. Указания по ремонту деформационных швов. Федеральное государственное унитарное предприятие «Администрация гражданских аэропортов (аэродромов)». Москва, 2021, 25 с.

18. Диденко А.Н. СВЧ-энергетика: Теория и практика. – М.: Наука, 2003. – 446 с.

19. Карпенко Ю.В., Нефедов В.Н. СВЧ-разогреватели асфальтобетонных покрытий // Автомобильные дороги. 1996. № 5. С. 44–57.

20. Ю.В. Карпенко, В.Н. Нефедов. Машины для СВЧ разогрева асфальтобетонных покрытий. Автомобильные дороги, № 1, 1997. Информавтодор. Обзорная информация.

21. Поляков Д.Н. Сверхвысокочастотный нагрев асфальтобетонных покрытий / Д.Н. Поляков. Б.С Суриков // Наука и техника в дорожной отрасли. – 1997. – №2. – С. 28–29.

22. Maliszewski M, Zofka A, Maliszewska D, Sybilski D, Salski B, Karpisz T, Rembelski R. Full-Scale Use of Microwave Heating in Construction of Longitudinal Joints and Crack Healing in Asphalt Pavements. Materials (Basel). 2021 Sep 8;14(18):5159. doi: 10.3390/ma14185159.

23. Алиев А.М. Основы регенерации асфальтобетона: дис. ... док. техн. наук. Баку, 1981. 336 с.

24. Лупанов А.П., Силкин В.В., Пашкин В.К. Регенерация старого асфальтобетона на АБЗ. Учебное пособие. Москва - Иркутск: 1998 - 36 с.

25. Бурминский Н. И. Баранова Е. М. Перспективы использования СВЧ технологии для приготовления дорожных битумов // Изв. вузов. Строительство. 1999. № 2–3. С. 114–115.

26. Тригорлый С.В., Чудров А.А. Моделирование СВЧ-размораживания грунта. Вопросы электротехнологии. № 1(38)/2023, с. 14–21.

27. Андреев С.А., Уманский П.М. Новая технология СВЧ-обработки почвы // Природообустройство. – 2018. – № 4. – С. 111-116. DOI:10.26897/1997-6011/2018-4-111-116.

28. Нефедов В.Н., Сайгин И.А., Хохлов М.Е., Рябикина И.Г. Перспективы применения наукоёмких микроволновых технологий // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2017. – Том 11. – № 6. – С. 33–37.

29. Долгополов Н.Н. Электрофизические методы в технологии строительных материалов / Н.Н. Долгополов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Стройиздат, 1971. 240 с.

30. Патент РФ № 2100519 от 13.02.96. Устройство для нагрева асфальтобетонного дорожного покрытия. / Валеев Г.Г., Карпенко Ю.В., Нефедов В.Н. Оpubл. 27.12.97. Бюл. № 36.

31. Патент РФ № 152448 U1 от 30.09.2014. Агрегат для обработки поверхностей электромагнитным СВЧ полем. / Егоров Ю.М., Сербин В.В., Эльдарханов А.С. Оpubл. 27.05.2015 Бюл. № 15.

32. Pat. 1600259 US. Microwave method and apparatus for reprocessing pavements / Morris Richard Jeppson. – Application № 53218/77; Filed 21.12.77; Complete Specification published 14.10.81

33. Сайт МИЭМ НИУ ВШЭ Режим доступа: <https://miem.hse.ru/edu/ee/council/mwtech>

34. Сайт компании Криамид. URL: <http://criamid.ru/reclama/asfalt.php>

35. Сайт компании Hunan New Timehope Construction Machinery Co. Ltd / https://zhangyu1981.en.ec21.com/TWB81_Aspphalt_Road_Microwave_Maintenance--9524642_9524694.html.

36. Chen, Xiao & Wang, Hao & Jiang, Baiyu & Venkiteela, Giri. (2022). Evaluation of Microwave Heating for Potential Applications in Hot In-Place Recycling of Asphalt Pavement. Transportation Research Record: Journal of the Transportation

Research Board. 2676. 036119812210866. 10.1177/03611981221086635 Том 2676, выпуск 9, сентябрь 2022 г. стр. 256-268.

37. Никулин, Ю.Я. Установка обезвоживания битума в потоке./ Ю.Я. Никулин, Н.В. Кузнецов // Новости в дорожном деле. - 2005. - №1. - С. 11-12.

38. Пат. 2186168 Российская Федерация, МПК⁷, E01C 19/08. Способ низкотемпературной обработки битума / Никулин Ю.Я., Кузнецов Н.В.; Заявитель и патентообладатель: Ростовский гос. строит, университет. №2000115507/3; заявл. 14.06.2000; опубл. 27. 07 2002, Бюл. №19.-3 с: ил.

39. Qiu, J., van de Ven, M., Wu, S. et al. Evaluating Self Healing Capability of Bituminous Mastics // *Experimental Mechanics*. – 2012. – Vol. 52. – P. 1163–1171. <https://doi.org/10.1007/s11340-011-9573-1>.

