

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2023, Том 10, № 2 / 2023, Vol. 10, Iss. 2 <https://t-s.today/issue-2-2023.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/01SATS223.pdf>

DOI: 10.15862/01SATS223 (<https://doi.org/10.15862/01SATS223>)

Устройство напыляемой полимерной гидроизоляции мостовых сооружений с учетом теплофизического моделирования

Каменских А.Н.

ФАУ «Российский дорожный научно-исследовательский институт», Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Каменских Александр Николаевич, e-mail: kamenskih@rosdornii.ru

Аннотация. В статье исследуются вопросы устройства напыляемой полимерной гидроизоляции мостовых сооружений при пониженных температурах с учетом теплофизического моделирования и нормирования макрошероховатости.

В результате патентного исследования и сравнительного анализа полимерных материалов для гидроизоляции мостовых сооружений в качестве и объекта исследования выбирается полимерный материал (трехслойная конструкция) отечественного производства «Гидрофлекс-1» и его близкие аналоги по показателям адгезии к бетону и металлу, обеспеченной однородности прочностных свойств, температуре эксплуатации, меньшего количества конструктивных слоев и наибольшим подтвержденным сроком службы.

Автором представлены процесс и результаты вычислительного моделирования теплофизического взаимодействия плоского факела распределения горячей смеси гидроизоляции с обрабатываемой поверхностью.

Результаты математического теплофизического моделирования были подтверждены на практике посредством визуализации температурного поля

напыленного горячего слоя гидроизоляции с помощью тепловизора. Отклонение погрешности расчета от результатов натурных измерений составило не более 5°C.

Точечное кавернообразование происходит на склонах участков с максимальными неровностями, что связано с температурой и расходом напыляемой смеси, временем остывания, а также углом и высотой выступа макрошероховатости.

Усовершенствована технология устройства напыляемой полимерной трехслойной гидроизоляции сталежелезобетонных и металлических ортотропных плит мостовых сооружений при их ремонте при пониженных температурах ниже 10°C с целью расширения строительного сезона с учетом теплофизического моделирования и нормирования геометрических и статистических параметров макрошероховатости, а также результатов ранжирования доминирующих факторов, влияющих на изменение теплофизического взаимодействия.

Ключевые слова: теплофизика; мостовое сооружение; гидроизоляция; вычислительное моделирование; тепловизор; погрешность расчета; макрошероховатость

Spray-on polymer waterproofing finishing structure for bridge structures, taking into account thermophysical modeling

Alexander N. Kamenskikh

Russian Road Research Institute, Moscow, Russia

Corresponding author: Alexander N. Kamenskikh, e-mail: kamenskih@rosdornii.ru

Abstract. This article investigates the issues related to the spray-on polymer waterproofing finishing structure of bridge structures at low temperatures, with a focus on thermophysical modeling and macroroughness normalization.

Through patent research and a comparative analysis of polymeric materials for waterproofing bridge structures, the chosen object of study is the domestically manufactured polymeric material (three-layer structure) called

"Hydroflex-1", along with its close analogues that exhibit adhesion to concrete and metal, homogeneous strength properties, suitable operating temperature range, fewer structural layers, and the longest proven service life.

The author presents the process and results of computational modeling regarding the thermophysical interaction between the distribution of a flat flame of the waterproofing hot mixture and a treated surface.

The results of mathematical thermophysical modeling are validated through the visualization of the temperature field of the sprayed hot waterproofing layer using a

thermal imager. The calculation error deviates by no more than 5°C from the results of full-scale measurements.

The formation of point caving occurs on the slopes of areas with maximum irregularities, which is influenced by the temperature and flow rate of the sprayed mixture, cooling time, as well as the angle and height of the macroroughness ledge.

The technology for the spray-on structure of a three-layer polymeric waterproofing finishing for steel-reinforced concrete and metal orthotropic slabs of bridge structures during repair at low temperatures below 10°C has been improved. This improvement aims to extend the construction season by considering thermophysical modeling and normalizing geometric and statistical parameters of macroroughness. Additionally, the results of ranking the dominant factors influencing the thermophysical interaction are taken into account.

Keywords: thermal physics; bridge structure; waterproofing; computational modeling; thermal imager; calculation error; macroroughness

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons "Attribution" («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons "Attribution" 4.0 Global License



Введение (актуальность)

Introduction (timeliness)

Мостовые сооружения как объекты транспортной инфраструктуры представляют собой сложные комплексы конструктивных элементов, надежность эксплуатации которых зависит не только от их правильного конструирования, но и от соответствия применяемых при строительстве и эксплуатации материалов целям обеспечения необходимой долговечности сооружения. Одним из основных элементов мостового сооружения является ездовое полотно. Оно является важной и ответственной частью, призванной защитить несущие конструкции мостового сооружения от механических воздействий и атмосферной влаги, обеспечить комфортность движения и обеспечить передачу нагрузки от транспортных средств на несущие конструкции.¹ Возникновение трещин в ездовом полотне обычно влечет за собой повреждение слоя гидроизоляции и проникание влаги в конструкцию мостового сооружения [1; 2].

Эффективным решением данной проблемы является применение напыляемой трехслойной полимерной гидроизоляции, в том числе из новых отечественных материалов [3].

Между тем их применение ограничено наступлением пониженных температур ниже 10°C, приводящем к длительному завершению (до двух суток) химической реакции между компонентами (изоционата и отвердителя) и появлению дефектов в виде каверн из-за пузырьков смесей газов и пара, возникших во время химической реакции двух компонентов после нанесения слоя гидроизоляции [4; 5].

Автором установлено, что кавернообразование также связано с показателями качества обрабатываемого слоя сталежелезобетонной или ортотропной металлической плиты, особенно с геометрическими показателями макрошероховатости обрабатываемой плиты [6; 7].

Для изменения этой ситуации необходимо совершенствование методического обеспечения устройства бесшовной напыляемой гидроизоляции при ремонте мостовых сооружений при пониженных температурах по трехслойной бесшовной технологии, которая бы позволяла в дальнейшем укладывать литой асфальтобетон непосредственно на гидроизоляцию проезжей части мостового сооружения.

¹ Гишман Е.Е., Аксельрод И.С., Гишман М.Е. Мосты и сооружения на автомобильных дорогах. Учебник. — М.: Транспорт. 1973. — 416 с.

В статье применен феноменологический подход исследования одного явления — вопроса о причинах и технологии их устранения образования каверн (дефектов нарушения целостности гидроизоляции) при теплофизическом взаимодействии слоя напыляемой полимерной гидроизоляции с плитой мостового сооружения при пониженных температурах ниже 10°C при подробном учете геометрии макрошероховатости обрабатываемой поверхности.

Цель статьи: Введение в практику отечественного мостостроения инновационных технологий устройства трехслойной напыляемой полимерной гидроизоляции сталежелезобетонных и металлических ортотропных пролетных строений мостовых сооружений при их ремонте при пониженных температурах с целью расширения строительного сезона.

Цель поведенного в статье эксперимента — определение времени остывания материала (температурного градиента), измерение температурного поля по поперечной и продольной координате, определение изменения толщины слоя по поперечной координате.

Отдельное исследование посвящено зарождению пузырьков паровоздушной смеси и кавернообразованию (нарушению из-за них гидроизоляции и снижению прочности на локальном участке).

Статья является частью диссертационного исследования автора.

Степень разработанности темы

Status of the topic

Вопросами нормирования и устройства нагреваемой гидроизоляции мостовых сооружений и макрошероховатых дорожных и мостовых покрытий занимались в Федеральном дорожном агентстве, ФГУП «РОСДОРНИИ», Московском автомобильно-дорожном государственном техническом университете (МАДИ), ОАО «ГИПРОДОРНИИ», ФГУП «СОЮЗДОРНИИ», ООО НП СК «МОСТ», ОАО «РОСДОРТЕХ», ОАО «КАЗДОРНИИ», СГТУ имени Гагарина Ю.А., ВГАСУ, СибаДИ, ООО «Зиракс» и в других организациях. Известны научные работы В.А. Астрова, Я.И. Бараца, А.П. Васильева, Е.Е. Гибшмана, В.Ю. Гладкова, И.Е. Евгеньева, Т.Г. Насад, М.Л. Ермакова, И.Д. Сахаровой, В.Ю. Казаряна, В.Н. Макарова, С.И. Романова, А.В. Кочеткова, И.Г. Овчинникова, М.В. Немчинова, П.И. Пospelова, И.Г. Петровича, В.И. Шестерикова, А.А. Шевякова и других. Известны также исследования ученых Франции, США, Канады, Швеции, Финляндии и ряда других стран.

В настоящее время в транспортном строительстве находят массовое применение новые долговечные напыляемые материалы на основе

изоционата: полимочевина, полиуретаны, поликарбамиды. Слой гидроизоляции наносят на грунтовочный слой методом горячего напыления, используя специальное оборудование, с образованием прочного, эластичного, бесшовного, водонепроницаемого покрытия, который при нанесении воспроизводит форму геометрии изолируемой поверхности. Данные материалы отличаются от своих близких аналогов своей повышенной скоростью отверждения, эластичностью, возможностью создания рецептуры с учетом особенностей места и объекта применения, отсутствием в рецептуре пластифицирующих добавок и растворителей, возможностью напыления на поверхности практически любой геометрии, повышенными адгезионными свойствами, износостойкостью и способностью сохранять свои свойства при многоцикловых нагружениях и под воздействием высоких температур. Они применяются для создания на дорогах и мостах макрошероховатых покрытий, гидроизоляции и антикоррозионной защиты мостовых сооружений, устройства защитных полиуретаново-щебеночных слоев для защиты конусов мостов и др. [6].

Методы

Methods

Автором проведен патентный поиск по данному вопросу с выявлением научно-технического уровня разработки данной темы. При осуществлении патентного поиска близких аналогов индексы международной патентной классификации были определены, исходя из области техники исследуемой темы, и включили:

Класс: E01C — строительство дорог, дорожных покрытий, спортивных площадок и т. п.; машины и вспомогательное оборудование для строительства и ремонта.

Подкласс: E01C 7/00 Покрытия, изготавливаемые на месте.

Группы: E01C 7/02 ... из щебня без применения вяжущих материалов.

E01C 7/18 ... из щебня и битуминозного вяжущего материала.

E01C 7/20 ... с вяжущими материалами, добавляемыми в холодном состоянии, например с природным асфальтом.

E01C 7/22 ... с вяжущими материалами, добавляемыми в горячем состоянии, например с горячим битумом.

E01C 7/30 ... из щебня с применением других вяжущих материалов, например, синтетических.

E01C 7/32 ... из различных слоев, укладываемых на месте.

Класс: E01D — мосты.

Подкласс: E01D 19/00 Детали мостов.

Группы: E01D 19/06 ... конструкция, расположение, изготовление и соединение температурных швов.

E01D 19/08 ... гидроизоляционные, звукоизоляционные и прочие изоляционные слои; устройства для отвода воды.

Подкласс: E01D 22/00 Способы и устройства для ремонта или укрепления существующих мостов.

Класс: E04B — строительные конструкции в целом; стены, например перегородки; крыши; перекрытия; потолки; изоляция или прочие средства и способы защиты строительных конструкций и сооружений.

Подкласс: E04B 1/00 Строительные конструкции общего назначения; сооружения, не обуславливаемые конструкцией стен, например перегородок, полов, перекрытий или крыш.

