



УДК 536.24:621.365.5:625.717  
ГРНТИ 67.13.69

## СПОСОБ ТЕРМООБРАБОТКИ ДЕФОРМАЦИОННОГО ШВА АЭРОДРОМНОГО ПОКРЫТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЧ-ВОЗДЕЙСТВИЯ

*О.Р. ДОРНЯК, доктор технических наук, доцент  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)  
А.Б. НЕДОНОСКОВ  
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

В статье рассмотрена возможность профилактики (планово-предупредительных работ) преждевременного разрушения деформационных швов жестких аэродромных покрытий с использованием СВЧ-энергии. Представлена и численно исследована математическая модель диэлектрического нагрева деформационного шва аэродромного покрытия. Показано, что математическая модель может быть использована для выбора рациональных технологических режимов профилактической обработки деформационных швов аэродромного покрытия.

*Ключевые слова:* деформационный шов, герметизация, аэродромные покрытия, битум, СВЧ-нагрев, математическое моделирование.

## THE AIRFIELD PAVEMENT DEFORMATION SEAM HEAT TREATMENT METHOD USING MICROWAVE EXPOSURE

*O.R. DORNYAK, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor  
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)  
A.B. NEDONOSKOV  
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

The article considers the possibility of rigid airfield surfaces deformation joints premature destruction prevention (planned preventive work). A mathematical model of the airfield pavement deformation seam dielectric heating is presented and numerically investigated. It is shown that the mathematical model can be used to select rational technological modes of the airfield surface deformation seams preventive treatment.

*Keywords:* deformation seam, sealing, airfield coverings, bitumen, microwave heating, mathematical modeling.

**Введение.** В процессе эксплуатации аэродромов под воздействием множества эксплуатационных и климатических факторов происходит разрушение покрытий, которое проявляется в виде различных дефектов. К наиболее характерным деформациям и разрушениям аэродромных цементобетонных и других покрытий жесткого типа относятся: шелушение и выкрашивание верхнего слоя покрытия, образование выбоин, раковин и трещин, отколы углов и краев, вертикальные смещения плит, потеря продольной устойчивости плит, разрушение стыковых соединений, сколы кромок плит и разрушение заполнителей швов [1].

Известно, что коэффициент стока воды через негерметичные швы может достигать 70 % [2]. Попадание воды между слоями покрытия приводит к переувлажнению основания и, как следствие, к просадке и разрушению отдельных плит [3]. Разгерметизация деформационных швов особенно часто проявляется на старто-финишных участках взлетно-посадочной полосы (ВПП). К дефектам деформационных швов относятся, в том числе, образование пузырей на поверхности герметика, отслоение герметика от стенки шва, растрескивание герметика [4–5].



**Актуальность.** Как показывает практика эксплуатации аэродромных покрытий, срок их службы часто меньше нормативного. Разрушение начинается через 2–3 года после ввода аэродрома в эксплуатацию. Разрушение деформационных швов происходит ещё раньше [6]. Поэтому поиск эффективных решений повышения долговечности деформационных швов аэродромных покрытий, увеличение межремонтных сроков их службы является актуальной задачей. В данной работе рассматривается один из путей увеличения срока службы деформационных швов, выполненных по стандартной технологии, за счет проведения профилактических работ, которые существенно не ограничивают режим эксплуатации ВПП и могут проводиться независимо от погодных условий.

**Профилактика разрушения материала заполнителя деформационного шва.** Уже на начальном этапе эксплуатации нового или подвергнутого капитальному ремонту жесткого аэродромного покрытия предлагается плановая периодическая термообработка герметизирующего материала деформационного шва с использованием передвижной СВЧ-установки. Излучатель СВЧ, двигаясь с определенной скоростью вдоль шва, нагревает его до температуры, при которой герметизирующий материал переходит в текучее состояние. Такое состояние приводит к самопроизвольному устранению мелких дефектов, включая нарушения сплошности в самом герметике и отслоение герметика от поверхности плиты.

Известно, что СВЧ-технологии применяются достаточно давно при строительстве и ремонте асфальтобетонных покрытий [7–8]. Особенность предложенного подхода в том, что он позволит продлить межремонтный период для деформационных швов и поддержать тем самым постоянное высокое качество жестких аэродромных покрытий.

Следует отметить, что ряд производителей герметизирующих материалов рекомендует разогревать герметик повторно не более одного раза. Однако, исследование, проведенное в [9], показало, что негативное влияние на физико-механические свойства герметика при СВЧ-облучении отсутствует, и СВЧ-обработка органического вяжущего повышает долговечность асфальтобетона.

