

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права  
УДК 625.848.624.078

**НАУМОВЕЦ**  
**Анна Николаевна**

**ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ УСТРОЙСТВА ДОЛГОВЕЧНЫХ  
ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ШВОВ  
НА МОСТАХ И ПУТЕПРОВОДАХ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.23.11 – проектирование и строительство дорог,  
метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

Минск, 2024

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный руководитель

**БУСЕЛ Алексей Владимирович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник государственного предприятия «БелдорНИИ», г. Минск

Официальные оппоненты:

**ВЕРЕНЬКО Владимир Адольфович**, доктор технических наук, профессор;

**ШУМЧИК Виктор Касперович**, кандидат технических наук, доцент, научный консультант ОАО «Управляющая компания холдинга «Белавтодор»

Оппонирующая организация:

Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта»

Защита состоится 07 июня 2024 г. в 11<sup>00</sup> на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.05 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, просп. Независимости, 65, главный корпус, ауд. 202. Телефон ученого секретаря 8(017) 293-96-73. E-mail: kovsharsn@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 07 мая 2024 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций,  
кандидат технических наук



С. Н. Ковшар

© Наумовец А. Н., 2024  
© Белорусский национальный  
технический университет, 2024

## ВВЕДЕНИЕ

Деформационные швы мостовых сооружений являются наименее надежными конструктивными элементами, приводящими к нарушению плавности движения транспортных средств и разрушению несущих конструкций в зоне их влияния. В работах ряда исследователей указывается на важность качества деформационных швов для повышения долговечности мостов и путепроводов.

Деформационные швы должны обеспечивать возможность перемещения концов пролетных строений мостов и путепроводов без перенапряжения и повреждения их элементов, совместную работу с конструктивными слоями мостового полотна и дорожных одежд, герметизацию стыков и гидроизоляцию.

Практика применения наиболее распространенных щебеночно-мастичных деформационных швов (далее – ЩМДШ) на магистральных дорогах Беларуси показала, что уже на ранних стадиях эксплуатации проявляются дефекты, нарушающие их функцию: трещинообразование при пониженных температурах окружающей среды, сдвиговые деформации при повышенных температурах, нарушение герметичности в зоне контакта с мостовым полотном.

Основной причиной снижения устойчивости деформационных швов в условиях воздействия интенсивной транспортной нагрузки и климатических факторов являются низкие физико-механические характеристики щебеночно-мастичного композита, что обусловлено недостаточным учетом физико-химических процессов, происходящих в его структуре. В связи с этим актуальной задачей является направленное научно обоснованное регулирование прочностных и реологических свойств материала заполнителя ЩМДШ.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с научными программами.** Работа связана с выполнением:

1. Государственной научно-технической программы «Ресурсосбережение, новые материалы и повышение технического уровня, технологии – 2015» (подпрограмма «Новые материалы», утвержденная приказом Государственного комитета по науке и технологиям от 25.10.2013 № 348, задание 2.35: «Разработать эластичные армированные композиционные материалы и технологию их применения с повышенной устойчивостью к деформациям в швах на мостах и путепроводах») (№ г. р. 20141175).

2. Плана НИР и ОКР Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь на 2011 г. (тема 10.528.2.2011 «Исследование, разработка составов и технологии получения и применения модифицированных битумов с использованием пластозластомерных добавок и гранулированного резино-битумного вяжущего» (№ г. р. 20110482).

**Цель и задачи исследования.** Цель исследования – разработать щебеночно-мастичный композит для деформационных швов, обладающий улучшенными физико-механическими характеристиками, и технологии его изготовления и применения, позволяющие повысить работоспособность и долговечность конструктивных элементов мостового полотна.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

– провести анализ существующих конструкций ЩМДШ, что позволило бы выйти на новые решения как при формировании структуры композитного материала, так и при разработке технологии устройства ЩМДШ;

– обосновать физическую модель работы ЩМДШ с учетом деформаций конструктивных элементов мостов под действием транспортной нагрузки и перепадов температуры;

– создать щебеночно-мастичный композит для устройства деформационных швов заполненного типа с оптимизацией вида и объема применяемой дисперсной арматуры и свойств армирующей геосетки, позволяющий обеспечить герметичность шва в течение всего расчетного срока эксплуатации при заданных природно-климатических и транспортных воздействиях;

– разработать методику определения параметров работоспособности ЩМДШ;

– разработать технологию устройства ЩМДШ в условиях пониженных температур окружающей среды;

– выполнить внедрение и провести технико-экономический анализ работы ЩМДШ в процессе эксплуатации мостового полотна.