Группы: E04B 1/62 ... изоляция и прочая защита строительных конструкций и сооружений; элементы или использование специальных материалов для защиты сооружений.

E04B 1/64 ... водозащита; антикоррозийная защита.

E04B 1/66 ... уплотнения.

E04B 1/68 ... швов.

Класс: C08L — композиции высокомолекулярных соединений.

Подкласс: C08L 95/00 Композиции битуминозных материалов, например, асфальта, гудрона или вара.

При поиске информации были использованы ключевые слова: гидроизоляция (waterproofing), мост (bridge), полиуретан (polyurethane), литой асфальтобетон (cast asphalt concrete); полимерные композиции (polymer compositions); полимерное вяжущее (polymer binder).

Анализ отобранной патентной информации.

По результатам проведенного патентного поиска для анализа состояния патентования по исследуемой теме отобраны следующие документы:

- патенты на изобретения RU № 2177523, 2298023, 2341479, 2341480, 2477736, 2504523, 2504565, 2516605, 2560033, 2662493;

- патенты на полезные модели RU № 21051, 69874, 81500, 84859, 117454;
- патенты CN № 209144654, 108439861, 108442250, 106739310, 101914894;
- патент KR № 20070001411;
- патент EP № 0457667;
- патент DE № 20205590.

Патентный анализ научно-технического уровня исследуемой темы показал, что решение технической задачи устройства гидроизоляции мостовых сооружений под горячие асфальтобетонные смеси в известных запатентованных решениях осуществляется путем устройства слоев покрытия слой из литого асфальтобетона и путем разработки составов нагреваемых смесей для изготовления слоя гидроизоляции с обеспечением адгезии между ним и верхним слоем из литого асфальтобетона.

Доступные в настоящее время напыляемой гидроизоляции комплекты на основе одного или более из следующих химических веществ: акриловые; эпоксидные смолы; полиэферы; полимочевина; вододиспергируемые полимеры. Применение полимерных двухкомпонентных материалов, наносимых под высоким давлением безвоздушным способом, тормозилось проблемой отсутствия адгезионной способности данных материалов к устраиваемым на полимерной гидроизоляции горячим асфальтобетонным слоям. Это определяется низкой адгезионной способностью полиуретана к битуму. Такая задача решалась за счет нанесения на несформировавшийся слой гидроизоляции фрикционного материала заданной фракции.

В процессе патентных исследований был выявлен наиболее близкий аналог (прототип) к объекту настоящего исследования: патент RU № 2479523, МПК C04B 26/16, E01C 7/30, Патентообладатель: БАСФ СЕ (DE), Способ получения содержащих минералы дорожных покрытий для настилов. Заявленный способ заключается в получении смеси, содержащей минеральный материал и полиуретановую реакционную смесь, а также при необходимости другие добавки, нанесении ее на материал основы, уплотнении с использованием прижимного давления по меньшей мере 5 Н/см^2 и отверждении, при этом полиуретановая реакционная смесь может быть получена при смешивании: изоцианатов с соединениями, содержащими, по меньшей мере, два атома водорода, активных в отношении изоцианатов, которые содержат гидроксифункциональное соединение с гидрофобными группами, а также при необходимости, с агентами удлинения цепи и/или агентами полимерной сшивки, катализаторами и общепринятыми добавками.

Новым техническим решением оказались авторская разработка ООО «Конверра-Юг» и ООО «Современные покрытия», а также близкие аналоги других предприятий в виде создания термо-адгезионного третьего верхнего слоя гидроизоляции, обладающие также защитными свойствами с учетом возможности перемещения по нему построенного и технологического транспорта. Для устранения или компенсации основных причин повреждений и дефектов конструкции проезжей части мостовых сооружений должны быть пересмотрены их конструктивные решения, материалы гидроизоляции, внесены изменения в технологические нормативы, ужесточены требования к качеству выравнивающего и защитного слоев.

Применение полимочевины для гидроизоляции и антикоррозионной защиты гарантирует длительные сроки эксплуатации объектов без ремонтов, возможность работать при пограничных температурах и влажности. На всей площади гидроизолируемой поверхности образуется бесшовная пленка-мембрана.

Полимочевина — напыляемый эластомер, это позволяет осуществить переход с вертикали на горизонталь и с одного вида поверхности на другую без потери качества конечного покрытия. Преимущество полимочевинных покрытий заключается в высокой скорости отверждения [7]. Через час после нанесения полимочевины по покрытию разрешается движение автотранспорта. Достаточно восьмичасовой рабочей смены, чтобы нанести полимочевину на площадь 800–1 000 м² силами бригады из трех специалистов.

Полимочевинные системы применялись на следующих объектах транспортной инфраструктуры: подземный пешеходный переход на Варшавском шоссе, коллектор по ул. Международная, транспортная эстакада (Москва-Сити), эстакада Звенигородского шоссе, мост через реки Ликовка и Незнайка, путепровод тоннельного типа на Киевском шоссе, реконструкция Боровского шоссе, транспортное пересечение с МКАД в районе Новокосино, тоннель и эстакада на пересечении Ленинградского проспекта и Третьего транспортного кольца, строительство Четвертого транспортного кольца, тоннель при реконструкции Ленинградского проспекта (в районе метро Сокол), мосты и тоннели на объездной дороге в г. Сочи, гидроизоляция распределительной плиты на станции метро «Мякинино» [6].

В результате патентного исследования и сравнительного анализа полимерных материалов для гидроизоляции мостовых сооружений в качестве и **объекта исследования** выбирается полимерный материал (трехслойная конструкция) отечественного производства «Гидрофлекс-1» и его близкие аналоги (рис. 1) по показателям адгезии к бетону и металлу,

обеспеченной однородности прочностных свойств, температуре эксплуатации, меньшего количества конструктивных слоев и наибольшим подтвержденным сроком службы.

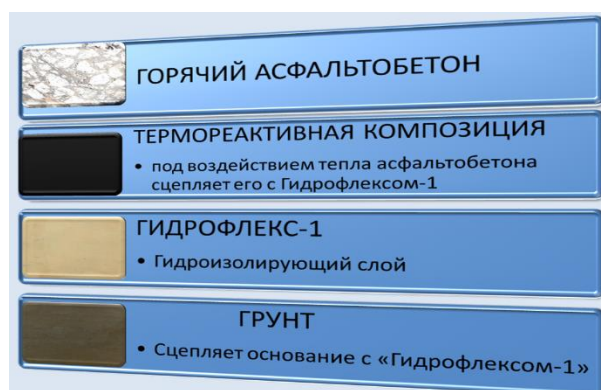


Рисунок 1. Система гидроизоляции на основе эластомера «Гидрофлекс-1» (рисунок ООО НПФ «Современные покрытия», г. Санкт-Петербург)

Figure 1. Waterproofing system based on the elastomer «Hydroflex-1» (drawing by LLC NPF «Modern Coatings», St. Petersburg)

В современных двухкомпонентных установках для распыления полимочевины компоненты подаются под давлением от 150 до 200 атм, и их мгновенное смешивание происходит за счет соударения потоков. Также оборудование для нанесения должно обладать возможностью точной дозировки, обеспечивать предварительный независимый нагрев компонентов для снижения их вязкости, а распылительный пистолет — обладать возможностью регулировки факела.²



Рисунок 2. Применение напыляемых полимерных материалов для гидроизоляции мостовых сооружений на западном скоростном диаметре г. Санкт-Петербурга (фото ООО НПФ «Современные покрытия», г. Санкт-Петербург)

Figure 2. The use of spray-on polymeric materials for waterproofing bridge structures on the western high-speed diameter of St. Petersburg (photo by LLC NPF «Modern Coatings», St. Petersburg)

² <http://pro-polyurea.ru/faq/272.html>.

Как пример, применение ООО НПФ «Современные покрытия» напыляемых полимерных материалов для гидроизоляции мостовых сооружений на основе эластомера «Гидрофлекс-1» на западном скоростном диаметре г. Санкт-Петербурга (участок от ул. Краснопутиловской до ул. Благодатной) представлено на рисунке 2.

В результате патентного исследования и сравнительного анализа полимерных материалов для гидроизоляции мостовых сооружений в качестве объекта исследования выбирается полимерный материал (трехслойная конструкция) отечественного производства «Гидрофлекс-1» и его близкие аналоги по показателям адгезии к бетону и металлу, обеспеченной однородности прочностных свойств, температуре эксплуатации, меньшего количества конструктивных слоев и наибольшим подтвержденным сроком службы [6; 7].

Теплофизическое моделирование технологии устройства напыляемой полимерной гидроизоляции мостовых сооружений

Thermophysical modeling of the spray-on polymeric waterproofing technology of bridge structures

ОДМ 218.2.061-2015 Рекомендации по определению теплофизических свойств дорожно-строительных материалов и грунтов устанавливает рекомендации по определению теплофизических свойств дорожно-строительных материалов и грунтов при исследовании возможного диапазона изменения влажности, плотности и температуры материалов, выбора методов измерения и приборов, обеспечивающих достоверные и воспроизводимые результаты определения теплофизических характеристик материалов дорожных одежд.

Рассматривается задача нахождения температурного поля в области теплообмена внутри твердых тел, которая состоит в определении температуры T в любой точке тела $M(x, y, z)$ в любой момент времени t [8]:

$$T = f(x, y, z, t). \quad (1)$$

Стационарное температурное поле представляется в виде распределения температуры от одной точки поля к другой независимо от времени, нестационарное поле — в виде распределения температуры по координатам x, y, z и во времени t .

При исследовании вопросов переноса тепла через тело, о теплоотводе в окружающую среду, о тепловых потерях и теплоаккумуляции ищут решения уравнения (1) для случаев, являющихся частными решениями основного дифференциального уравнения теплопроводности:

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = C' \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (2)$$

В уравнение (2) входят коэффициент теплопроводности λ и объемная теплоемкость C' . Коэффициент температуропроводности k определяется из λ и C' :

$$k = \frac{\lambda}{C'}. \quad (3)$$

Коэффициент теплопроводности λ равен количеству тепла, проходящему в стационарном состоянии в единицу времени через две противоположные грани единицы объема материала, на которых поддерживается разность температур в 1°C . Эта величина характеризует степень проводимости тепла материалом. Размерность λ — ккал/м*час*град.

Объемная теплоемкость C' численно равна количеству тепла, необходимому на нагревание или охлаждение единицы объема на 1°C . Эта величина характеризует интенсивность изменения температуры тела при его нагревании или охлаждении. Размерность C' — ккал/м³. Размерности k — м²/час, β — ккал/м²*час^{1/2}*град^{1/2}.

Рассматривают изменяющееся во времени температурное поле внутри образца материала, вырезанного по изотермической поверхности. Повышение температуры в образце в данный момент времени связано с накоплением проводимого к нему тепла и будет больше, чем меньше теплоемкость единицы объема образца.

Научное направление технологической теплофизики было создано академиком Н.Н. Рыкалиным. В его основу были положены усовершенствования математической теории теплообмена, в частности метода источников теплоты [8–11].

В математической теплофизике используется метод Грина, его аналог в теплопроводности твердых тел — уравнение Кельвина — фундаментальное решение уравнения теплопроводности. Тепловой процесс в неограниченном теле, вызванный источником теплоты любой формы и интенсивности, действующий постоянно или временно, движущийся или неподвижный, может быть изображен как комбинация температурных полей, создаваемых мгновенными точечными источниками теплоты.