Для выбора или проектирования СВЧ-установок, обеспечивающих реализацию предлагаемого способа профилактической термообработки деформационного шва, а также определения режимных характеристик, необходимо провести исследование комплекса достаточно сложных теплофизических процессов.

**Математическое моделирование СВЧ-воздействия на материал деформационного шва.** Одним из основных методов исследования СВЧ-электротехнологий является метод математического моделирования. В работе [10] выполнен анализ применяемых математических моделей, которые условно делятся на три группы. Первая группа моделирует только тепловые процессы. Вторая группа описывает несвязанные тепловые и электродинамические задачи. Третья группа объединяет сопряженные модели электродинамики и теплопереноса. В научной литературе имеется большое число публикаций, посвященных результатам моделирования СВЧ-диэлектрического нагрева в рамках всех трех подходов [11–16]. Численная реализация моделей осуществляется с использованием метода конечных разностей и метода конечных элементов.

Цель данной работы – выполнить предварительные оценки режимных параметров СВЧ-термообработки материалов, используемых в конструкциях жестких аэродромных покрытий на основе решения краевой тепловой задачи с внутренними тепловыми источниками, мощность которых определяется через заданные параметры электромагнитной волны. Необходимо определить возможную скорость и глубину обработки шва, энергетические затраты, чтобы показать перспективность предложенного метода поддержания требуемого качества деформационных швов.

Рассмотрим процесс воздействия на битум, заполняющий деформационный шов, движущегося источника диэлектрического нагрева. Материал шва контактирует с цементно-бетонными плитами и окружающей средой (рисунок 1).

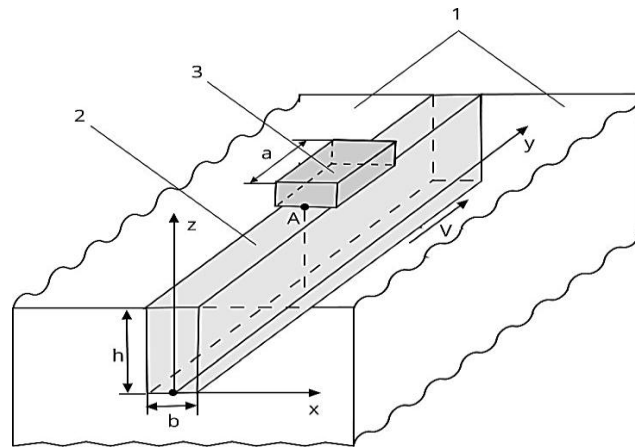


Рисунок 1 – Расчетная схема: 1 – цементобетонная плита; 2 – деформационный шов, заполненный битумом; 3 – излучатель СВЧ-энергии

Вдоль полосы с постоянной скоростью  $V$  движется источник СВЧ-излучения. Ширина шва –  $b$ , глубина –  $h$ . Введена неподвижная система отсчета  $Oxyz$ , так что плоскость  $yOz$  является плоскостью симметрии шва.

Предполагается, что в материале битума имеются весьма малые по размерам очаги разрушения, так что материал можно рассматривать как однородный и изотропный.

Пусть СВЧ-генератор создает равномерное излучение, перпендикулярное нагреваемой поверхности. Выходное сечение волновода по ширине совпадает с шириной битумной полосы  $b$ , по длине равно  $a$ . После взаимодействия с поверхностью диэлектрика энергия падающей электромагнитной волны перераспределяется между отраженной и прошедшей волной, при этом будем учитывать, что электромагнитная волна в диэлектрике является затухающей по глубине.

Развитие температурного поля вследствие диэлектрического нагрева в объеме деформационного шва при сделанных предположениях может быть описано уравнением теплопроводности вида [17]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + I_{mw}, \quad (1)$$

где  $T$  – температура, К;  $t$  – время, с;  $x, y, z$  – декартовы координаты, м;  $\rho$  – плотность битума, кг/м<sup>3</sup>;  $c_p$  – удельная теплоёмкость диэлектрика при постоянном давлении, Дж/(кг·К);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $I_{mw}$  – удельная поглощенная мощность СВЧ-излучения, Вт/м<sup>3</sup>.

Уравнение (1) записано при неявном допущении, что скорость распространения температурной волны в нагреваемом материале бесконечна.