**Объектом исследования** является щебеночно-мастичный композит для деформационных швов заполненного типа.

**Предметом исследования** являются технологические параметры формирования устойчивой структуры материала заполнителя ЩМДШ, обеспечивающей его долговечность.

**Научная новизна** заключается:

– в проведенном теоретическом анализе способов усиления структуры щебеночно-мастичного композитного материала и обосновании необходимости исследования армирующих компонентов на предмет их адгезии к битуму и повышения устойчивости минерального каркаса;

– в установленной зависимости между содержанием армирующих компонентов, их характеристиками и коэффициентом накопленной пластической деформации, позволяющей проектировать композитный материал с требуемой сдвигоустойчивостью;

– в разработанном щебеночно-мастичном композите, позволяющем улучшить деформационно-прочностные свойства материала заполнителя шва и обеспечить его работоспособность под воздействием многократной транспортной нагрузки.

**Положения, выносимые на защиту:**

– экспериментально выявленные закономерности влияния армирующих компонентов на устойчивость композитного материала заполнителя деформационного шва к пластическим деформациям;

– методика определения устойчивости материала заполнителя деформационного шва к усталостному разрушению с учетом деформирования пролетных строений мостов под транспортной нагрузкой;

– технологические параметры приготовления и применения материала заполнителя деформационного шва в условиях пониженных температур;

– технико-экономические показатели использования армированных ЩМДШ в практике мостостроения, подтверждающие их эффективность.

**Личный вклад соискателя ученой степени.** Диссертационная работа представляет собой самостоятельный труд соискателя. Автору принадлежат выбор направления и постановка задач исследований, оптимизация состава щебеночно-мастичного композита и создание приемлемой конструкции шва, разработка технологии устройства шва и ее практическая реализация в производственных условиях. Автором самостоятельно проведены экспериментальные и опытно-технологические работы по устройству ЩМДШ. Определение целей и задач, обобщение результатов проводились при консультации с научным руководителем – доктором технических наук, профессором А. В. Буселом.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись и обсуждались на следующих научных мероприятиях: Международной научно-практической конференции МСД «Новые материалы и технологии для проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог СНГ» (г. Москва, 2009 г.); Республиканской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и студентов «Автомобильные дороги – дороги в будущее» (г. Минск, 2011 г.); 10-й Международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике» (г. Минск, БНТУ, 2012 г.); Международной научно-технической конференции «Проблемы повышения качества и ресурсосбережения в дорожной отрасли» (г. Минск, Белавтодор,

2013 г.); Международной научно-технической конференции «Инновации в дорожном строительстве» (г. Минск, Белавтодор, 2019 г.); Международной научно-технической конференции «Дорожное строительство и его инженерное обеспечение» (г. Минск, БНТУ, 2021 г.); Международной научно-технической конференции «Muhandislik-texnologiya fan sohalaridagi muammolar: uychim va takliflar» (г. Термиз, 2022 г.); Международной видеоконференции «Автомобильные дороги: безопасность и надежность» (г. Минск, 2023 г.).

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований на объектах транспортной инфраструктуры Беларуси в течение 2010–2021 гг. устроено более 150 погонных метров экспериментальных ЦМДШ. На этих объектах проводились работы по освоению технологии устройства ЦМДШ.