40. Maliszewski M, Zofka A, Maliszewska D, Sybilski D, Salski B, Karpisz T, Rembelski R. Full-Scale Use of Microwave Heating in Construction of Longitudinal Joints and Crack Healing in Asphalt Pavements // *Materials (Basel)*. – 2021. - Sep 8;14(18):5159. DOI: 10.3390/ma14185159.

41. Zhang L, Zhang Z, Yu W, Miao Y. Review of the Application of Microwave Heating Technology in Asphalt Pavement Self-Healing and De-icing. *Polymers (Basel)*. 2023 Mar 29;15(7):1696. doi: 10.3390/polym15071696.

42. Haikal Mohd Ghazali, M.F., Mohd Hasan, M.R., Seman, A.A., Dorett, D.D., Mukhtar, N., & Jaya, R.P. (2021). A Review of Asphaltic Crack Healing Approaches and Its Mechanism. *Advances in Materials Science and Engineering*

43. Norambuena-Contreras, J.; Garcia, A. Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating. *Mater. Des.* 2016, 106, 404–414.

44. Sun Y.; Liu Q.; Wu S.; Shang F. Microwave heating of Steel slag asphalt mixture. *Key Eng. Mater.* 2014, 599, 193–197.

45. Norambuena-Contreras J.; Concha J.L. Self-healing of asphalt mixtures via microwave heating. In *Proceedings of the 13th International Conference on Asphalt Pavements, ISAP2016, Jackson Hole, WY, USA, 18–21 July 2016*.

46. Gallego J.; Del Val Miguel A.; Contreras V.; Paez A. Heating asphalt concrete with microwaves to promote self-healing. *Constr. Build. Mater.* 2013, 42, 1–4.

47. Ядыкина В. В. Повышение качества дорожных битумов [Электронный ресурс] / В. В. Ядыкина, А. Е. Акимов // Материалы докладов X международной конференции «Новые технологии и материалы» - Брянск -Режим доступа: www.science-bsea.bgita.ru. – 2009. (дата обращения 14.11.2022).

48. Акимов А. Е. Улучшение свойств битумов методом СВЧ-обработки [Электронный ресурс] /А. Е. Акимов, Н. В. Чемаркина// Международная научно-техническая конференция молодых учёных БГТУ им. В. Г. Шухова - Белгород: изд-во БГТУ, 2009. (дата обращения 14.11.2022).

49. Акимов А. Е., Ядыкина В. В., Гридчин А.М. Применение токов СВЧ для повышения характеристик дорожных битумов // Строит. материалы. 2010. № 1. С. 12–16.

50. Вендриховски В.А. Влияние радиоволн на сцепление битума с каменными материалами / В.А. Вендриховски // Строительные материалы. - 1995. -№ 8. – С. 29-30.

51. Сюиньи Г.К., Регенированный дорожный асфальтобетон / Г.К. Сюиньи, К.Х. Усманов, Э.С Файнберг. -М.: Транспорт, 1984. – 118 с.

52. Якименко СВ. Повышение качества асфальтобетонных смесей / СВ. Якименко //Автомобильные дороги. – 1988. - № 7. – С. 14–18.

53. Григорьев А.Д. Электродинамика и микроволновая техника. Санкт-Петербург: Лань, 2007. 704 с.

54. Архангельский Ю.С. Сверхвысокочастотная электротехнология. Саратовская школа электротехнологов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 4. № 3(61). С. 5–15.

55. Гавриленков А.М., Казарцев Д.А., Емельянов А.Б. Оценка энергоэффективности конвективной сушки при дополнительном СВЧ-нагреве материала // Тепловые процессы в технике. 2016. Т. 8. № 10. С. 466–471.

56. Захаров В. В., Янкин С. С., Тригорлый С. В. Численное моделирование процессов СВЧ термообработки диэлектриков большой площади с применением СВЧ установок методического действия // Вопросы электротехнологии. 2018. № 3(20). С. 36-41.

57. Юдина В.О., Захаров В.В., Тригорлый С.В., Архангельский Ю.С. СВЧ термообработка диэлектриков с большими поверхностями в методическом режиме. Вопросы электротехнологии. № 3(24)/2019, с. 6–13.

58. Михайловский К.В., Резник С.В. Прогнозирование температурных режимов процесса отверждения связующего при получении деталей из полимерных композиционных материалов с помощью микроволнового излучения // Тепловые процессы в технике. 2014. Т. 6. № 8. С. 363–368.

59. Лапочкин М.С., Морозов О.Г. Повышение эффективности таяния снежно-ледяной массы при комбинированном энергетическом воздействии микроволнового и ультразвукового полей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 1–3. С. 894–899.

60. Комаров В.В. Формулировки математических моделей процессов взаимодействия электромагнитных волн с диссипативными средами в СВЧ-нагревательных системах // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13. № 4. С. 57–63.

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

62. Lakzian E., Parsian A., Lakzian K. Numerical simulation of melting ice around a floating by microwaves // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 52. No. 3. P. 429–436. DOI: 10.1007/s00231-015-1567-6 11.

63. Гришина Е.М., Архангельский Ю.С. Математическое моделирование термообработки в камерах лучевого типа СВЧ электротермических установок // Вопросы электротехнологии. 2015. № 1(6). С. 5-9.