Задача определения областей взаимодействующих теплофизических процессов плоскофакельного напыления нагреваемого полимерного материала гидроизоляции мостовых сооружений имеет три явно выраженных области, влияющих на решение задачи: (а) нижнее полупространство, подложка; (б) рабочее пространство, заполненное остывающим материалом гидроизоляции; (в) верхнее полупространство, атмосфера.

Необходимость разделения объясняется тем, что остывание материала гидроизоляции идет только через верхнее и нижнее полупространства, имеющие первоначально температуру окружающей среды. Здесь опускаются теплофизические процессы на боковых стенках рабочего слоя, т. к. краевые эффекты только усложняют задачу.

Отсюда возникают сложности распределения и переноса тепла в слое рабочего материала. Задача сводится к решению задачи определения теплового поля по вертикали. Источник тепла сосредоточен в рабочем слое, а остывание идет за счет передачи тепла в верхнее и нижнее полупространство.

Проблема также состоит в том, что необходимо учитывать поведение воздушных пузырьков в рабочем слое. Воздушные пузырьки под действием выталкивающей силы поднимаются вверх.

Тепловая задача сводится к решению задачи распределения температуры по вертикали (координата z) и в продольном направлении, считая, что по поперечной координате температура равномерна или линейно уменьшается с уменьшением толщины наносимого слоя и определяется общим остыванием материала. В этом случае интегрирование основного уравнения будет идти отдельно по каждой дискрете поперечной координаты.

Вторая задача: изменение температуры в каждой точке нанесенного слоя гидроизоляции по времени после нанесения до превращения в гелеобразное полимеризуемое состояние. Исходные данные подложки: 5°C и температура материала 80°C . Скорость продольного движения факела 1 м/с , ширина факела $0,5\text{ м}$.

Образование пузырьков воздуха объясняется химической реакцией между компонентами реакционноспособной смеси изоционата и полиамина после ее напыления.

Образование пузырьков смеси газов и пара между каплями рабочей жидкости это начало процесса полимеризации (рис. 3).

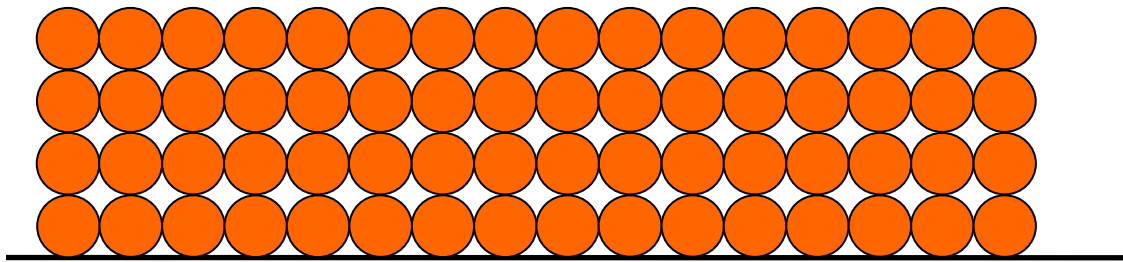


Рисунок 3. *Равномерное распределение пузырьков воздуха в слое напыленной гидроизоляции (рисунок автора)*

Figure 3. *Homogeneous distribution of air bubbles in the sprayed waterproofing layer (author's drawing)*

Дальше происходят процессы миграции пузырьков.

Здесь играет роль скорость отверждения рабочего материала и скорость миграции пузырьков.

Возможны три крайних случая окончания процесса.

- а) Полная миграция. Скорость миграции высока, а застывание материала низкая. В этом случае под действием гравитации все пузырьки благополучно мигрируют к верхней поверхности раздела и выйдут в атмосферу. Получают однородный слой рабочего материала без внутренних пузырьков газа.
- б) Отсутствие миграции. Быстрое застывание материала. В этих условиях, пузырьки, не имея времени для миграции, окажутся запечатаны в местах первоначального образования. Эта структура является структурой пенопласта. Мелкие пузырьки газа, равномерно распределенные в рабочем материале (рис. 4).

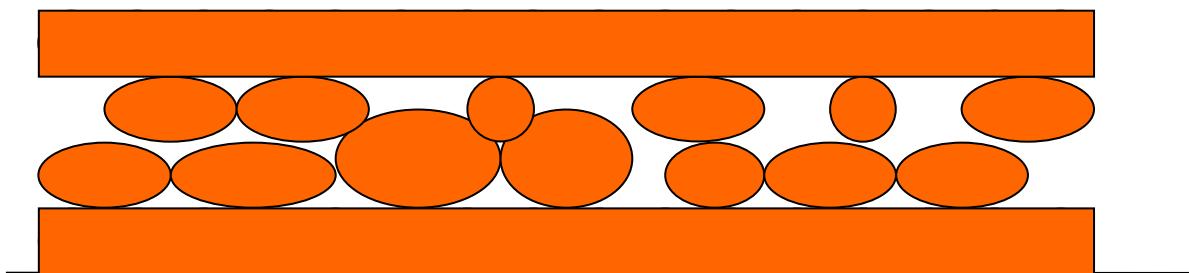


Рисунок 4. *Неравномерное распределение пузырьков в средней части слоя гидроизоляции (рисунок автора)*

Figure 4. *Inhomogeneous distribution of bubbles in the middle part of the waterproofing layer (drawing by the author)*

Кавернообразование. Состоит в том, что пузырьки смеси газов и пара газа мигрируют в средних и верхних слоях рабочего материала и выходят из него с образованием каверн (рис. 5).

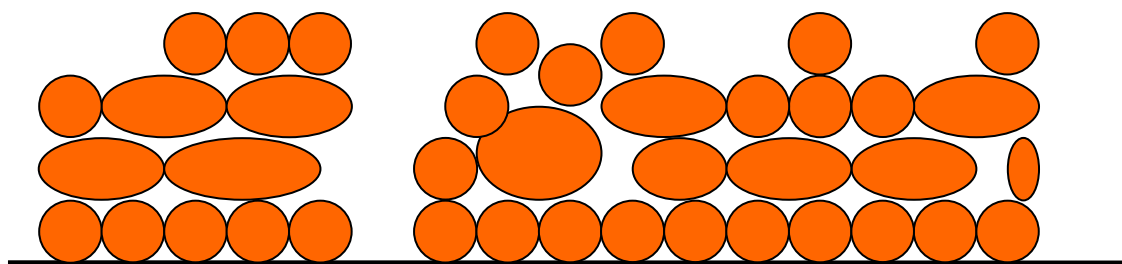


Рисунок 5. Кавернообразование (рисунок автора)

Figure 5. Cavern formation (author's drawing)

В середине находится рыхлый слой, в котором собираются пузырьки, мигрировавшие из нижнего слоя, которые соединяются с пузырьками среднего слоя. Они не успевают мигрировать через уже твердый верхний слой (рис. 6).

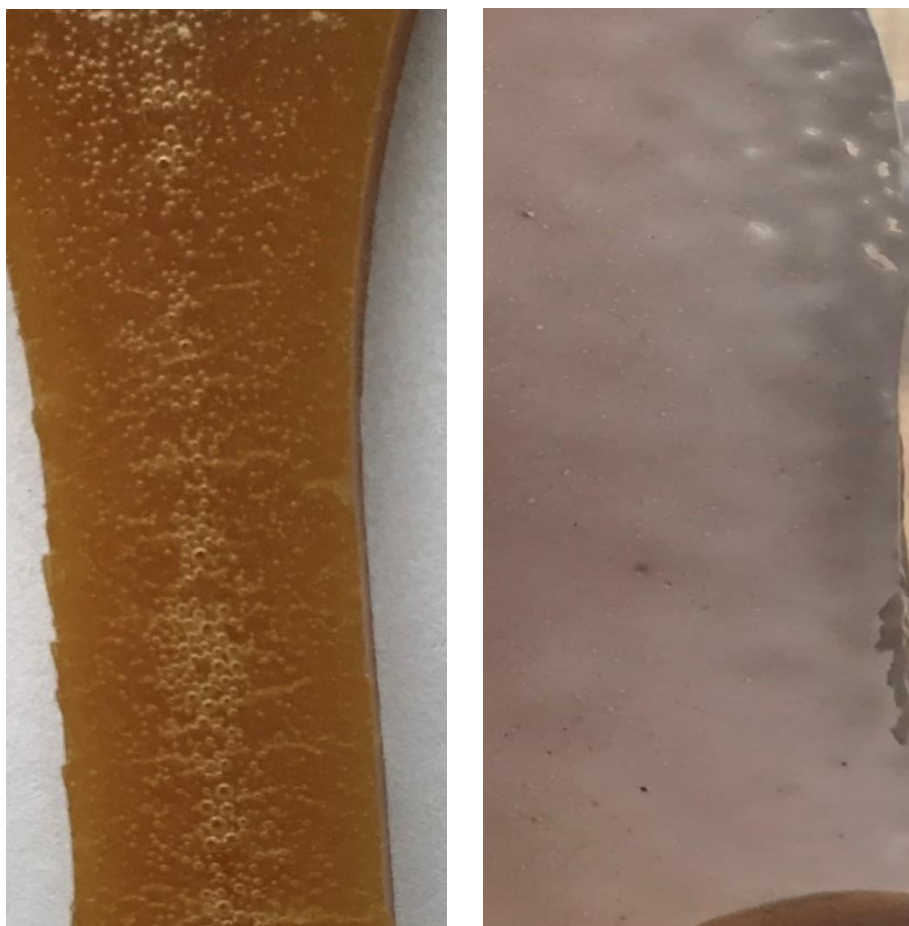


Рисунок 6. Пузырькообразование в теле образца из полимера на основе изоцианата (полиуретана) (рисунок автора)

Figure 6. Bubble formation in the sample body from a polymer based on isocyanate (polyurethane) (author's drawing)

Математическое моделирование

Mathematic modeling

Необходимо рассчитать температурное поле в рабочем слое. Допускается, что задача локализуется в верхней области раздела рабочего материала и атмосферы. Т. к. в нижнем слое, соприкасающегося с подложкой, пузырьки либо успевают мигрировать в средние слои (при высокой степени миграции и медленном охлаждении), либо «запечатываются» в структуру слоя гидроизоляции и не влияют на дальнейшие процессы.

Имеем движущийся фронт однородных мгновенных точечных источников теплоты с одинаковыми теплофизическими и размерными характеристиками, который оставляет слой гидроизоляции с наличием остаточного тепла (рис. 7).