**Опубликованность результатов диссертации.** По результатам диссертационных исследований опубликовано 16 научных статей, том числе 9 статей в журналах, включенных в перечень научных изданий, рекомендованных ВАК РБ для опубликования результатов диссертационных исследований, 7 материалов и тезисов докладов на научно-технических конференциях. Получен 1 патент Республики Беларусь.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, 5 глав, выводов, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объем диссертации составляет 102 страницы, в том числе 58 рисунков, 29 таблиц. Список использованных источников содержит 151 наименование, в том числе список публикаций соискателя – 17. Диссертация включает 15 приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлен анализ условий обеспечения работоспособности деформационных швов заполненного типа со щебеночно-мастичным композитом, устраиваемых при суммарных горизонтальных перемещениях торцов балок смежных пролетов, не превышающих  $\pm 12,5$  мм, под воздействием колебаний температуры, поворота опорных сечений, при пропуске колесной нагрузки. В работах А. В. Ефанова, И. Г. Овчинникова, В. И. Шестерикова, Г. Н. Козлова, А. В. Бусела, А. В. Минина, А. Hartkorn, J. Beaugend, A. Motonosuke и других исследователей отмечено, что основной причиной снижения устойчивости таких деформационных швов в условиях воздействия интенсивной транспортной нагрузки и климатических факторов являются низкие физико-механические характеристики применяемого щебеночно-мастичного композита и недостаточно обоснованные технологические и конструктивные решения, используемые при устройстве ЦМДШ.

**Первая глава** содержит обзор способов повышения устойчивости ЩМДШ к действию транспортной нагрузки и погодно-климатических факторов. Из проведенного анализа литературных данных следует, что нерешенными остаются вопросы:

- обеспечения работоспособности шва на протяжении расчетного срока эксплуатации мостового сооружения;
- обеспечения сцепления материала в зоне контакта шва с конструктивными элементами мостового полотна;
- предотвращения трещинообразования при пониженных температурах, что влечет за собой нарушение водонепроницаемости деформационного шва;
- обеспечения сдвигоустойчивости щебеночно-мастичного композита под нагрузкой, особенно при повышенных температурах окружающей среды;
- предотвращения выноса заполнителя за пределы шва колесами проходящего транспорта, особенно при ускорении или торможении.

Проведенный анализ литературы по рассматриваемой проблеме позволил определить цель и сформулировать задачи исследования.

Во **второй** главе разработана физическая модель работы щебеночно-мастичного композита шва на основании анализа его напряженно-деформированного состояния.

Наиболее опасными для щебеночно-мастичного композита являются длительные механические нагрузки при высоких температурах и кратковременные при низких температурах, что может привести к появлению необратимых деформаций и уязвимых мест для проникновения воды. Следовательно, для повышения устойчивости ЩМДШ в условиях действия интенсивной транспортной нагрузки необходимо улучшить физико-механические и реологические свойства материала заполнителя.

Представляется перспективным применение дисперсного армирования для улучшения свойств композита, используемого в ЩМДШ, и применение армирующих прослоек для усиления конструкции шва. Композитный материал в швах работает в условиях многократной изгибающей нагрузки при действии транспорта, при этом в нем накапливаются необратимые деформации, приводящие к нарушению ровности его поверхности и герметичности шва.

Согласно конструктивному решению, материал заполнителя опирается на концы пролетных строений. Для исследования композита можно применить трехточечный метод испытания призматических образцов, изложенный в СТБ ЕН 12697-24-2011, с использованием в расчетах положений теории ползучести.

Анализ предложенной схемы напряженно-деформированного состояния материала заполнителя ЩМДШ показывает, что данная схема соответствует воздействию колесной нагрузки на шов в покрытии, что согласуется с данными, полученными в ходе натурных испытаний.