Удельная поглощенная мощность СВЧ-излучения определяется по формуле [18–20]:

$$I_{mw} = 2\pi \epsilon_0 \epsilon \cdot tg\delta \cdot f E^2, \quad (2)$$

где  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала шва;  $tg\delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь;  $f$  – частота излучения, Гц;  $E$  – напряженность электрического поля, В/м;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная, Ф/м.

Изменение напряженности электрического поля с глубиной учтено в соответствии с законом Бугера-Ламберта-Бера [18–20]



$$E = E_0 \exp(-D(h-z)),$$

$$D = 2\pi / \lambda_{mw} \cdot \text{tg} \delta \sqrt{\epsilon}. \quad (3)$$

Здесь  $D$  – показатель поглощения,  $\text{м}^{-1}$ ;  $E_0$  – напряженность электрического поля на поверхности облучаемого материала,  $\text{В/м}$ ;  $\lambda_{mw}$  – длина электромагнитной волны,  $\text{м}$ .

Источник излучения совершает прямолинейное поступательное движение с постоянной скоростью  $V$ . Уравнения движения имеют вид:

$$x_A = 0; y_A = L_1 + Vt; z_A = h. \quad (4)$$

Здесь  $A$  – точка, выбранная за полюс (рисунок 1);  $L_1$  – начальная  $y$ -координата точки  $A$ .

Уравнение (5) дополнено краевыми условиями с учетом симметрии задачи. Начальное условие предполагает первоначально однородное распределение температуры:

$$T(x, y, z, 0) = T_0. \quad (5)$$

На поверхностях контакта битумной полосы и материала бетонных плит используются граничные условия 3 рода:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=b/2} = \alpha_1 (T|_{x=b/2} - T_\infty^{(1)}), \quad (6)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_2 (T|_{z=0} - T_\infty^{(2)}), \quad (7)$$

где  $T_\infty^{(1)}$ ,  $T_\infty^{(2)}$  – средняя температура бетонных плит вблизи боковых поверхностей шва и под деформационным швом,  $\text{К}$ ;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ .

На поверхности шва, контактирующего с окружающей средой, поставлено граничное условие 4 рода:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=h} = \alpha_c (T|_{z=h} - T_c) + \epsilon_c \sigma_0 [T^4|_{z=h} - T_c^4], \quad (8)$$

где  $\sigma_0$  – постоянная Стефана-Больцмана  $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$ ;  $T_c$  – температура воздуха,  $\text{К}$ ;  $\alpha_c$  – коэффициент конвективной теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ ;  $\epsilon_c$  – степень черноты материала шва.

На остальных границах записаны условия симметрии:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y \rightarrow \pm\infty} = 0. \quad (9)$$

Нестационарная трехмерная математическая модель (5–9) исследована с помощью метода конечных элементов в универсальной среде численного моделирования COMSOL Multiphysics.

**Параметры расчетов.** Для тепловой обработки битума, при которой происходит заплывание мелких дефектов, могут быть использованы магнетроны. В современной строительной индустрии наиболее часто применяют две частоты излучения –  $f = 915$  и  $f = 2450$  МГц. В России на ЗАО «НПП «Магратеп» выпускают, в частности, магнетрон



М-116-50, который имеет мощность 50 кВт на частоте 915 МГц, а также магнетрон М-168, мощностью 5 кВт на частоте 2450 МГц [21]. В данной работе расчеты проведены для случая применения прямоугольного волновода с сечением  $axb$ , который формирует плоскую монохроматическую волну типа  $H_{01}$ . Согласно известному алгоритму [22], выполнены оценки диапазонов для возможных значений размеров сечения волновода, которые обеспечивают эффективный перенос СВЧ-энергии к поверхности битумного шва. Расчетные значения для  $a$  и  $b$  приведены для обоих выбранных СВЧ-генераторов в таблице 1. Теплофизические и геометрические параметры расчета представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Параметры волноводов

Параметр/Тип магнетрона	М-116-50	М-168
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