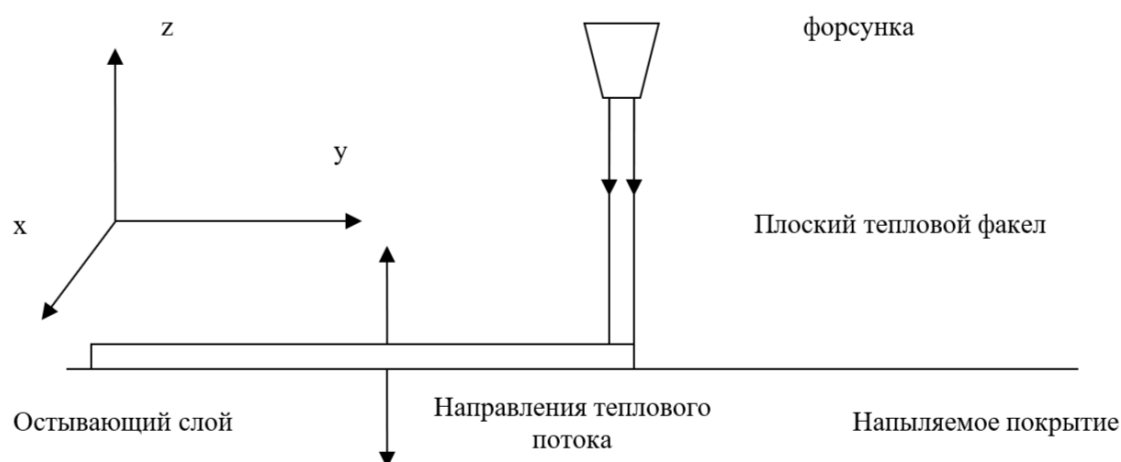


Рисунок 7. Расчетная схема определения показателей теплового механизма взаимодействия остывающего слоя гидроизоляции с атмосферным воздухом и основанием (рисунок автора)

Figure 7. Structural design for determining the indicators of the thermal mechanism of interaction of the waterproofing cooling layer with atmospheric air and the base (author's drawing)

Такое рассмотрение возможно на основе принципа суперпозиции, тепло в этом случае распределяется вверх, взаимодействуя с воздухом и частично излучая, также оно взаимодействует с основанием (плитой ездового полотна мостового сооружения).

Ось y считаем неограниченной. Принимается, что граничных условий для поперечных размеров наносимого слоя гидроизоляции нет.

Должны быть рассчитаны графики изменения температуры во времени и по продольной и вертикальной координатам верхней поверхности слоя гидроизоляции, нижней границы слоя и середины слоя.

Уравнение теплопроводности для точечного источника тепла с различными коэффициентами теплопроводности в различных направлениях [8–11]:

$$c\rho \frac{\partial \Theta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right); \quad (4)$$

тепловые потоки (количество теплоты, проходящее в единицу времени через единицу площади в направлении оси) через три плоскости, перпендикулярные координатным осям, будут равны (соотношения Фурье):

$$q_x = -\lambda_x \frac{\partial \Theta}{\partial x}; \quad q_y = -\lambda_y \frac{\partial \Theta}{\partial y}; \quad q_z = -\lambda_z \frac{\partial \Theta}{\partial z}, \quad (5)$$

где q — тепловой поток; Θ — температура; λ — коэффициент теплопроводности.

Закон Фурье показывает, что тепло распространяется от более высоких температур к более низким.

В предположении, что теплопроводность во всех направлениях одинакова $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z$ уравнение теплопроводности для движущего источника теплоты имеет вид (6) [8]:

$$c\rho \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right), \quad (6)$$

Анализируется слой двухкомпонентной напыляемой нагретой полимерной гидроизоляции на основе изоционата.

Нанесение слоя гидроизоляции является в составе работ по устройству ездового полотна одной из завершающих технологических операций. Часто ее делают ближе к концу года после завершения теплого времени строительного сезона.

При выполнении работ при пониженных температурах был установлен факт увеличения времени живучести материала свеженанесенного слоя гидроизоляции из двухкомпонентной смеси «Гидрофлекс-1» (грунтовка, слой гидроизоляции, термоадгезионный слой) при температурах ниже 10°C. Время прекращения жидкого состояния и перехода в пленочное при пониженных температурах ниже 10°C может составлять до двух и более суток.

При этом нет возможности обеспечить по нанесенному слою гидроизоляции пропуск построечной техники и перемещение рабочих и оборудования. Применение «тепляков» технически решает данную проблему, однако производительность нанесения гидроизоляции уменьшается в 10–15 раз, что в конце года практически неприемлемо.

С целью расширения строительного сезона и ускорения скорости химической реакции между изоцианатом и отвердителем был применен метод нагрева компонентов двухкомпонентной смеси для гидроизоляции.

Экспериментально установлен диапазон рабочих температур компонентов напыляемой смеси от 60°C до 80°C. Такое техническое решение позволило уменьшить время живучести до 2 минут. В дальнейшем химическая реакция может завершаться с уменьшением ее интенсивности до суток, но через указанные две минуты материал гидроизоляции приобретает химически сшитое пленочное состояние (полимеризуется).

Впервые была поставлена научная задача определения времени остывания данного материала от указанного диапазона (от 60°C до 80°C) до заданной температуры (например, 10°C, 40°C).

Результаты ранжирования показали, что доминирующими влияющими факторами и параметрами различной природы являются следующие (в порядке важности влияния):

1. Температура окружающего воздуха.
2. Температура обрабатываемой поверхности.
3. Температуропроводность обрабатываемой поверхности.
4. Скорость ветра.
5. Влажность окружающего воздуха.
6. Пористость обрабатываемой поверхности.

Алгоритм расчета температурного поля при остывании горячей реакционно-способной смеси

Algorithm for calculating the temperature field during cooling of a hot reactive mixture

Начальные условия: Скорость $v = L/t$, м/с — определяется скорость за 1 с. Ширина полосы b , м. Высота h , м. Показатели полимочевины (полиуретана): плотность $\rho = 1\,200$ кг/м³, теплоемкость $c = 1\,470$ Дж/(кг·град), теплопроводность $\chi = 0,32$ Вт/(м·град). Температура: смеси $T_{см} = 80^\circ\text{C}$, окружающей среды $T_{ок} = 5^\circ\text{C}$.³

Произведено вычислительное моделирование. Расчет основан на расчете охлаждения слоя смеси, напыленной на основание за секунду. Толщина пластины равна длине, проходимой факелом за 1 с, длина равна ширине полосы, высота пластины равна высоте полосы.

³ Сведения взяты в том числе из интернет-источника <http://pro-polyurea.ru/faq/272.html>.

За 1 с получим объем пластины:

$$V = L * b * h. \quad (7)$$

Масса пластины:

$$m = V * \rho, \text{ кг} \quad (8)$$

Количество теплоты пластины:

$$Q = m * c * (T_{\text{см}} - T_{\text{ок}}). \quad (9)$$

Расчет начинается с первой пластины (начало напыления).

Первая пластина соприкасается с воздухом с боковых, верхней задней грани и нижней гранью с бетоном. Площадь верхней и нижней грани:

$$S_{\text{в}} = L * b. \quad (10)$$

Площадь боковых граней:

$$S_{\text{б}} = L * h. \quad (11)$$

Площадь задней грани:

$$S_{\text{з}} = b * h. \quad (12)$$

Коэффициент теплоотдачи с воздухом $\alpha_{\text{в}} = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К})$ (по СП 50.13330.2012).

Коэффициент теплоотдачи с бетоном $\alpha_{\text{б}} = 2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К})$ (предположительно).

1. После образования первой пластины начинается остывание, теплопередачей в воздух и бетон. Через 1 с первая пластина отдаст тепло:

- на воздух:

$$Q_{\text{в}} = \alpha_{\text{в}} * 1 (\text{сек}) * (S_{\text{в}} + 2 * S_{\text{б}} + S_{\text{з}}) * (T_{\text{см}} - T_{\text{ок}}); \quad (13)$$

- в бетон:

$$Q_{\text{б}} = \alpha_{\text{б}} * 1 (\text{сек}) * S_{\text{б}} * (T_{\text{см}} - T_{\text{ок}}). \quad (14)$$

Полная потеря тепла:

$$Q^1(1) = Q_{\text{в}} + Q_{\text{б}}. \quad (15)$$

Температура начальной пластины после 1 с:

$$T^1(1)_{\text{см}} = T_{\text{ок}} + e^{-k} (T_{\text{см}} - T_{\text{ок}}). \quad (16)$$

где:

$$k(1) = \frac{\alpha_{\text{в}} * (S_{\text{в}} + 2 * S_{\text{б}} + S_{\text{з}}) + \alpha_{\text{б}} * S_{\text{б}}}{c}. \quad (17)$$

Через две секунды. Потеря тепла первой пластины:

- на воздух:

$$Q_B = \alpha_B * 1 \text{ (сек)} * (S_B + 2 * S_6 + S_3) * (T^1(1)_{\text{см}} - T_{\text{ок}}); \quad (18)$$

- в бетон:

$$Q_6 = \alpha_6 * 1 \text{ (сек)} * S_B * (T^1(1)_{\text{см}} - T_{\text{ок}}). \quad (19)$$

Полная потеря тепла:

$$Q'^1(2) = Q_B + Q_6 \quad (20)$$

Первая пластина не только теряет тепло через внешние грани, но получает тепло через переднюю грань:

$$Q_{\Pi} = \chi * L * 1 \text{ (сек)} * S_3 * (T_{\text{см}} - T^1(1)_{\text{см}}). \quad (21)$$

Т. о. полный баланс тепла первой пластины:

$$Q^1 = Q_{\Pi} - Q'^1(2). \quad (22)$$

Температура первой пластины на второй секунде:

$$T^1(2)_{\text{см}} = T_{\text{ок}} + e^{-k(1)}(T^1(1)_{\text{см}} - T_{\text{ок}}). \quad (23)$$

В общем случае температура первой пластины определяется уравнением:

$$T^1(t)_{\text{см}} = T_{\text{ок}} + e^{-k(1)}(T^1(t-1)_{\text{см}} - T_{\text{ок}}).$$

Здесь T — мгновенная температура пластины; $T_{\text{ок}}$ — температура окружающей среды; t — время в секундах от начала остывания;

$$k(1) = \frac{\alpha_6 * (S_6 + 2 * S_6 + S_3) + \alpha * S_6}{c}. \quad (24)$$

Баланс второй пластины материала определяется потерей тепла через боковые и верхнюю грань в воздух и заднюю грань в материал первой пластины.

Потери в воздух:

$$Q_B = \alpha_B * 1 \text{ (сек)} * (S_B + 2 * S_6) * (T_{\text{см}} - T_{\text{ок}}).$$

Потери в материал равен получению тепла первой пластиной, т. е.:

$$Q_{\Pi} = \chi * L * 1 \text{ (сек)} * S_3 * (T_{\text{см}} - T^1(1)_{\text{см}})$$

Итого потери тепла второй пластиной на второй секунде равны:

$$Q^2(2) = Q_{\Pi} + Q_B. \quad (25)$$

Отсюда температура второй пластины материала после второй секунды:

$$T^2(2)_{\text{см}} = T_{\text{ок}} + e^{-k(2)}(T_{\text{см}} - T_{\text{ок}}). \quad (26)$$

Здесь:

$$k(2) = \frac{\alpha_{\epsilon} * (S_{\epsilon} + 2 * S_{\bar{\epsilon}}) + \chi * L * S_3 + \alpha_{\bar{\epsilon}} * S_{\epsilon}}{c}. \quad (27)$$

В итоге разработан алгоритм расчета по шагам:

1 шаг. Определяется температура первой пластины.

2 шаг. Определяется температура второй пластины T^2 по (2.34), считая температуру первой пластины равной T^1 первой пластины, определенной на первом шаге, температуру второй — равной температуре выливания смеси $T_{\text{см}} = 80^{\circ}\text{C}$.

3 шаг. Определяют температуру третьей пластины, считая $T^3 = T_{\text{см}} = 80^{\circ}\text{C}$, температуру второй T^2 и первой T^1 пластин, равной температурам определенных на предыдущем шаге.