Полную деформацию образцов материала и его работоспособность можно оценить по формуле

$$\varepsilon = \varepsilon_{(0)} + K_{\text{нп}} l_n(N), \quad (1)$$

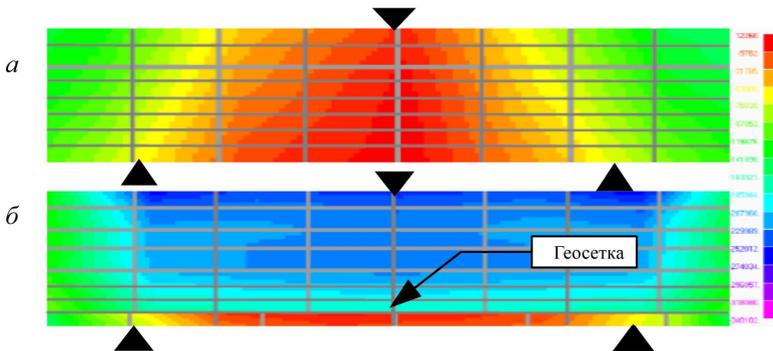
где  $\varepsilon_{(0)}$  – начальная деформация образца, мм;

$K_{\text{нп}}$  – коэффициент накопленной пластической деформации, представляющий собой характеристику жесткости композиции, т. е. ее работоспособности в упругой стадии;

$l_n$  – величина прогиба балки после  $N$  циклов нагружения, мм.

Наилучшей работоспособностью обладает композитный материал с минимальным коэффициентом накопленной пластической деформации ( $K_{\text{нп}}$ ).

При помощи метода конечных элементов с использованием программного комплекса Nastran были рассчитаны напряжения в материале ЩМДШ (рисунок 1).



***a*** – эпюры напряжений в балочке, выполненной из традиционного материала;  
***б*** – эпюры напряжений в балочке с макродисперсным армированием и устройством армирующей прослойки из геосетки

**Рисунок 1** – Напряженно-деформированное состояние материала заполнителя ЩМДШ, определенное по методу конечных элементов

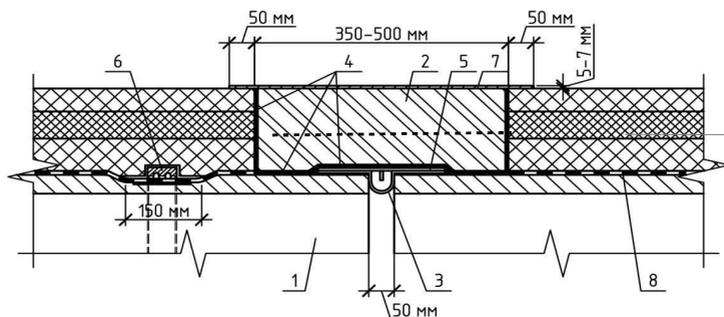
Согласно методике СТБ EN 12697-24-2011 образцы нагружаются усилием, составляющим 50 % от разрушающего. Для изучаемого состава усилие разрушения составляло 100 Н, поэтому расчетная нагрузка была принята равной 50 Н.

В расчет были приняты характеристики материалов, традиционно используемых для ЩМДШ и предлагаемых для нового материала шва с использованием технологии его армирования: дисперсного – отрезками стекловолокна, объемного – с помощью геосетки.

Значения напряжений в зоне максимальной деформации для традиционного материала составили около 10 МПа (красный цвет напряжений). В то же время образец с макродисперсным армированием и усилением геосеткой показал наличие опасных напряжений только в арматуре, а сам макродисперсно-армированный материал экстремально высоких напряжений не испытывал (спектр напряжений цветов синий и зеленый). Значения напряжений в центральной зоне образца составили до 4,5 МПа, что сопоставимо с прочностными показателями щебеночно-мастичного композита – 7,5 МПа.

Исследования напряженно-деформированного состояния материала показали, что при помощи правильно подобранного состава материала для макроармирования щебеночно-мастичного заполнителя и правильного выбора армирующей прослойки можно достичь двухкратного снижения напряжений в образцах.

На основании проведенных расчетов была предложена новая конструкция ЩМДШ, которая поясняется чертежом (рисунок 2), где представлен вид Т-образного деформационного шва, заполненного сдвигоустойчивым щебеночно-мастичным материалом, армированным волокнами и геосеткой.