Таблица 2 – Теплофизические и геометрические параметры задачи

Параметр	Обозначение, размерность	Значение
Высота, на которую шов заполнен битумом	$h$ , м	0,05
Степень черноты	$\epsilon_c$	1
Удельная теплоемкость битума	$c_p$ , Дж/(кг К)	$1,9 \cdot 10^3$
Плотность битума	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$1,3 \cdot 10^3$
Коэффициент теплопроводности битума	$\lambda$ , Вт/(м К)	0,5
Электрическая постоянная	$\epsilon_0$ , Ф/м	$8,854 \cdot 10^{-12}$
Диэлектрическая проницаемость	$\epsilon$	2,5
Тангенс угла диэлектрических потерь	$\text{tg}\delta$	0,013
Коэффициент конвективной теплоотдачи	$\alpha_c$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)	12
Коэффициент теплоотдачи битумно-бетонная плита	$\alpha_1$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)	24
Коэффициент теплоотдачи от битума к основанию	$\alpha_2$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)	24
Температура воздуха	$T_c$ , К	293
Температура бетонных плит	$T_{\infty}^1$ , К	293
Температура основания	$T_{\infty}^2$ , К	293

**Обсуждение результатов расчета.** Результаты конечно-элементного моделирования СВЧ-нагрева деформационного шва представлены на рисунках 2–4.

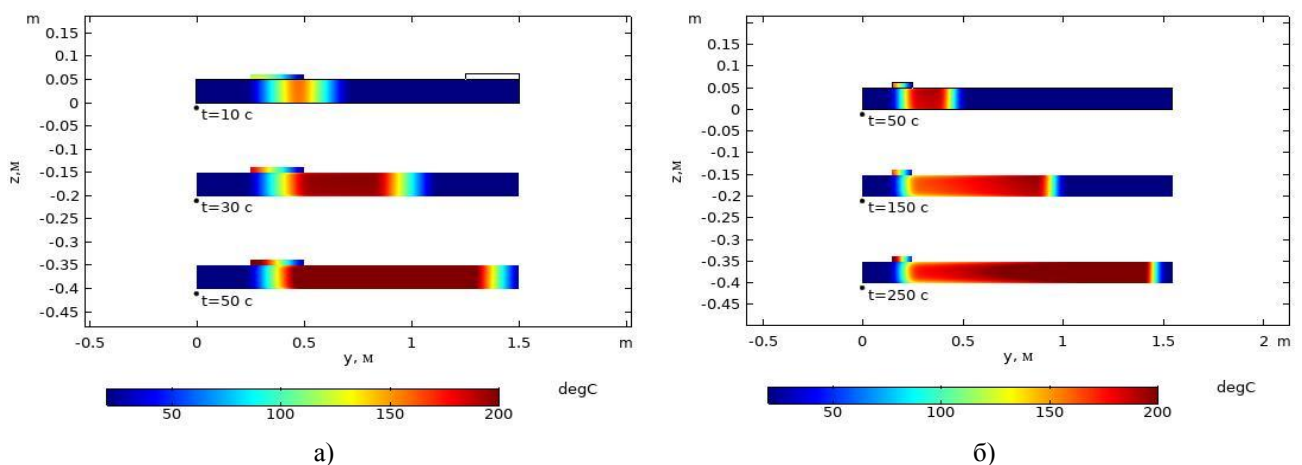


Рисунок 2 – Распределение температуры битума вдоль шва вблизи его поверхности при использовании двух различных излучателей с частотой излучения  $f$  в различные моменты времени: а)  $f = 915$  МГц; б)  $f = 2450$  МГц





Рисунок 2 иллюстрирует развитие поля температуры битума в продольной вертикальной плоскости симметрии деформационного шва при использовании обоих типов магнетронов. Скорость движения источника излучения, при которой для заданных внешних условий диэлектрик разогревается до температуры текучего состояния  $\sim 180\text{--}190\text{ }^\circ\text{C}$ , для магнетрона I (М-116-50) составила  $0.02\text{ м/с}$ , а для магнетрона II (М-168) –  $0.005\text{ м/с}$ . По глубине шва интенсивность тепловыделения при СВЧ-воздействии практически не изменяется, поскольку коэффициент затухания электромагнитной волны в битуме невелик, а глубина ее проникновения  $L_{mw}$ , наоборот, велика. Расчетное значение  $L_{mw}$  составило для магнетрона I  $2.53\text{ м}$ , для магнетрона II  $0.94\text{ м}$ .