64. Samanta S.K., Basak T., Sengupta B. Theoretical analysis on microwave heating of oil–water emulsions supported on ceramic, metallic or composite plates // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2008. Vol. 51. No. 25–26. P. 6136–6156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.04.003>.

65. Саитов Р.И., Хасанова А.Ф., Абдеев Р.Г. и др. Математическая модель процесса электромагнитного нагрева многофазного многокомпонентного пласта тяжелой нефти // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2018. Т. 29. № 4(92). С. 73–79.

66. Резник С.В., Румянцев С.А. Математическое моделирование температурного состояния цилиндрических заготовок из полимерных композиционных материалов при СВЧ нагреве // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 1. С. 6–21. DOI: 10.7463/0114.0658448.

67. Rattanadecho P., Klinbun W. Theoretical Analysis of Microwave Heating of Dielectric Materials Filled in a Rectangular Waveguide With Various Resonator Distances // Journal of Heat Transfer. 2011. Vol. 133. No. 3. Article 031008. DOI:10.1115/1.4002628.

68. Сысоев С. М., Алексеев М. М. Численное моделирование нагрева нефтесодержащего пласта сверхвысокочастотным электромагнитным излучением // Вестник кибернетики. – 2019. - № 4 (36). – С. 6 –16.

69. Grinchik N.N., Akulich P.V., Adamovich A.L. et al. Modeling of nonisothermal heat and moisture transfer in capillary-porous media in periodic microwave heating // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2007. Vol. 80. No. 1. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.1007/s10891-007-0001-4>.

70. Сайфутдинова А.А., Тимеркаев Б.А., Сайфутдинов А.И. Численное моделирование поверхностного барьерного разряда в воздухе // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 19–24 августа 2019 г.): сборник трудов. В 4 т. Т. 2. Уфа: Башкирский государственный университет, 2019. С. 877–879.

71. Hossan M.R., Dutta P. Effects of temperature dependent properties in electromagnetic heating // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2012. Vol. 55. No. 13–14. P. 3412–3422. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.02.072>.

72. Рудобашта С.П. Математическое моделирование процессов электромагнитного нагрева строительных материалов // Умные композиты в строительстве. 2021. Т. 2. № 3. С. 46–57. DOI: 10.52957/27821919_2021_3_46

73. Oloumi D., Rambabu K. Microwave heating of heavy oil reservoirs: A critical analysis // Microwave and Optical Technology Letters. 2016. Vol. 58. No. 4. P. 809–813. DOI: <https://doi.org/10.1002/mop.29670>.

74. Справочная книга по СВЧ-электротермии / Ю.С. Архангельский. - Саратов: ООО «Науч. кн.», 2011. - 559 с.

75. Лыков А.В. Тепломассообмен: (Справочник). - М.: Энергия, 1978. 480 с.

76. Нетушил А.В., Жуховицкий Б.Я, Кудин В.Н., Парини Е.П. Высокочастотный нагрев диэлектриков и проводников - М.: Госэнергоиздат, 1959. 480 с.

77. Брунов Б.Я., Гольденберг Л.М., Кляцкин И.Г., Цейтлин Л.А. Теория электромагнитного поля. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. 511 с.

78. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов. – М.: Энергия, 1973. 328 с.

79. Введение в COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс]. Режим доступа :https://cdn.comsol.com/doc/5.4/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru_RU.pdf. Дата обращения 23.06.2023.

80. 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: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)", 2021. – С. 103-105. – DOI 10.37816/eeste-2021-1-103-105.

81. 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.

82. Морозов О., Каргин А., Савенко Г., Требух В., Воробьев И. Промышленное применение СВЧ-нагрева // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2010. № 3. С. 2-6.

83. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. В 2 томах. Том 1. Техника сверхвысоких частот. – М.: Высшая школа, 1970. 440 с.

84. Конструирование экранов и СВЧ-устройств: Учебник для вузов / А.М. Чернушенко, Б. В. Петров, Л. Г. Малорацкий и др.; Под ред. А. М. Чернушенко. — М.; Радио и связь, 1990.— 352 с: ил.

85. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ: Учеб. для радиотехнич. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1988. – 432 с: ил.

86. Каталог продукции : официальный интернет-магазин : сайт / «Hti» – Китай, 2024. – URL: <https://www.hti-meter.com/en/h-pd-204.html>. (дата обращения: 27.10.2023).

87. Каталог продукции : официальный интернет-магазин : сайт / S-Line. – Воронеж, 2024. – URL: <https://s-line.ru/catalog/shchupyidatchiki/23519/>. (дата обращения: 27.10.2023).

88. А.В. Аржанников, Т.Д. Ахметов, П.В. Калинин, К.И. Меклер, В.Д. Степанов «Стенд для исследований по СВЧ нагреву и превращению веществ» - Новосибирск : Институт ядерной физики, 2004. - 18 с. : ил. ; 20 см. - (Научно-исследовательское учреждение Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН ; ИЯФ 2004-2)

89. Экспериментальное исследование температурных параметров цементобетонного покрытия при СВЧ-нагреве деформационного шва / О.Р.

Дорняк, А.Б. Недоносков // Вестник ПГУ им. Шолом-Алейхема. 2023. № 1(50). С. 22-29.