N шаг (начиная с третьего). Определяется температура T^n , n-ой пластины по формуле:

$$T^n(t)_{\text{см}} = T_{\text{ок}} + e^{-k(t)}(T_{\text{см}} - T_{\text{ок}}). \quad (28)$$

Здесь:

$$k(t) = \frac{\alpha_{\epsilon} * (S_{\epsilon} + 2 * S_{\bar{\epsilon}}) + \chi * L * S_3 + \alpha_{\bar{\epsilon}} * S_{\epsilon}}{c}. \quad (29)$$

Температура промежуточных пластин, исключая первую и последнюю, определяется:

$$T^i(t)_{\text{см}} = T_{\text{ок}} + e^{-k(t)}(T^{(i-1)}(t-1)_{\text{см}} - T_{\text{ок}}). \quad (30)$$

$T^{(i-1)}(t-1)_{\text{см}}$ — температура смеси в (i-1) — ой пластине, определенной на предыдущем шаге. Т. о. определяется температура вплоть до второй пластины.

Примечание. Расчет на каждом шаге начинается с последней пластины и заканчивается на пластине, в которой температура сравнивается с температурой окружающей среды.

Результаты

Results

Разработан программный комплекс компьютерного моделирования на основе модели технологической теплофизики. Процесс и результаты вычислительного моделирования теплофизического взаимодействия плоского факела распределения горячей смеси гидроизоляции с обрабатываемой поверхностью представлены на рисунке 8.

Алгоритм расчета температурного поля при остывании горячей реакционно-способной смеси

Алгоритм реализует расчет охлаждения пластины смеси, падающей на основание за единицу времени, принятой за шаг вычислений.

ORIGIN := 1 Настраиваем используемые массивы и матрицы (будут начинаться с 1)

Начальные условия

t := 20 Шаг, с которым производятся вычисления, сек

v := 0.2 Скорость перемещения факела, м/сек

b := 2.5 Ширина полосы, м

h := 0.0015 Высота, м

ρ := 1200 Плотность, кг/м³

c := 1470 Теплоемкость, Дж/(кг·град)

χ := 0.32 Теплопроводность, Вт/(м·град)

Tсм := 80 Температура смеси, °C

Ток := 5 Температура окружающей среды, °C

ΔT := 1 Максимальная разница между температурой первой пластины и температурой окружающей среды, при которой расчет прекращается, °C

L := v · t = 4 Расстояние, проходимое факелом за единицу времени, м

αв := 23 Коэффициент теплоотдачи с воздухом, Вт/(м²·K)

αб := 2 Коэффициент теплоотдачи с бетоном, Вт/(м²·K)

V := L · b · h = 0.015 Объем пластины, сформированной за единицу времени, м³

m := V · ρ = 18 Масса пластины, сформированной за единицу времени, кг

Q := m · c · (Tсм – Ток) = 1.984 × 10⁶ Количество теплоты пластины, Дж

Sвн := L · b = 10 Площадь верхней и нижней граней, м²

Sб := L · h = 6 × 10⁻³ Площадь боковых граней, м²

Sзп := b · h = 3.75 × 10⁻³ Площадь задней и передней граней, м²

i := 2 Номер пластины

j := 2 Количество временных промежутков от начала формирования первой пластины (общее количество пластин в данной итерации)

N := 2 Номер итерации

трек_{1,1} := 1 Текущее время на каждом шаге итерации

трек_{1,2} := t = 20

Расчет

Расчет начинается с первой пластины (начало напыления) на момент времени, равный моменту окончания формирования первой пластины плюс 1 расчетная единица времени. Первая пластина соприкасается с воздухом боковыми, верхней и задней гранями. А также нижней гранью с бетоном. После образования первой пластины начинается остывание теплопередачей в воздух и бетон. Кроме того, она соприкасается передней гранью со следующей пластиной.

Через 1 расчетную единицу времени первая пластина отдаст тепло:

$$Q_{\text{В}} := \alpha_{\text{В}} \cdot t \cdot (S_{\text{ВН}} + 2 \cdot S_{\text{Б}} + S_{\text{ЗП}}) \cdot (T_{\text{СМ}} - T_{\text{ОК}}) = 3.455 \times 10^5 \quad \text{в воздух}$$

$$Q_{\text{В}} = 3.455 \times 10^5$$

$$Q_{\text{Б}} := \alpha_{\text{Б}} \cdot t \cdot S_{\text{ВН}} \cdot (T_{\text{СМ}} - T_{\text{ОК}}) = 3 \times 10^4 \quad \text{в бетон}$$

$$Q_{\text{Б}} = 3 \times 10^4$$

На этом шаге разница температур между первой и второй пластиной отсутствует, поэтому поступление тепла через переднюю грань первой пластины не учитываем.

Полная потеря тепла и температура первой пластины по окончании 1 расчетной единицы времени в первой итерации:

$$Q_{1,1} := Q_{\text{В}} + Q_{\text{Б}}$$

$$Q_{1,1} = 3.755 \times 10^5$$

$$k_1 := \frac{\alpha_{\text{В}} \cdot (S_{\text{ВН}} + 2 \cdot S_{\text{Б}} + S_{\text{ЗП}}) + \alpha_{\text{Б}} \cdot S_{\text{ВН}}}{c}$$

$$k_1 = 0.17$$

$$T_{1,1} := T_{\text{ОК}} + e^{-k_1} \cdot (T_{\text{СМ}} - T_{\text{ОК}})$$

$$T_{1,1} = 68.255$$

Во второй итерации рассчитывается температура второй и первой пластин через 2 расчетных единицы времени.

Баланс второй пластины материала определяется потерей тепла через боковые и верхнюю грани в воздух, нижнюю грань в бетон, и заднюю грань в материал первой пластины.

$$Q_{\text{В}} := \alpha_{\text{В}} \cdot t \cdot (S_{\text{ВН}} + 2 \cdot S_{\text{Б}}) \cdot (T_{\text{СМ}} - T_{\text{ОК}}) \quad \text{в воздух}$$

$$Q_{\text{В}} = 3.454 \times 10^5$$

$$Q_{\text{Б}} := \alpha_{\text{Б}} \cdot t \cdot S_{\text{ВН}} \cdot (T_{\text{СМ}} - T_{\text{ОК}}) = 3 \times 10^4 \quad \text{в бетон}$$

$$Q_{\text{ПЛЗ}} := \chi \cdot L \cdot t \cdot S_{\text{ЗП}} \cdot (T_{\text{СМ}} - T_{1,1}) \quad \text{в материал первой пластины}$$

$$Q_{\text{ПЛЗ}} = 1.128$$

Полная потеря тепла и температура второй пластины по результатам второй итерации:

$$Q_{2,2} := Q_{\text{ПЛЗ}} + Q_{\text{В}} + Q_{\text{Б}}$$

$$Q_{2,2} = 3.754 \times 10^5$$

$$Q_{\text{ПОЛ}} := Q_{2,2}$$

$$k_2 := \frac{\alpha_{\text{В}} \cdot (S_{\text{ВН}} + 2 \cdot S_{\text{Б}}) + \chi \cdot L \cdot S_{\text{ЗП}} + \alpha_{\text{Б}} \cdot S_{\text{ВН}}}{c}$$

$$k_2 = 0.17$$

$$T_{2,2} := T_{\text{ОК}} + e^{-k_2} (T_{\text{СМ}} - T_{\text{ОК}})$$

$$T_{2,2} = 68.258$$

Поготовливаем переменную для суммирования тепловых потерь 2-й пластиной

Баланс первой пластины материала определяется потерей тепла через боковые, заднюю и верхнюю грани в воздух, и нижнюю грань в бетон. Однако, первая пластина не только теряет тепло через внешние грани, но получает тепло через переднюю грань от второй пластины, количество которого равно количеству тепла отданного второй пластиной через заднюю грань.

$$Q_{\text{В}} := \alpha_{\text{В}} \cdot t \cdot (S_{\text{ВН}} + 2 \cdot S_{\text{Б}} + S_{\text{ЗП}}) \cdot (T_{1,1} - T_{\text{ОК}})$$

в воздух

$$Q_{\text{В}} = 2.914 \times 10^5$$

$$Q_{\text{Б}} := \alpha_{\text{Б}} \cdot t \cdot S_{\text{ВН}} \cdot (T_{1,1} - T_{\text{ОК}})$$

в бетон

$$Q_{\text{Б}} = 2.53 \times 10^4$$

$$Q_{\text{ПЛЗ}} := \chi \cdot L \cdot t \cdot S_{\text{ЗП}} \cdot (T_{\text{СМ}} - T_{1,1})$$

от материала второй пластины

$$Q_{\text{ПЛЗ}} = 1.128$$

Полная потеря тепла и температура первой пластины по результатам второй итерации:

$$Q_{1,2} := Q_{\text{В}} + Q_{\text{Б}} - Q_{\text{ПЛЗ}}$$

$$Q_{1,2} = 3.167 \times 10^5$$

$$k_1 := \frac{\alpha_{\text{В}} \cdot (S_{\text{ВН}} + 2 \cdot S_{\text{Б}} + S_{\text{ЗП}}) + \alpha_{\text{Б}} \cdot S_{\text{ВН}}}{c}$$

$$k_1 = 0.17$$

$$T_{1,2} := T_{\text{ОК}} + e^{-k_1} (T_{1,1} - T_{\text{ОК}})$$

$$T_{1,2} = 58.349$$

Записываем в массив данных временные метки для второго шага вычислений, которые будут нужны для определения времени остывания, если временной шаг, с которым производятся вычисления, будет отличен от 1 сек.

$$t_{\text{тек}}_{2,1} := 2 = 2$$

$$t_{\text{тек}}_{2,2} := j \cdot t \quad t_{\text{тек}}_{2,2} = 40$$

В цикле рассчитываем N итераций, начиная с третьей. Расчет заканчивается в случае, когда разница температур второй пластины и окружающей среды не будет превышать ΔT .

$$Q_B = 2.914 \times 10^5$$

$$Q_6 = 2.53 \times 10^4$$

$\begin{pmatrix} i \\ i \\ N \\ \text{трек} \\ Q_{\text{пол}} \\ Q \\ T \end{pmatrix} :=$	$Q \leftarrow Q$ $T \leftarrow T$ $Q_B \leftarrow Q_B$ $Q_6 \leftarrow Q_6$ $Q_{\text{плз}} \leftarrow Q_{\text{плз}}$ $Q_{\text{плп}} \leftarrow Q_{\text{плп}}$ $S_{BH} \leftarrow S_{BH}$ $S_{3П} \leftarrow S_{3П}$ $S_6 \leftarrow S_6$ $T_{CM} \leftarrow T_{CM}$ $T_{OK} \leftarrow T_{OK}$ $L \leftarrow L$ $\chi \leftarrow \chi$ $t \leftarrow t$ $\alpha_B \leftarrow \alpha_B$ $\alpha_6 \leftarrow \alpha_6$ $k_1 \leftarrow k_1$ $k_2 \leftarrow k_2$ $Q_{\text{пол}} \leftarrow Q_{\text{пол}}$ $\text{трек} \leftarrow \text{трек}$ while $T_{2,N} \geq \Delta T + T_{OK}$ $N \leftarrow N + 1$ $i \leftarrow N$ $j \leftarrow N$ $Q_B \leftarrow \alpha_B \cdot t \cdot (S_{BH} + 2 \cdot S_6) \cdot (T_{CM} - T_{OK})$ $Q_6 \leftarrow \alpha_6 \cdot t \cdot S_{BH} \cdot (T_{CM} - T_{OK})$ $Q_{\text{плз}} \leftarrow \chi \cdot L \cdot t \cdot S_{3П} \cdot (T_{CM} - T_{i-1,j-1})$ $Q_{i,j} \leftarrow Q_{\text{плз}} + Q_B + Q_6$ $T_{i,j} \leftarrow T_{OK} + e^{-k_2} (T_{CM} - T_{OK})$ for $i \in N - 1, N - 2 \dots 2$	Передаем во все локальные переменные, используемые в программном модуле, значения глобальных переменных Номер итерации Номер пластины Номер шага внутри итерации Расчет N-й (последней пластины) ..
---	--	---