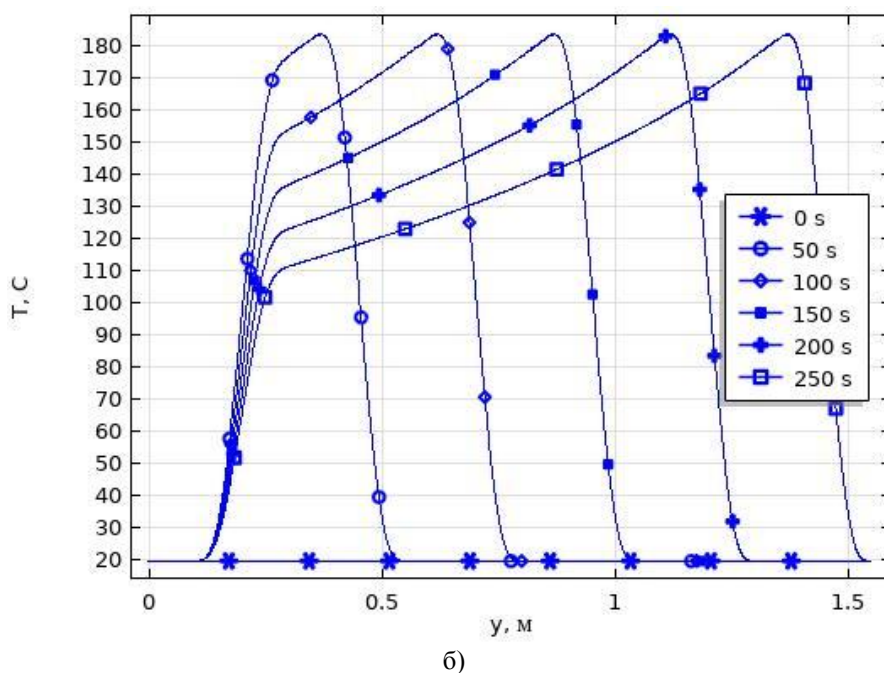
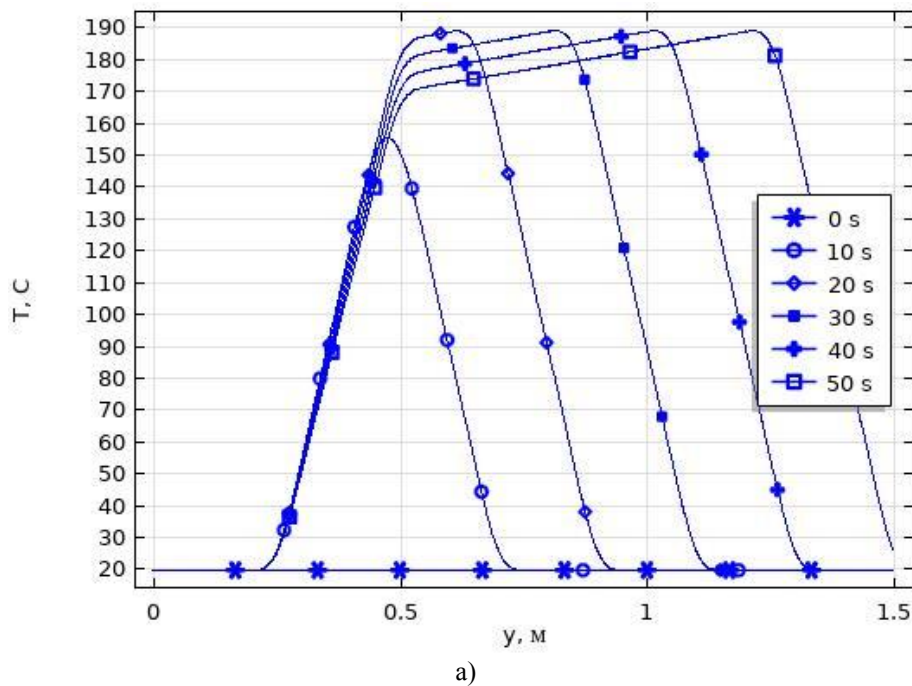


Рисунок 3 – Распределение температуры битума вдоль шва вблизи его поверхности при использовании двух различных излучателей с частотой излучения в различные моменты времени: а)  $f = 915\text{ МГц}$ ; б)  $f = 2450\text{ МГц}$



Магнетрон I создает электромагнитное поле с большей электрической напряженностью, чем магнетрон II (примерно в 2 раза). Мощность тепловых источников в соответствии с (2) примерно в 4 раза выше при использовании магнетрона I, чем магнетрона II, что и позволяет увеличить скорость перемещения волновода вдоль шва также в 4 раза в первом случае.