90. Сидняев, Н. И. С34 Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных : учебник и практикум для вузов / Н. И. Сидняев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2019. – 495 с.

91. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений. М.: Наука, 1964. – 280 с.

92. РМГ 43-2001. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений» : рекомендации по межгосударственной стандартизации / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Минск, 2002. – 20 с.

93. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Высшая школа. 1992. 416 с.

94. Гринчик Н.Н., Бойправ О.В. Электродинамические и электрохимические процессы в неоднородных средах. – Минск : БГУ, 2022. 99 с.

95. Афанасьев С. А., Санников Д. Г. Введение в электродинамику СВЧ. – Ульяновск : УлГУ, 2012. – 60 с.

96. Винниченко А.А., Зайцев Н.А. Прозрачные граничные условия для волнового уравнения в квадратной области // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2009. № 80. 20 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2009-80>.

97. Софронов И. Л. Условия полной прозрачности для волнового уравнения // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. 1993. №76. 20 с.

98. ОДМ 218.2.061-2015 Рекомендации по определению теплофизических свойств дорожно-строительных материалов и грунтов : отраслевой дорожный методический документ : дата введения 2016-01-18 / Федеральное дорожное агентство регулированию. – Изд. официальное. – Москва : Росавтодор, 2015 – 73 с.

99. Karumudi, Rambabu & Semagina, Natalia & Lange, Carlos. (2016). Thermal kinetics analysis in microwave-assisted oil sands separation. The Canadian Journal of Chemical Engineering. 95. <https://doi.org/10.1002/cjce.22643>.

100. Ермолаев Д. В., Мингалеева Г. Р. Определение теплофизических и реологических характеристик природного битума при подготовке к газификации / Ермолаев Д. В., Мингалеева Г. Р. // Вестник технологического университета. – 2016. – Т.19, № 4. – С. 63-67.

101. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы : Учебник для вузов. – 7-е изд., перераб и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 304 с., ил.

102. Новый справочник химика и технолога [Текст]. - СПб.: Мир и семья: Профессионал. - (Сер. кн. для спец. "Профессионал"). Т.5 : Электродные процессы. Химическая кинетика и диффузия. Коллоидная химия / Р.Ш. Абиев, Е.Е. Бибик, Е.А. Власов и др.; Ред. С.А. Симанова. - 2004. - 838 с. : ил.

103. Беляева Т.А., Бобров А.П., Бобров П.П., Ивченко О.А., Кривальцевич С.В., Мандрыгина В.Н. Влияние гранулометрического состава, гумуса и зольных загрязнений на излучательные и диэлектрические характеристики почв в микроволновом диапазоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Т. 1. № 1. С. 333-339.

104. Макеева Т.Г., Егоров Ю.М. Диэлектрические свойства композитных материалов на основе цемента разного генезиса // Естественные и технические науки. М.: Спутник+, 2013, №6, с. 64-72.

105. Бернацкий, А. Ф. Электроизоляционный бетон (технология, свойства, конструкции): монография / А. Ф. Бернацкий; Новосиб. гос. ун-т архитектуры, дизайна и искусств. – Новосибирск, 2016. – 184 с.

106. 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.

107. 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.

108. 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.

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

110. 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.

111. Пурдин, М. С. Численное моделирование естественной аккумуляции теплоты в грунте при сезонном промерзании / М. С. Пурдин, А. Б. Горяев // Промышленная энергетика. – 2021. – № 7. – С. 34-42. – DOI 10.34831/EP.2021.14.68.005.

112. 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.

113. 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.

114. 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.] ; заявитель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования "Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина".

115. 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, Воронеж, 06–07 октября 2021 года. – Воронеж: Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение 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 Российской Федерации, 2021. – 113 с. – С. 64-67

116. 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.] ; заявитель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования "Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина".

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

118. Патент № 2783131 С9 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.] ; заявитель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования "Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина".

119. Ядыкина В.В., Акимов А.Е., Гридчин А.М. СВЧ-активация битумов как способ повышения физико-механических и эксплуатационных параметров асфальтобетона // Строительные материалы. 2010. № 5. С. 10-12).

120. Ерофеева К. Р., Морозов Д. В., Злобина И. В., Бекренев Н. В. // Меры безопасности при работе с СВЧ установками рупорного типа // Материалы 16-й Междунар. науч.-практ. конф. безопасности, Комсомольск-на-Амуре, 27 апреля 2018 г. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2018 – С. 199-202.

121. Григорьев О.А., Никитина В.Н., Носов В.Н., Пекин А.В., Алексеева В.А., Дубровская Е.Н. Электромагнитная безопасность населения. Национальные и международные нормативы электромагнитных полей радиочастотного диапазона // Здоровье населения и среда обитания. 2020. № 10 (331). С. 28–33. DOI: <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2020-331-10-28-33>.

122. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : издание официальное : утверждены и введены в действие постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 г. № 2 : дата введения 2021-03-01. – Москва : ЦЕНТРМАГ, 2023. – 736 с. С. 647-648.

123. СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах». С. 24-34.