$Q_B \leftarrow \alpha_B \cdot t \cdot (S_{BH} + 2 \cdot S_5) \cdot (T_{i,j-1} - T_{OK})$	Цикл для расчета i-х (промежуточных) пластин
$Q_6 \leftarrow \alpha_6 \cdot t \cdot S_{BH} \cdot (T_{i,j-1} - T_{OK})$	
$Q_{ПШ} \leftarrow Q_{ПТЗ}$	
$Q_{ПТЗ} \leftarrow \chi \cdot L \cdot t \cdot S_{ЗП} \cdot (T_{i,j-1} - T_{i-1,j-1})$	
$Q_{i,j} \leftarrow Q_{ПТЗ} + Q_B + Q_6 - Q_{ПШ}$	
$T_{i,j} \leftarrow T_{OK} + e^{-k_2} (T_{i,j-1} - T_{OK})$	
$Q_{ПОЛ} \leftarrow Q_{ПОЛ} + Q_{2,j}$	Накапливаем значения потерь тепла 2-й пластиной
$Q_B \leftarrow \alpha_B \cdot t \cdot (S_{BH} + 2 \cdot S_5 + S_{ЗП}) \cdot (T_{1,j-1} - T_{OK})$	Расчет первой пластины
$Q_6 \leftarrow \alpha_6 \cdot t \cdot S_{BH} \cdot (T_{1,j-1} - T_{OK})$	
$Q_{ПШ} \leftarrow Q_{ПТЗ}$	
$Q_{1,j} \leftarrow Q_B + Q_6 - Q_{ПШ}$	
$T_{1,j} \leftarrow T_{OK} + e^{-k_1} (T_{1,j-1} - T_{OK})$	
$t_{текj,1} \leftarrow j$	Записываем в массив данных временные метки для N-го шага вычислений
$t_{текj,2} \leftarrow j \cdot t$	
$\begin{pmatrix} i \\ j \\ N \\ t_{тек} \\ Q_{ПОЛ} \\ Q \\ T \end{pmatrix}$	

Вычисления завершены.

Выполнено итераций $N - 1 = 26$

Температура окружающей среды ($^{\circ}\text{C}$) $T_{OK} = 5$

Достигнутая разница температур ($^{\circ}\text{C}$) $\Delta T = 1$

Температура 2 пластины опустилась до ($^{\circ}\text{C}$) $T_{2,N} = 5.897$

Время остывания 2-й пластины с момента формирования составило (сек) $t_{текj-1,2} = 520$

Потери тепла 2-й пластиной составили (Дж) $Q_{ПОЛ} = 2.369 \times 10^6$

Расчетные теплотери пластин при остывании горячей реакционно-способной смеси (Дж)

№ п/п стипня	№ итерации																										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	375543	316732	267132	225259	190017	160260	135163	113997	96145	81088	68390	57680	48647	41029	34604	29185	24615	20760	17509	14767	12454	10504	8859	7472	6302	5315	4483
2	0	375415	316641	267070	225259	189994	160250	135162	114002	96155	81101	68404	57696	48663	41045	34619	29199	24628	20772	17520	14778	12464	10513	8867	7479	6308	5320
3	0	0	375415	316641	267070	225259	189994	160250	135162	114002	96155	81101	68404	57696	48663	41045	34619	29199	24628	20772	17520	14778	12464	10513	8867	7479	6308
4	0	0	0	375415	316641	267070	225259	189994	160250	135162	114002	96155	81101	68404	57696	48663	41045	34619	29199	24628	20772	17520	14778	12464	10513	8867	7479
5	0	0	0	0	375415	316641	267070	225259	189994	160250	135162	114002	96155	81101	68404	57696	48663	41045	34619	29199	24628	20772	17520	14778	12464	10513	8867
6	0	0	0	0	0	375415	316641	267070	225259	189994	160250	135162	114002	96155	81101	68404	57696	48663	41045	34619	29199	24628	20772	17520	14778	12464	10513
7	0	0	0	0	0	0	375415	316641	267070	225259	189994	160250	135162	114002	96155	81101	68404	57696	48663	41045	34619	29199	24628	20772	17520	14778	12464
8	0	0	0	0	0	0	0	375415	316641	267070	225259	189994	160250	135162	114002	96155	81101	68404	57696	48663	41045	34619	29199	24628	20772	17520	14778
9	0	0	0	0	0	0	0	0	375415	316641	267070	225259	189994	160250	135162	114002	96155	81101	68404	57696	48663	41045	34619	29199	24628	20772	17520
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	375415	316641	267070	225259	189994	160250	135162	114002	96155	81101	68404	57696	48663	41045	34619	29199	24628	20772
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	375415	316641	267070	225259	189994	160250	135162	114002	96155	81101	68404	57696	48663	41045	34619	29199	24628
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	375415	316641	267070	225259	189994	160250	135162	114002	96155	81101	68404	57696	48663	41045	34619	29199
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	375415	316641	267070	225259	189994	160250	135162	114002	96155	81101	68404	57696	48663	41045	34619
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	375415	316641	267070	225259	189994	160250	135162	114002	96155	81101	68404	57696	48663	41045
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	375415	316641	267070	225259	189994	160250	135162	114002	96155	81101	68404	57696	48663
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	375415	316641	267070	225259	189994	160250	135162	114002	96155	81101	68404	57696
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	375415	316641	267070	225259	189994	160250	135162	114002	96155	81101	68404
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	375415	316641	267070	225259	189994	160250	135162	114002	96155	81101
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	375415	316641	267070	225259	189994	160250	135162	114002	96155
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	375415	316641	267070	225259	189994	160250	135162	114002
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	375415	316641	267070	225259	189994	160250	135162
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	375415	316641	267070	225259	189994	160250
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	375415	316641	267070	225259	189994
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	375415	316641	267070	225259
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	375415	316641	267070
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	375415	316641
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	375415

Расчетные температуры пластин при остывании горячей реакционно-способной смеси (°C)

[illegible]

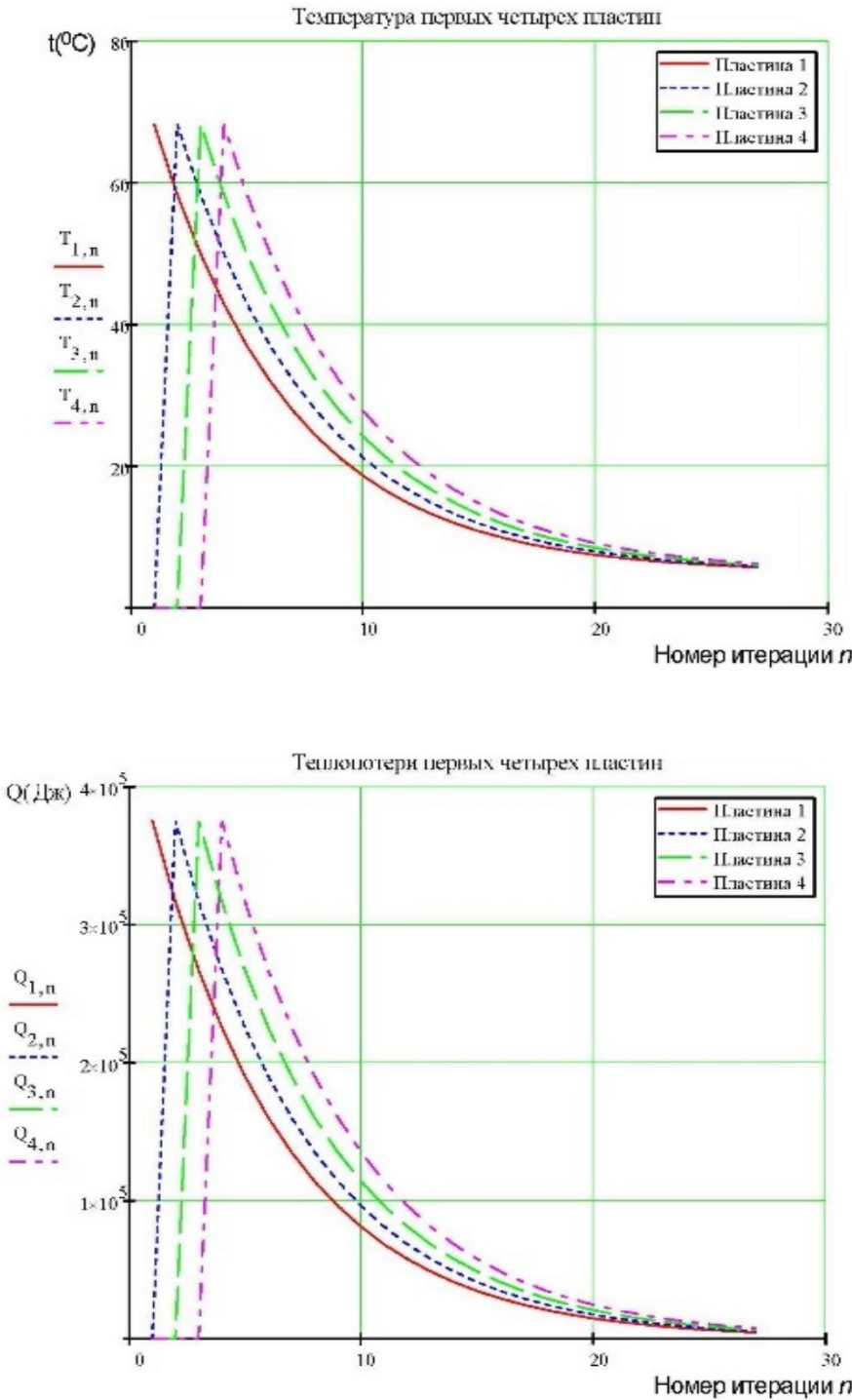
Визуализация результатов

Строим графики изменения температуры и тепловых потерь на каждом шаге расчета для первых четырех пластин.