Из рисунка 2 видно, что развитое температурное поле, формируемое при СВЧ-воздействии магнетрона I, более однородно вдоль шва, т.е. текучее состояние битума в данной точке шва будет поддерживаться дольше, что увеличит рабочий период заплывания трещин в материале шва. Этот эффект демонстрируют графики на рисунке 3. При перемещении излучателя СВЧ-энергии I типа на участке длиной ~ 1 м, материал успевает остыть на ~ 20 °С, а при перемещении излучателя II типа – более чем на 70 °С.

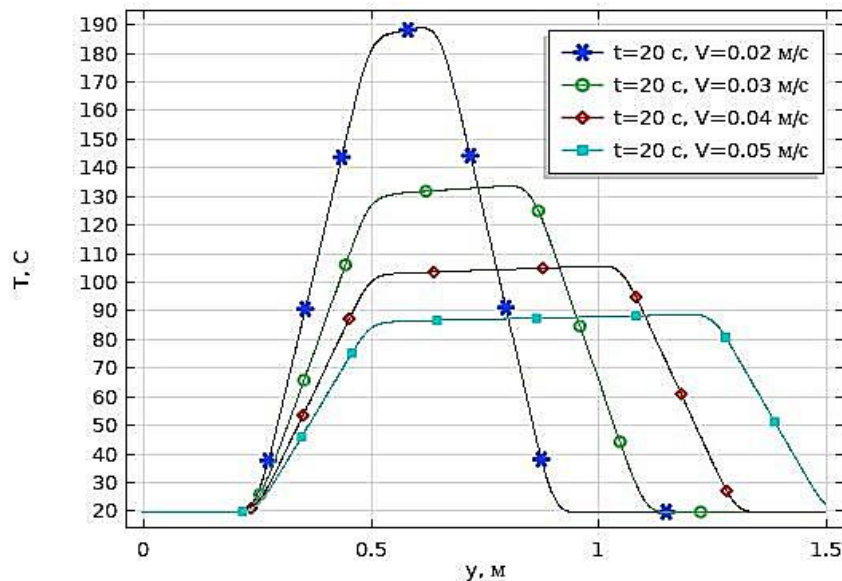


Рисунок 4 – Распределение температуры битума вдоль шва вблизи его поверхности при различных значениях скорости движения волновода V для напряженности электрического поля  $E_0=145000$  В/м и частоты излучения  $f=915$  МГц

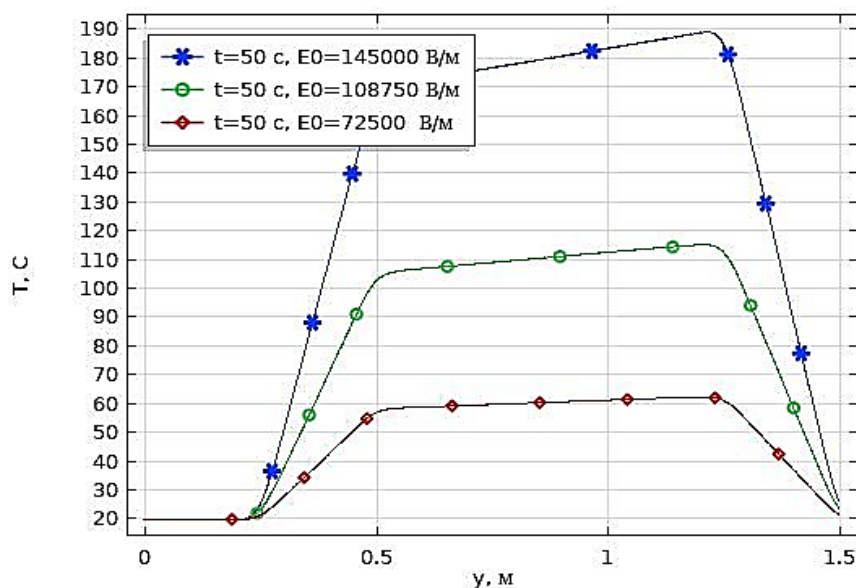


Рисунок 5 – Распределение температуры битума вдоль шва вблизи его поверхности при различных значениях напряженности электрического поля  $E_0$  для частоты излучения  $f=915$  МГц и скорости волновода  $V=0.02$  м/с



Профили температуры, представленные на рисунке 4, показывают, что скорость движения излучателя  $V$  существенно влияет на максимальное значение температуры на поверхности шва. Чем больше величина  $V$ , тем меньше энергии поглощает материал в данной точке и тем ниже достигаемое в результате термообработки значение температуры.