124. ГОСТ Р 54148 – 2010 (ЕН 50366:2003). Воздействие на человека электромагнитных полей от бытовых и аналогичных электрических приборов. Методы оценки и измерений : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и

метрологии от 21 декабря 2010 г. № 903-ст : дата введения 2011-03-01. – Москва : Стандартиформ, 2019. – 26 с.

125. Каталог продукции : официальный интернет-магазин : сайт / S-Line. – Брянск, 2023. – URL: <https://s-line.ru/catalog/Priboryspetsialnogonaznacheniya/23204/> (дата обращения: 27.10.2023).

126. 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.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А. Н. Косыгина», 2024 – 254 с. С. 79-83.

127. Авсеенко А.А., Чутков А.А. Методические указания для определения стоимости ремонта аэродромных покрытий / МАДИ. – Москва. – 2010. – 57 с.

128. ГЭСН 81-02-31-2020 Сметные нормы на строительные работы / Сборник 31. Аэродромы. Утверждены приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 26 декабря 2019 г. № 871/пр. – Москва. – 2020. – 49 с.

129. Федеральные единичные расценки на строительные работы ФЕР 81-02-31-2001 часть 31 «Аэродромы» Утверждены приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 26 декабря 2019 г. № 876/пр. – Москва. – 2019. – 24 с.

130. Индексы изменения сметной стоимости по элементам прямых затрат по объектам строительства, определяемых с применением федеральных и территориальных единичных расценок, на I квартал 2023 года. Письмо Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30.01.2023 № 4125-ИФ/09. – Москва. – 2023. – 36 с.

Приложения

Приложение А

Статистическая обработка результатов исследований

Таблица А.1 – Расчеты погрешности измерений для датчика D1 (участок I)

Время, мин. (№ опыта)	Т, °С;			Математи ческое ожидание \overline{T}_j , °С	Дисперсия функции отклика, S_j^2	Средняя квадрати чная погрешно сть функции отклика, $S_{\overline{T}_j}$	Случайная абсолютная погрешность, Δ_j , °С	Случайная относительная погрешность, % $\Delta_j/\overline{T}_j \times 100$
	№ повторения							
	1	2	3					
0	21,4	21,4	21,6	21,5	0,01	0,07	0,3	1
1	23,6	25,3	25,5	24,8	1,09	0,60	2,6	10
2	26,0	29,1	29,7	28,3	3,94	1,15	4,9	17
3	29,0	32,8	32,9	31,6	4,94	1,30	5,5	17
4	32,1	36,6	35,9	34,9	5,86	1,40	6,0	17
5	34,9	40,2	38,9	38,0	7,63	1,60	6,9	18
6	37,9	43,6	41,7	41,1	8,42	1,70	7,2	18
7	40,6	46,8	44,8	44,1	10,01	1,80	7,9	18
8	43,3	49,9	48,4	47,2	11,97	2,00	8,6	18
9	45,8	52,5	51,6	50,0	13,22	2,10	9,0	18
10	48,1	54,8	53,8	52,2	13,06	2,09	9,0	17

Таблица А.2 – Расчеты погрешности измерений для датчика D2 (участок I)

Время, мин. (№ опыта)	Т, °С;			Математическое ожидание $\overline{T_j}$, °С	Дисперсия функции отклика, S_j^2	Средняя квадратичная погрешность функции отклика, $S_{\overline{T_j}}$	Случайная абсолютная погрешность , Δ_j , °С	Случайная относительная погрешность, % $\Delta_j/\overline{T_j} \times 100$
	№ повторения							
	1	2	3					
0	21,8	21,7	21,9	21,8	0,01	0,06	0,2	1
1	29,9	31,0	31,6	30,8	0,74	0,50	2,1	7
2	37,6	38,9	39,3	38,6	0,79	0,51	2,2	6
3	45,1	46,1	46,0	45,7	0,30	0,31	1,4	3
4	52,5	52,5	52,7	52,6	0,01	0,07	0,3	1
5	58,8	59,2	59,0	59,0	0,04	0,12	0,5	1
6	64,8	65,2	63,3	64,4	1,00	0,58	2,5	4
7	69,6	70,9	68,9	69,8	1,03	0,59	2,5	4
8	74,8	75,7	75,6	75,4	0,24	0,28	1,2	2
9	79,0	78,1	78,4	78,5	0,21	0,26	1,1	1

Таблица А.3 – Расчеты погрешности измерений для датчика D3 (участок I)

Время, мин. (№ опыта)	Т, °С;			Математическое ожидание \overline{T}_j , °С	Дисперсия функции отклика, S_j^2	Средняя квадратичная погрешность функции отклика, $S_{\overline{T}_j}$	Случайная абсолютная погрешность, Δ_j , °С	Случайная относительная погрешность, % $\Delta_j/\overline{T}_j \times 100$
	№ повторения							
	1	2	3					
0	21,9	21,9	22,0	21,9	0,003	0,03	0,1	1
1	26,2	27,0	27,3	26,8	0,32	0,33	1,4	5
2	31,7	32,8	33,0	32,5	0,49	0,40	1,7	5
3	38,5	38,7	38,9	38,7	0,04	0,12	0,5	1
4	45,4	44,4	44,6	44,8	0,28	0,30	1,3	3
5	51,8	50,3	50,8	51,0	0,58	0,44	1,9	4
6	58,2	55,5	54,8	56,2	3,22	1,04	4,5	8
7	64,2	60,8	61,6	62,2	3,16	1,03	4,4	7
8	69,8	65,8	66,9	67,5	4,27	1,19	5,1	8
9	74,9	70,0	71,8	72,2	6,14	1,43	6,2	9
10	79,2	73,6	74,7	75,8	8,80	1,71	7,4	10