$N = 27$
 $n := 1..N \quad k := 1..N$

Соответствие номера итерации и времени, прошедшего с начала формирования второй пластины

N	сек
1	20
2	40
3	60
4	80
5	100
6	120
7	140
8	160
9	180
10	200
11	220
12	240
13	260
14	280
15	300
16	320
17	340
18	360
19	380
20	400
21	420
22	440
23	460
24	480
25	500
26	520
27	540



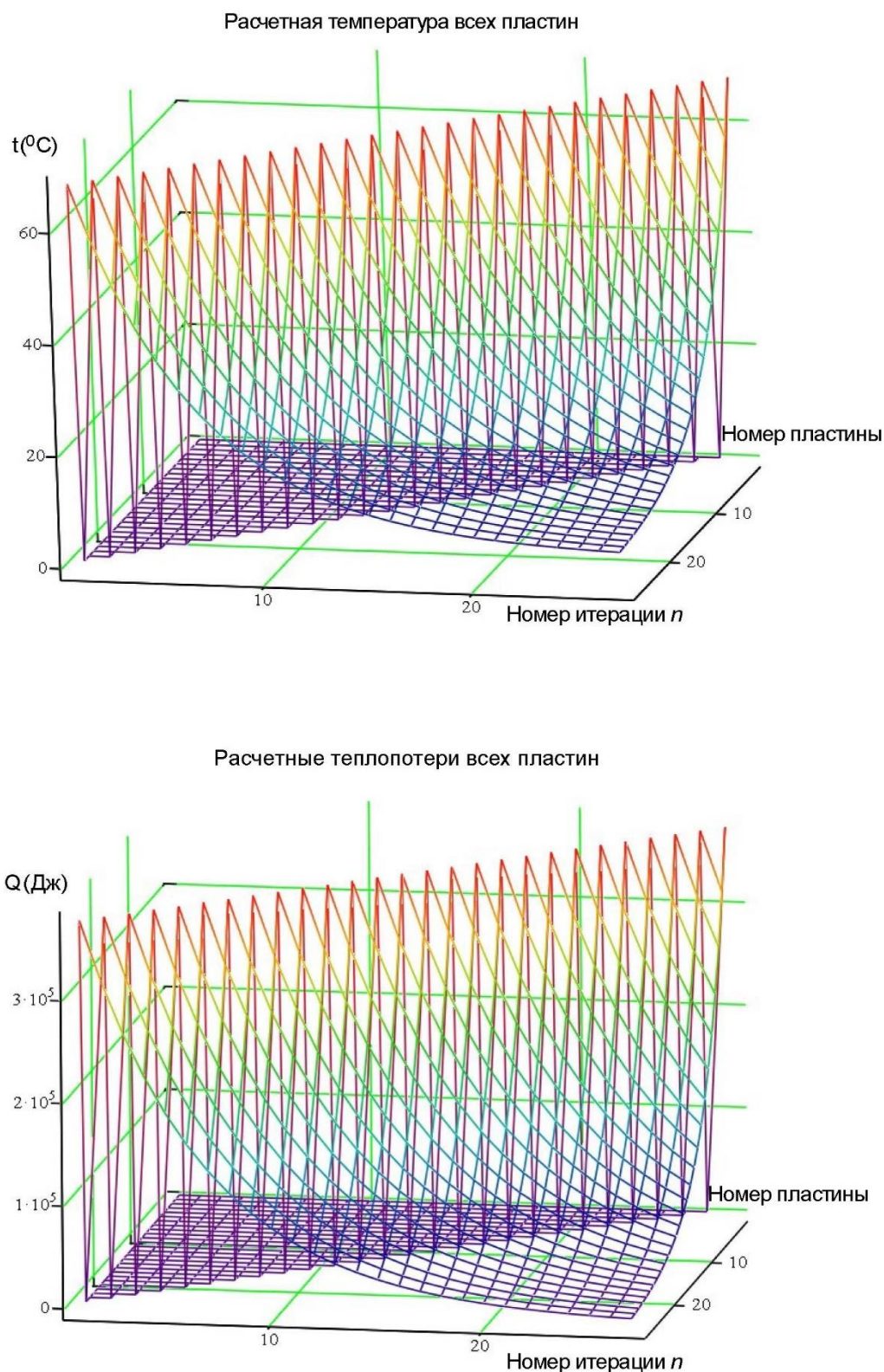


Рисунок 8. Процесс и результаты вычислительного моделирования теплофизического взаимодействия плоского факела распределения горячей двухкомпонентной смеси с обрабатываемой поверхностью (рисунок автора)

Figure 8. The process and results of computational modeling of the thermophysical interaction of a flat flame of hot two-component mixture distribution with a treated surface (drawing by the author)

В результате вычислительного моделирования получено, что время остывания нанесенной смеси до температуры 20°C составило от 30 с до 2 минут.

Производственный эксперимент по нанесению горячей на гидроизоляции на мосту в г. Архангельске

Industrial experiment on applying hot water to waterproofing on a bridge in Arkhangelsk

Время производственного эксперимента 19–20 октября 2021 г. Окружающая температура от 0°C до 5°C. Слабый снег, работы проводились в тепляке. Материал выравнивающего слоя под гидроизоляцию — цементобетон, асфальтобетон, полиэтиленовая пленка, насыпной слой щебня. Материал гидроизоляции: двухкомпонентная грунтовка, двухкомпонентная гидроизоляция на основе изоционата (полимочевина, поликарбамид).

Особенности нанесения: плоскофакельное безвоздушное нанесение горячей гидроизоляционной двухкомпонентной полимерной смеси.

Время до превращения в гель (полимеризация): от 1 до 5 минут. Время полного отверждения (завершения химической реакции): 1 сутки.

Температура двухкомпонентной смеси: 20°C, 40°C, 60°C, 80°C.

Фоторепортаж о практических исследованиях на Краснофлотском мосту через р. Северная Двина в г. Архангельске представлен на рисунке 9.



Рисунок 9. Оборудование для подготовки компонентов и смесей для гидроизоляции (фото автора)

Figure 9. Equipment for the components and mixtures preparation for waterproofing (author's photo)

Образование каверн из-за пузырькообразования в образце из полимочевины, достигнутое путем регулирования (понижение относительно оптимальной) температуры смеси, представлено на рисунке 10.



Рисунок 10. Образование каверн из-за пузырькообразования в образце из полимочевины (фото автора)

Figure 10. Cavities formation due to bubble formation in a polyurea sample (author's photo)

Необходимо отметить, что сама технология достаточно отработана и в нормальных условиях риск образования каверн минимален. Исследовался опыт сотрудников ООО НПФ «Современные покрытия» нанесения слоев гидроизоляции при пониженных температурах. Установлено, что нанесение слоя гидроизоляции плоским факелом соответствует закону нормального распределения. Экспериментально установлена толщина слоя гидроизоляции, до которой происходит интенсивное кавернообразование — 1,1 мм. Больше этой толщины вероятность образования дефектов уменьшается до минимума. Экспериментально установлено, что точечное кавернообразование происходит на склонах участков с максимальными неровностями (наибольшей глубиной впадины относительно соседнего выступа).

Впервые установлен механизм образования каверн (нарушения целостности) в слое гидроизоляции на склоне выступа макрошероховатости, связанный с температурой и расходом напыляемой смеси, временем остывания, а также углом и высотой выступа макрошероховатости. Неостывшие точки напыленного полимера видны на рисунке 11.

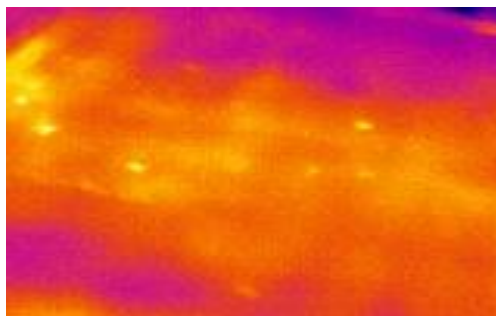


Рисунок 11. Изображение с тепловизора Testo 881-2 участка напыленной сталежелезобетонной плиты размера 2x4 м в течение десятой минуты (фото автора)

Figure 11. Image from the thermal imager Testo 881-2 of a section of a sprayed steel-reinforced concrete slab 2x4 m in size for the tenth minute (photo by the author)

Discussion

Обсуждение

Результаты математического теплофизического моделирования были подтверждены на практике посредством визуализации температурного поля напыленного горячего слоя гидроизоляции с помощью тепловизора.

Отклонение погрешности расчета от результатов натурных измерений составило не более 5°C.

Статьи из зарубежных наукометрических баз данных по теме исследования отражены в перечне [12–21].

Conclusion

Заключение

1. Усовершенствована технология устройства напыляемой полимерной трехслойной гидроизоляции сталежелезобетонных и металлических ортотропных плит мостовых сооружений при их ремонте при пониженных температурах ниже 10°C с целью расширения строительного сезона с учетом теплофизического моделирования и нормирования геометрических и статистических параметров макрошероховатости, а также результатов ранжирования доминирующих факторов, влияющих на изменение теплофизического взаимодействия.

2. Предложено новое применение теплофизической модели и алгоритм вычисления показателей процесса теплофизического взаимодействия нагретого напыленного слоя гидроизоляции с основанием. Результаты теплофизического моделирования подтверждены на практике посредством тепловизора. В результате вычислительного

моделирования получено, что время остывания нанесенной смеси до температуры 20°C составило от 30 с до 2 минут.

3. Впервые установлен механизм образования каверн (нарушения целостности) в слое гидроизоляции на склоне выступа макрошероховатости, связанный с температурой и расходом напыляемой смеси, временем остывания, а также углом и высотой выступа макрошероховатости. Точечное кавернообразование происходит на склонах участков с максимальными неровностями, что связано с температурой и расходом напыляемой смеси, временем остывания, а также углом и высотой выступа макрошероховатости.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дубиняк, А.Н.** Гидроизоляционные материалы для защиты конструкций транспортных сооружений / А.Н. Дубиняк, И.И. Овчинников. — DOI <https://doi.org/10.15862/21SATS220> // Транспортные сооружения. — 2020. — Т 7. — № 2. — С. 21SATS220. — URL: <https://t-s.today/21SATS220.html>. — EDN DNRFFE. (дата обращения: 08.04.2023).
2. **Казарян, В.Ю.** Гидроизоляционные материалы для мостовых сооружений / В.Ю. Казарян, И.Д. Сахарова // Мир дорог. — 2005. — № 16. — С. 38–40.
3. **Овчинников, И.И.** Систематизация и сравнительный анализ различных типов гидроизоляции, применяемых на автодорожных мостовых сооружениях / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, Ш.Н. Валиев, С.В. Жаденова // Интернет-журнал Науковедение. — 2013. — № 2. — С. 56TVN513. — URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/56tvn513.pdf>. — EDN RXOXFR. (дата обращения: 08.04.2023).
4. **Захаров, О.В.** Методические основы гармонического анализа круглограмм / О.В. Захаров, В.В. Погораздов, А.В. Кочетков // Метрология. — 2004. — № 6. — С. 3–10.
5. **Кочетков, А.В.** Ремонт аварийного малого моста нестандартной конструкции с помощью преднапряженных мостовых сеток и битумной суспензии / А.В. Кочетков, А.Н. Каменских, И.Г. Шашков. — DOI <https://doi.org/10.15862/04SATS222> // Транспортные сооружения. — 2022. — Т 9. — № 2. — С. 04SATS222. — URL: <https://t-s.today/04SATS222.html>. — EDN TGANUG. (дата обращения: 08.04.2023).
6. **Валиев, Ш.Н.** Полимерные напыляемые материалы для устройства гидроизоляции мостовых сооружений / Ш.Н. Валиев, А.Н. Каменских, И.Г. Петрович, П.А. Журавлев. — М.: ООО «Строинформиздат», 2022. — 187 с.
7. **Каменских, А.Н.** Секрет долговечности / А.Н. Каменских // Автомобильные дороги. — 2023. — № 3. — С. 64–67. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50391717>. — EDN HRUMXQ. (дата обращения: 08.04.2023).
8. **Барац, Я.И.** Математические модели технологической теплофизики и физических взаимодействий / Я.И. Барац, И.А. Маслякова, Ф.Я. Барац. — Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2002. — 92 с.
9. **Барац, Я.И.** Метод расщепления уравнения теплопроводности при решении теплофизических задач, возникающих при механической обработке / Я.И. Барац, Л.Р. Милованова // Вестник Саратовского государственного технического университета. — 2010. — Т 1. — № 1. — С. 28–34. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18725580>. — EDN PTUBQD. (дата обращения: 10.04.2023).
10. **Аржанухина, С.П.** Учет теплофизических характеристик противогололедных материалов при зимнем содержании автомобильных дорог / С.П. Аржанухина, А.В. Бобков, А.В. Кочетков, Д.А. Кочетков. — Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. — 220 с.
11. **Карабутов, Н.Н.** Синтез математических моделей для исследования свойств полимеробетона в системе автоматизированной диагностики дорожных покрытий / Н.Н. Карабутов, Б.А. Бондарев, А.М. Шмырин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2006. — № 4. — С. 27–30. — URL: <http://pribor.tgizd.ru/ru/arhiv/7634>. — EDN KXKVCN. (дата обращения: 10.04.2023).