Сравнение графиков на рисунке 5 дает ожидаемый результат – величина напряженности электрического поля существенно влияет на значение максимальной температуры диэлектрика при СВЧ-воздействии. Так уменьшение напряженности падающей волны  $E_0$  в два раза для направляющей системы с магнетроном I типа приводит к снижению максимальной температуры слоя битума вблизи свободной поверхности почти на 130 °С.

**Выводы.** Предложен метод профилактической термообработки деформационных швов жестких аэродромных покрытий с использованием СВЧ-энергии для предупреждения их преждевременного разрушения. Предполагается, что профилактическая термообработка шва, в котором еще нет существенных дефектов, но имеются предпосылки к разрушению, позволит увеличить межремонтные сроки службы покрытия.

Данный профилактический ремонт швов аэродромного покрытия можно применять без прекращения лётной эксплуатации ВПП. По сравнению с традиционными способами ремонта изучаемая технология является ресурсосберегающей, имеет меньшую трудоемкость.

Проведено математическое моделирование СВЧ-термообработки деформационного шва аэродромного покрытия. Получены рациональные режимные параметры процесса для двух типов промышленных магнетронов. Расчетным путем подобрана скорость перемещения излучателя, которая позволяет выполнить СВЧ-нагрев битумного заполнителя в заданном температурном диапазоне.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РЭА-93. Руководство по эксплуатации аэродромов авиации Вооруженных Сил РФ. М., Воениздат, 1995.
2. 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.
3. Кульчицкий В.А. и др. Аэродромные покрытия. Современный взгляд. М.: Физико-математическая литература, 2002. 528 с.
4. Правила производства и приемки работ при ремонте жестких покрытий аэродромов ВСП 32-02-03 МО РФ.
5. Дефекты герметизации деформационных швов в цементобетонных покрытиях / НИЦ «Основа». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://labbeton.ru/news/defektyi-germetizatsii-deformatsionnyih-shvov-v-tsementobetonnyih-pokryitiyah/> (дата обращения 14.11.2020).
6. Глушков Г.И., Бабков В.Ф., Тригопи В.Е. и др. Жесткие покрытия аэродромов и автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1994. 349 с.
7. Алиев А.М. Основы регенерации асфальтобетона: дис. ... док. техн. наук. Баку, 1981. 336 с.
8. Карпенко Ю.В., Нефедов В.Н. СВЧ-разогреватели асфальтобетонных покрытий // Автомобильные дороги. 1996. № 5. С. 44–57.
9. 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.
10. Архангельский Ю.С. Сверхвысокочастотная электротехнология. Саратовская школа электротехнологов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 4. Вып. 3. С. 5–15.
11. Резник С.В., Румянцев С.А. Математическое моделирование температурного состояния цилиндрических заготовок из полимерных композиционных материалов при





СВЧ-нагреве // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 1. С. 6–21. DOI: 10.7463/0114.0658448.

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

13. Сайтов Р.И., Абдеев Р.Г., Швецов М.В., Хасанова А.Ф., Абдеев Э.Р., Рукомойников А.А. Математическая модель процесса электромагнитного нагрева многофазного многокомпонентного пласта тяжелой нефти // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2018. Т. 29. № 4. С. 73–79.

14. 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. № 2 (18). С. 36–42.

15. Анфиногентов В.И., Ганиева С.Р. Математическое моделирование СВЧ-нагрева вязких жидкостей в трубопроводе // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 2. С. 123–126.

16. Nekrasov S.A., Volkov V.S. Computer simulation and optimization of soil thawing using microwave energy // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics 2016, № 9 (1). P. 60–68.

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

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

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

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

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

22. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. Т. 1. Техника сверхвысоких частот. М.: Высшая школа, 1970. 440 с.

## REFERENCES

1. R'EA-93. Rukovodstvo po `ekspluatatsii a`erodromov aviacii Vooruzhennyh Sil RF. M., Voenizdat, 1995.

2. Sedergren G.R. Drenazh dorozhnyh ovezhd i a`erodromnyh pokrytij / G.R. Sedergren; Per. s angl. N.G. Savusi, `E.Ya. Filippovoj. M.: Transport, 1981. 279 p.

3. Kul'chickij V.A. i dr. A`erodromnye pokrytiya. Sovremennyj vzglyad. M.: Fiziko-matematicheskaya literatura, 2002. 528 p.

4. Pravila proizvodstva i priemki rabot pri remonte zhestkih pokrytij a`erodromov VSP 32-02-03 MO RF.

5. Defekty germetizatsii deformatsionnyh shvov v cementobetonnyh pokrytyyah / NIC «Osнова». [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <https://labbeton.ru/news/defektyi-germetizatsii-deformatsionnyih-shvov-v-tsementobetonnyih-pokrytyyah/> (data obrascheniya 14.11.2020).