Таблица А.4 – Расчеты погрешности измерений для датчика D4 (участок I)

Время, мин. (№ опыта)	Т, °С;			Математи ческое ожидание \overline{T}_j , °С	Дисперсия функции отклика, S_j^2	Средняя квадрати чная погрешно сть функции отклика, $S_{\overline{T}_j}$	Случайная абсолютная погрешность, Δ_j , °С	Случайная относительная погрешность, % $\Delta_j / \overline{T}_j \times 100$
	№ повторения							
	1	2	3					
0	21,9	22,1	22,2	22,1	0,02	0,088	0,4	2
1	24,2	24,9	25,1	24,7	0,22	0,27	1,2	5
2	30,0	30,4	30,6	30,3	0,09	0,18	0,8	3
3	39,9	38,2	38,8	39,0	0,74	0,50	2,1	5
4	49,8	46,2	47,1	47,7	3,51	1,08	4,7	10
5	58,6	54,3	55,7	56,2	4,81	1,27	5,4	10
6	69,3	62,0	62,0	64,4	17,76	2,43	10,5	16
7	78,6	70,0	71,5	73,4	21,10	2,65	11,4	16
8	86,6	77,7	79,7	81,3	21,80	2,70	11,6	14
9	93,9	85,8	88,7	89,5	16,84	2,37	10,2	11
10	100,4	91,6	96,4	96,1	19,41	2,54	10,9	11

Таблица А.5 – Расчеты погрешности измерений для датчика D1 (участок II)

Время, мин. (№ опыта)	Т, °С;			Математи ческое ожидание \overline{T}_j ,°C	Дисперсия функции отклика, S_j^2	Средняя квадрати чная погрешно сть функции отклика, $S_{\overline{T}_j}$	Случайная абсолютная погрешность, Δj ,°C	Случайная относительная погрешность, % $\Delta j / \overline{T}_j \times 100$
	№ повторения							
	1	2	3					
0	21,6	20,3	21,3	21,1	0,46	0,39	1,7	8
1	22,8	23,8	23,9	23,5	0,37	0,35	1,5	6
2	25,1	25,9	26	25,7	0,24	0,28	1,2	5
3	27,1	28,2	28,5	27,9	0,54	0,42	1,8	7
4	28,8	30,7	30,9	30,1	1,34	0,67	2,9	10
5	30,9	33,6	32,8	32,4	1,92	0,80	3,4	11
6	32,7	35,9	36	34,9	3,52	1,08	4,7	13
7	34,4	38	38,3	36,9	4,71	1,25	5,4	15
8	36,2	40,2	40,6	39,0	5,92	1,40	6,0	15
9	38,1	42,2	42,5	40,9	6,04	1,42	6,1	15
10	42,1	44,4	44,6	43,7	1,93	0,80	3,4	8

Таблица А.6 – Расчеты погрешности измерений для датчика D2 (участок II)

Время, мин. (№ опыта)	Т, °С;			Математи ческое ожидание \overline{T}_j ,°С	Дисперсия функции отклика, S_j^2	Средняя квадрати чная погрешно сть функции отклика, $S_{\overline{T}_j}$	Случайная абсолютная погрешность, Δj ,°С	Случайная относительная погрешность, % $\Delta j / \overline{T}_j \times 100$
	№ повторения							
	1	2	3					
0	22,7	21,8	22,4	22,3	0,21	0,26	1,1	5
1	31	32,1	32,4	31,8	0,54	0,42	1,8	6
2	36,6	38,5	38,7	37,9	1,34	0,67	2,9	8
3	41,6	44	43,8	43,1	1,77	0,77	3,3	8
4	45,6	49	48,7	47,8	3,54	1,09	4,7	10
5	49,2	53	52,9	51,7	4,69	1,25	5,4	10
6	53,3	56,2	55,8	55,1	2,47	0,91	3,9	7
7	57,2	59,8	59,9	59,0	2,34	0,88	3,8	6
8	60,3	62,6	63,1	62,0	2,23	0,86	3,7	6
9	63,1	66,2	67	65,4	4,24	1,19	5,1	8
10	68,5	67,9	68,3	68,2	0,09	0,18	0,8	1

Таблица А.7 – Расчеты погрешности измерений для датчика D3 (участок II)