12. **Bramel, B.K.** Asphalt Plug Joints — material characterization and specification / B.K. Bramel, C.W. Dolan, J.A. Puckett, K. Ksaibati. — Ларамы: Wyoming Department of Transportation, 2002. — 59 p.
13. **Cheng, Y.** Low-Temperature Performance and Damage Constitutive Model of Eco-Friendly Basalt Fiber-Diatomite-Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles / Y. Cheng, D. Yu, G. Tan, C. Zhu. — DOI <https://doi.org/10.3390/ma11112148> // Materials. — 2018. — V 11. — № 11. — P. 2148. — URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/11/11/2148>. (дата обращения: 10.04.2023).
14. **Celauro, C.** Asphalt mixtures modified with basalt fibres for surface courses / C. Celauro, F. G. Praticò. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.058> // Construction and Building Materials. — 2018. — V 170. — P. 245–253. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818305415>. (дата обращения: 10.04.2023).
15. **Gong, Y.** Microstructure Analysis of Modified Asphalt Mixtures under Freeze-Thaw Cycles Based on CT Scanning Technology / Y. Gong, H. Bi, C. Liang, S. Wang. — DOI <https://doi.org/10.3390/app8112191> // Applied Sciences. — 2018. — V 8. — № 11. — P. 2191. — URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/11/2191>. (дата обращения: 10.04.2023).
16. **Qin, X.** Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers / X. Qin, A. Shen, Y. Guo, Z. Li, Z. Lv. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012> // Construction and Building Materials. — 2018. — V 159. — P. 508–516. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817322225>. (дата обращения: 10.04.2023).
17. **Gong, Y.** Pavement Performance Investigation of Nano-TiO₂/CaCO₃ and Basalt Fiber Composite Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles / Y. Gong, H. Bi, Z. Tian, G. Tan. — DOI <https://doi.org/10.3390/app8122581> // Applied Sciences. — 2018. — V 8. — № 12. — P. 2581. — URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/12/2581>. (дата обращения: 10.04.2023).
18. **Zakharchenko, M.Y.** New system of functional parameters for surface texture analysis / M.Y. Zakharchenko, A.V. Kochetkov, P.M. Salov, O.V. Zakharov. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.488> // Materials Today: Proceedings. — 2020. — № 38, Part 4. — P. 1866–1870. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785320363707>. (дата обращения: 10.04.2023).
19. **Zadiraka, A.A.** Technology for laying and strengthening transportation facilities based on a polyurethane composite / A.A. Zadiraka, N.Ye. Kokodeeva, A.V. Kochetkov. — DOI <https://doi.org/10.25987/VSTU.2018.41.1.008> // Russian Journal of Building Construction and Architecture. — 2019. — № 1. — P. 77–83. — URL: <https://vestnikvgasu.wmsite.ru/ftpgetfile.php?id=690>. — EDN YXBCRF. (дата обращения: 10.04.2023).
20. **Yalovoy, O.A.** The Centerless Measurement of Roundness with Optimal Adjustment / O.A. Yalovoy, O.V. Zakharov, A.V. Kochetkov. — DOI <https://doi.org/10.1088/1757-899X/93/1/012024> // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 93, 21th International Conference for Students and Young Scientists: Modern Technique and Technologies (MTT'2015) 5–9 October 2015, Tomsk, Russia / Томск: IOP Publishing Ltd, 2015. — P. 12024. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24970866>. — EDN VALJNF. (дата обращения: 10.04.2023).
21. **Korolev, A.A.** Optimization of Control Points Number at Coordinate Measurements based on the Monte-Carlo Method / A.A. Korolev, A.V. Kochetkov, O.V. Zakharov. — DOI <https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012061> // Journal of Physics: Conference Series, Volume 944, XI International scientific and technical conference "Applied Mechanics and Dynamics Systems" 14–16 November 2017, Omsk, Russian Federation / Омск: IOP Publishing Ltd, 2018. — P. 12061. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/944/1/012061>. (дата обращения: 10.04.2023).

Сведения об авторах:

Каменских Александр Николаевич⁴ — заместитель генерального директора, ФАУ «Российский дорожный научно-исследовательский институт», Москва, Россия, e-mail: kamenskih@rosdornii.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7726-7617>

Статья получена: 12.04.2023. Принята к публикации: 07.07.2023. Опубликовано онлайн: 21.07.2023.

⁴ <https://gospol.ru/person/mintrans/rosavtodor/kamenskih-aleksandr-nikolaevich/>.

REFERENCES

1. Dubinyak A.N., Ovchinnikov I.I. Waterproofing materials to protect the structures of transport structures. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2020; 7(2): 21SATS220. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/21SATS220>.
2. Kazaryan V.Yu. Sakharova I.D. Gidroizolyatsionnyye materialy dlya mostovykh sooruzheniy [Waterproofing materials for bridge services]. *Mir dorog [Road World]*. 2005; (16): 38–40. (In Russ.).
3. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Valiev S.N., Zhadenova S.V. Classification and comparative analysis of different types of waterproofing applied to the road bridges. *Naukovedenie*. 2013; (2): 56TBH513. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/56tvn513.pdf> (accessed 8th April 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
4. Zakharov O.V., Pogorazdov V.V., Kochetkov A.V. Metodicheskiye osnovy garmonicheskogo analiza kruglogramm [Methodical bases of harmonic analysis of round diagrams]. *Metrologiya [Metrology]*. 2004; (6): 3–10. (In Russ.).
5. Kochetkov A.V., Kamenskikh A.N., Shashkov I.G. Repair of a minor bridge in the state of failure with an atypical design using prestressed bridge meshes and bitumen slurry. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2022; 9(2): 04SATS222. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/04SATS222>.
6. Valiyev Sh.N., Kamenskikh A.N., Petrovich I.G., Zhuravlev P.A. Polimernyye napylyayemyye materialy dlya ustroystva gidroizolyatsii mostovykh sooruzheniy [Polymer sprayed materials for waterproofing of bridge structures]. Moscow: LLC "Stroinformizdat"; 2022. (In Russ.).
7. Kamenseikh A.N. Sekret dolgovechnosti [The Secret of Longevity]. *Avtomobil'nyye dorogi [Car roads]*. 2023; (3): 64–67. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50391717> (accessed 8th April 2023). (In Russ.).
8. Barats Ya.I., Maslyakova I.A., Barats F.Ya. Matematicheskiye modeli tekhnologicheskoy teplofiziki i fizicheskikh vzaimodeystviy [Mathematical models of technological thermophysics and physical interactions]. Saratov: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; 2002. (In Russ.).
9. Baratz Ya.I., Milovanova L.R. Thermo-Conduction Equation Fission Method at Thermophysic Task Solutions Arising Up at Mechanical Treatment. *Vestnik Saratov State Technical University*. 2010; 1(1): 28–34. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18725580> (accessed 10th April 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
10. Arzhanukhina S.P., Bobkov A.V., Kochetkov A.V., Kochetkov D.A. Uchet teplofizicheskikh kharakteristik protivogolodnykh materialov pri zimmem soderzhanii avtomobil'nykh dorog [Accounting for the thermophysical characteristics of anti-icing materials during winter maintenance of roads]. Moscow, Vologda: Infra-Inzheneriya; 2022. (In Russ.).
11. Karabutov N.N., Bondarev B.A., Shmyrin A.M. Mathematical Models' Synthesis with The Purpose of Investigation the Properties of Polymer-Impregnated Concrete in Automatic Diagnostic System for Roadway Covering. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*. 2006; (4): 27–30. Available at: <http://pribor.tgizd.ru/ru/arhiv/7634> (accessed 10th April 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
12. Bramel B.K., Dolan C.W., Puckett J. A., Ksaibati K. Asphalt Plug Joints — material characterization and specification. USA, Wyoming, Laramie: Wyoming Department of Transportation; 2002. (In Eng.).
13. Cheng Y., Yu D., Tan G., Zhu C. Low-Temperature Performance and Damage Constitutive Model of Eco-Friendly Basalt Fiber–Diatomite-Modified Asphalt Mixture under Freeze–Thaw Cycles. *Materials*. 2018; 11(11): 2148. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11112148>.
14. Celauro C., Praticò F.G. Asphalt mixtures modified with basalt fibres for surface courses. *Construction and Building Materials*. 2018; 170: 245–253. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.058>.
15. Gong Y., Bi H., Liang C., Wang S. Microstructure Analysis of Modified Asphalt Mixtures under Freeze–Thaw Cycles Based on CT Scanning Technology. *Applied Sciences*. 2018; 8(11): 2191. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/app8112191>.
16. Qin X., Shen A., Guo Y., Li Z., Lv Z. Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers. *Construction and Building Materials*. 2018; 159: 508–516. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012>.

17. Gong Y., Bi H., Tian Z., Tan G. Pavement Performance Investigation of Nano-TiO₂/CaCO₃ and Basalt Fiber Composite Modified Asphalt Mixture under Freeze–Thaw Cycles. *Applied Sciences*. 2018; 8(12): 2581. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/app8122581>.
18. Zakharchenko M.Y., Kochetkov A.V., Salov P.M., Zakharov O.V. New system of functional parameters for surface texture analysis. *Materials Today: Proceedings*. 2020; (38, Part 4): 1866–1870. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.488>.
19. A.A. Zadiraka, N.Ye. Kokodeeva, A.V. Kochetkov Technology for laying and strengthening transportation facilities based on a polyurethane composite. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2019; (1): 77–83. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.25987/VSTU.2018.41.1.008>.
20. Yalovoy O.A., Zakharov O.V., Kochetkov A.V. The Centerless Measurement of Roundness with Optimal Adjustment. In: IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering, Volume 93, 21th International Conference for Students and Young Scientists: Modern Technique and Technologies (MTT'2015) 5–9 October 2015, Tomsk, Russia*. Tomsk: IOP Publishing Ltd; 2015. p. 12024. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24970866> (accessed 10th April 2023). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/93/1/012024>.
21. Korolev A.A., Kochetkov A.V., Zakharov O.V. Optimization of Control Points Number at Coordinate Measurements based on the Monte-Carlo Method. In: *Journal of Physics: Conference Series, Volume 944, XI International scientific and technical conference "Applied Mechanics and Dynamics Systems" 14–16 November 2017, Omsk, Russian Federation*. Omsk: IOP Publishing Ltd; 2018. p. 12061. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/944/1/012061> (accessed 10th April 2023). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/944/1/012061>.

Information about the authors:

Alexander N. Kamenskikh — Russian Road Research Institute, Moscow, Russia, e-mail: kamenskih@rosdormii.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7726-7617>

Submitted: 12th April 2023. Revised: 7th July 2023. Published online: 21st July 2023.