6. Glushkov G.I., Babkov V.F., Trigoni V.E. i dr. Zhestkie pokrytiya a`erodromov i avtomobil'nyh dorog. M.: Transport, 1994. 349 p.

7. Aliev A.M. Osnovy regeneratsii asfal'tobetona: dis. ... dok. tehn. nauk. Baku, 1981. 336 p.

8. Karpenko Yu.V., Nefedov V.N. SVCh-razogrevateli asfal'tobetonnyh pokrytij // Avtomobil'nye dorogi. 1996. № 5. pp. 44–57.

9. Yadykina V.V., Akimov A.E., Gridchin A.M. SVCh-aktivatsiya bitumov kak sposob povysheniya fiziko-mehaniicheskikh i `ekspluatatsionnyh parametrov asfal'tobetona // Stroitel'nye materialy. 2010. № 5. pp. 10–12.



10. Arhangel'skij Yu.S. Sverhвысокочастотная `elektrotehnologiya. Saratovskaya shkola `elektrotehnologov // Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2011. № 4. Vyp. 3. pp. 5–15.
11. Reznik S.V., Rumyancev S.A. Matematicheskoe modelirovanie temperaturnogo sostoyaniya cilindricheskikh zagotovok iz polimernyh kompozicionnyh materialov pri SVCh-nagreve // Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.É. Bauman. 2014. № 1. pp. 6–21. DOI: 10.7463/0114.0658448.
12. Grishina E.M., Arhangel'skij Yu.S. Matematicheskoe modelirovanie termoobrabotki v kamerah lučevogo tipa SVCh-`elektrotermicheskih ustanovok // Voprosy `elektrotehnologii. 2015. № 1. pp. 5–9.
13. Saitov R.I., Abdeev R.G., Shvecov M.V., Hasanova A.F., Abdeev `E.R., Rukomojnikov A.A. Matematicheskaya model' processa `elektromagnitnogo nagreva mnogofaznogo mnogokomponentnogo plasta tyazhelej nefi // Vestnik Akademii nauk Respubliki Bashkortostan. 2018. T. 29. № 4. pp. 73–79.
14. Zaharov V.V., Yankin S.S., Trigorlyj S.V. Chislennoe modelirovanie processov SVCh-termoobrabotki di`elektrikov bol'shoj ploshchadi s primeneniem SVCh-ustanovok metodicheskogo dejstviya // Voprosy `elektrotehnologii. 2018. № 2 (18). pp. 36–42.
15. Anfinogentov V.I., Ganieva S.R. Matematicheskoe modelirovanie SVCh-nagreva vyazkih zhidkostej v truboprovode // Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta. 2014. T. 17. № 2. pp. 123–126.
16. Nekrasov S.A., Volkov V.S. Computer simulation and optimization of soil thawing using microwave energy // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics 2016, № 9 (1). pp. 60–68.
17. Lykov A.V. Teplomassoobmen: (Spravochnik). M.: `Energiya, 1978. 480 p.
18. Netushil A.B., Zhuhovickij B.Ya., Kudin V.N., Parini E.P. Vysokochastotnyj nagrev di`elektrikov i provodnikov. M.: Gos`energoizdat, 1959. 480 p.
19. Brunov B.Ya., Gol'denberg L.M., Klyackin I.G., Cejtin L.A. Teoriya `elektromagnitnogo polya. M.-L.: Gos`energoizdat, 1962. 511 p.
20. Tareev B.M. Fizika di`elektricheskikh materialov. M.: `Energiya, 1973. 328 p.
21. Morozov O., Kargin A., Savenko G., Trebuh V., Vorob'ev I. Promyshlennoe primenenie SVCh-nagreva // `Elektronika: Nauka, Tehnologiya, Biznes. 2010. № 3. pp. 2–6.
22. Lebedev I.V. Tehnika i pribory SVCh. T. 1. Tehnika sverhвысоких частот. M.: Vysshaya shkola, 1970. 440 p.

© Дорняк О.Р., Недоносков А.Б., 2021

Дорняк Ольга Роальдовна, доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, ordornyak@mail.ru.

Недоносков Александр Борисович, старший преподаватель кафедры кадровой и организационно-мобилизационной работы, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, alexandr63339@yandex.ru.