Время, мин. (№ опыта)	Т, °С;			Математи ческое ожидание \overline{T}_j ,°C	Дисперсия функции отклика, S_j^2	Средняя квадрати чная погрешно сть функции отклика, $S_{\overline{T}_j}$	Случайная абсолютная погрешность, Δj ,°C	Случайная относительная погрешность, % $\Delta j / \overline{T}_j \times 100$
	№ повторения							
	1	2	3					
0	22,9	21,5	22,5	22,3	0,52	0,42	1,8	8
1	24,6	25,1	25,7	25,1	0,30	0,32	1,4	5
2	31,5	30,4	30,8	30,9	0,31	0,322	1,4	4
3	37,2	37,1	37,4	37,2	0,02	0,09	0,4	1
4	42,9	44,4	44,6	44,0	0,86	0,54	2,3	5
5	48,6	52,1	52,4	51,0	4,46	1,22	5,2	10
6	53,5	59,1	60,2	57,6	12,91	2,07	8,9	15
7	58,4	64,3	64,7	62,5	12,44	2,04	8,8	14
8	63,5	69,9	70	67,8	13,87	2,15	9,2	14
9	68,5	75	75,9	73,1	16,30	2,33	10,0	14
10	72,6	80,5	82	78,4	25,50	2,91	12,5	16

Таблица А.8 – Расчеты погрешности измерений для датчика D4 (участок II)

Время, мин. (№ опыта)	Т, °С;			Математи ческое ожидание \overline{T}_j ,°C	Дисперсия функции отклика, S_j^2	Средняя квадрати чная погрешно сть функции отклика, $S_{\overline{T}_j}$	Случайная абсолютная погрешность, Δj ,°C	Случайная относительная погрешность, % $\Delta j / \overline{T}_j \times 100$
	№ повторения							
	1	2	3					
0	23,1	22,2	22,8	22,7	0,21	0,26	1,1	5
1	29,8	30,3	30,6	30,2	0,16	0,23	1,0	3
2	40,2	40,4	40,5	40,4	0,02	0,09	0,4	1
3	47,9	50,7	49,8	49,5	2,04	0,82	3,5	7
4	55,6	61,1	61,4	59,4	10,66	1,88	8,1	14
5	63,3	70,8	70,6	68,2	18,26	2,47	10,6	16
6	70,5	78,8	78,9	76,1	23,24	2,78	12,0	16
7	77,7	85,5	85,9	83,0	21,37	2,67	11,5	14
8	84,2	91,4	91,8	89,1	18,29	2,47	10,6	12
9	89,8	96,5	96,9	94,4	15,91	2,30	9,9	10
10	94,5	100,7	99,8	98,3	11,22	1,93	8,3	8

Таблица А.9 – Расчеты погрешности измерений для датчика D5 (участок II)

Время, мин. (№ опыта)	Т, °С;			Математи ческое ожидание \overline{T}_j ,°C	Дисперсия функции отклика, S_j^2	Средняя квадрати чная погрешно сть функции отклика, $S_{\overline{T}_j}$	Случайная абсолютная погрешность, Δj ,°C	Случайная относительная погрешность, % $\Delta j / \overline{T}_j \times 100$
	№ повторения							
	1	2	3					
0	22,3	24,7	23,6	23,5	1,44	0,69	3,0	13
1	38,9	39,6	39,8	39,4	0,22	0,27	1,2	3
2	50,4	49,6	49,7	49,9	0,19	0,25	1,1	2
3	63,5	58,5	59,6	60,5	6,90	1,52	6,5	11
4	71	67,7	68,9	69,2	2,79	0,96	4,1	6
5	77,2	72,5	74,4	74,7	5,59	1,36	5,9	8
6	85,1	79,6	82,5	82,4	7,57	1,59	6,8	8
7	92,5	85,8	87,2	88,5	12,49	2,04	8,8	10
8	97	91,6	94,1	94,2	7,30	1,56	6,7	7
9	99,5	98,2	98,8	98,8	0,42	0,37	1,6	2
10	101,1	100,9	100,3	100,8	0,17	0,24	1,0	1

Таблица А.10 – Расчеты погрешности измерений для датчика D6 (участок II)

Время, мин. (№ опыта)	Т, °С;			Математи ческое ожидание \overline{T}_j ,°C	Дисперсия функции отклика, S_j^2	Средняя квадрати чная погрешно сть функции отклика, $S_{\overline{T}_j}$	Случайная абсолютная погрешность, Δj ,°C	Случайная относительная погрешность, % $\Delta j / \overline{T}_j \times 100$
	№ повторения							
	1	2	3					
0	22,5	25,2	24,2	24,0	1,86	0,79	3,4	14
1	31,3	33,1	32,9	32,4	0,97	0,57	2,4	8
2	40,9	39,3	39,4	39,9	0,80	0,52	2,2	6
3	47,2	45,2	46,1	46,2	1,00	0,58	2,5	5
4	53,1	50	51,2	51,4	2,44	0,90	3,9	8
5	59	56,2	57,3	57,5	1,99	0,81	3,5	6
6	64,3	58,9	59,4	60,9	8,90	1,72	7,4	12
7	70	62,8	64	65,6	14,88	2,23	9,6	15
8	74,7	66,8	68,9	70,1	16,74	2,36	10,2	14
9	78,3	70,3	71,4	73,3	18,80	2,50	10,8	15
10	82,7	73,6	74,5	76,9	25,14	2,89	12,4	16

Приложение Б

Патенты

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2783131

**СПОСОБ ОБРАБОТКИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ
РАБОЧИХ СВОЙСТВ ШВОВ ЖЕСТКИХ
АЭРОДРОМНЫХ И ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования "Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина" (г. Воронеж) (RU)*

Авторы: *Недоносков Александр Борисович (RU), Внуков Алексей Николаевич (RU), Дорняк Ольга Роальдовна (RU), Санникова Светлана Михайловна (RU), Макогон Валерий Константинович (RU)*

Заявка № 2021134425

Приоритет изобретения 24 ноября 2021 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 09 ноября 2022 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 24 ноября 2041 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 208062

САМОХОДНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОБРАБОТКИ ШВОВ
ЖЕСТКИХ АЭРОДРОМНЫХ И ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ
СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЕМ

Патентообладатель: *Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение 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 Российской Федерации (RU)*

Авторы: *Недоносков Александр Борисович (RU), Внуков Алексей Николаевич (RU), Белых Антон Геннадьевич (RU), Дорняк Ольга Роальдовна (RU), Санникова Светлана Михайловна (RU), Макогон Валерий Константинович (RU)*

Заявка № 2021123011

Приоритет полезной модели 29 июля 2021 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 01 декабря 2021 г.

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 29 июля 2031 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Иосад



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 210068

СВЧ-ИЗЛУЧАТЕЛЬ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ШВОВ
ЖЕСТКИХ АЭРОДРОМНЫХ И ДОРОЖНЫХ
ПОКРЫТИЙ

Патентообладатель: *Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение 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 Российской Федерации (RU)*

Авторы: *Недоносков Александр Борисович (RU), Внуков Алексей Николаевич (RU), Дорияк Ольга Роальдовна (RU), Санникова Светлана Михайловна (RU), Макогон Валерий Константинович (RU)*

Заявка № 2021123008

Приоритет полезной модели 29 июля 2021 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 28 марта 2022 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 29 июля 2031 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Приложение В

АКТ промышленной апробации результатов исследования

составлен о том, что результаты диссертационного исследования Недоноскова Александра Борисовича на тему «Тепловая обработка деформационных швов цементобетонных покрытий СВЧ нагревом», с 06.04.2025 по 10.04.2025 г. прошли промышленную апробацию в ООО «АвтоМостПроект-Инжиниринг» при устройстве деформационных швов, предназначенных для перекрытия зазора в уровне покрытия проезжей части между пролетными строениями мостовых конструкций.

С использованием экспериментальной СВЧ установки, разработанной Недоносковым А.Б. была произведена активация (нагрев) щебеночно-мастичного заполнителя, полученного смешением на месте, укладываемого в нижний слой деформационного шва мостового сооружения.

В результате промышленной апробации способа СВЧ обработки заполнителя деформационных швов и примыкающих конструкций установлено, что предложенное Недоносковым А.Б. техническое решение позволяет значительно повысить водонепроницаемость и прочность конструкции деформационного шва за счет повышения качества адгезии щебеночно-мастичного заполнителя шва и несущих конструкций пролетных строений.

Генеральный директор
ООО «АвтоМостПроект-
Инжиниринг», к.т.н.

«22» 09 2025 г.

М.П.



Агарков Александр Викторович

тел. 8-910-34412-36

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель начальника Военного учебно-научного
центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная
академия» по учебной и научной работе
кандидат военных наук, доцент

«12» января 2026 года

В.Казаков

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Недоноскова Александра Борисовича на тему «Тепловая обработка деформационных
швов цементобетонных покрытий СВЧ нагревом», представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Комиссия в составе: председателя комиссии начальника 1 отдела (учебного) – заместителя начальника учебно-методического центра ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», к.т.н., доцента Первезенцева Р.Е., членов комиссии: заместителя начальника кафедры № 32, к.т.н., доцента Масалыкина А.Н., доцента кафедры № 32 к.т.н., доцента Склярова А.Н., доцента кафедры № 32 к.т.н., Лепехина А.Н. составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Недоноскова А.Б. на тему «Тепловая обработка деформационных швов цементобетонных покрытий СВЧ нагревом» использованы в образовательном процессе на 32 кафедре (инженерно-аэродромного обеспечения) при разработке учебно-методических материалов учебных дисциплин: «Эксплуатация аэродромов государственной авиации» (тема № 5 «Летнее содержание и текущий ремонт аэродромов», лекция № 13 «Техническая эксплуатация жестких покрытий», лекция № 14 «Текущий ремонт жестких покрытий»), «Технология строительства объектов транспортного назначения» (тема № 16 «Строительство аэродромных покрытий из предварительно напряженных железобетонных плит», лекция № 29 «Строительство аэродромных покрытий из предварительно напряженных железобетонных плит»).

Использование результатов диссертационной работы Недоноскова А.Б. позволило повысить качество подготовки инженеров по специальности 08.05.02 «Строительство, эксплуатация, восстановление и техническое прикрытие автомобильных дорог, мостов и тоннелей».

Председатель комиссии:

(подпись, инициал, фамилия) Р.Первезенцев

Члены комиссии:

(подпись, инициал, фамилия) А.Масалыкин

(подпись, инициал, фамилия) А.Скляров

(подпись, инициал, фамилия) А.Лепехин

«12» января 2026 г.