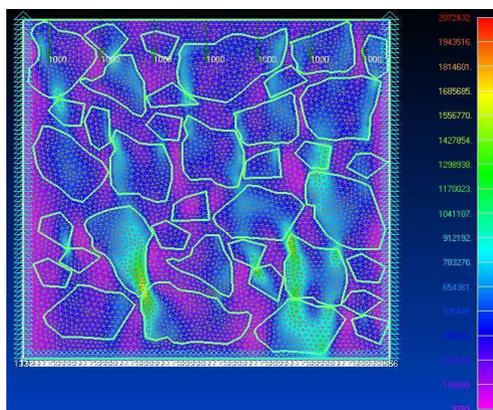
- 1 – пролетное строение; 2 – композит щебеночно-мастичный с волокнами и геосеткой; 3 – резиновый лоток; 4 – битумно-эластомерная мастика; 5 – металлическая пластина; 6 – дренаж; 7 – слой износа; 8 – гидроизоляция

**Рисунок 2 – Новая конструкция ЩМДШ**

Для моделирования щебеночного каркаса была применена программа StoneBox, позволяющая оценить распределение щебеночек внутри мастичной матрицы. Важной функцией данной программы является возможность построения сдвиговой линии (по которой произойдет первоначальная сдвиговая деформация) по точкам с максимальными касательными напряжениями с учетом углов наклона площадки сдвига.

В нашем случае использовался кубовидный щебень фракций 5–10 мм и 10–15 мм. Количество щебня варьировалось, чтобы оценить влияние контактов между зернами на устойчивость материала под нагрузкой.

Расчет полученной структуры осуществлялся методом конечных элементов в программе MSC.Marc. В расчете для щебеночек модуль упругости задавался равным 50 ГПа, а для мастичной матрицы – 1500 МПа. К верхней грани материала прикладывалась расчетная вертикальная нагрузка, равная 1000 кН/м (рисунок 3).



**Рисунок 3 – Напряженно-деформированное состояние в материале, заполняющем шов**

По результатам расчета определялись следующие параметры:

- максимальные касательные напряжения ( $S_{xy}$ ) в мастичной матрице и координаты точки их действия;
- нормальные напряжения ( $S_x$ ) в точке действия максимальных касательных напряжений;
- угол наклона площадки сдвига (определялся как арктангенс отношения нормальных напряжений к касательным с учетом знака касательных):

$$\alpha = \arctg \left( \frac{S_x}{S_{xy}} \right); \quad (2)$$

- максимальные сдвиговые напряжения ( $T$ );
- главные напряжения ( $S_1$  и  $S_2$ ) в месте действия максимальных напряжений сдвига.

Все полученные расчетом данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчетные показатели структуры материала заполнителя ЦМДШ

Номер состава	$S_{xy}$ , МПа	$S_x$ , МПа	$T$ , МПа	$S_1$ , МПа	$S_2$ , МПа	Координаты точки с максимальными $S_{xy}$		Относительная длина линии сдвига
						$x$	$y$	
1	2,18	-0,93	2,33	0,56	-4,10	12,36	13,96	1,13
2	1,80	-0,75	2,48	-2,28	-7,24	24,95	16,24	1,15
3	-2,61	-1,35	2,84	0,36	-5,31	23,81	14,62	1,38
4	-2,43	-1,85	2,95	-0,58	-6,47	27,54	44,91	1,13

Представленные в таблице 1 данные показывают, что свойства структуры материала заполнителя шва (предельные сдвиговые напряжения менее 3 МПа) не обеспечивают его устойчивость под действием современных транспортных нагрузок, когда напряжения в материале дорожного покрытия превышают 6–8 МПа. В связи с этим возникает необходимость усиления структуры материала.

Учитывая то, что на повышение работоспособности влияет как дисперсная арматура внутри материала, так и армирующая прослойка, можно определить вклад каждого из этих факторов. Изменяя содержание дисперсной арматуры, выбирая армирующие сетки с различным относительным удлинением волокон, можно получить композитный материал с заданным коэффициентом накопленной пластической деформации.

### **В третьей главе представлены методы исследований.**

Для целенаправленного регулирования деформационно-прочностных свойств ЦМДШ предложено использовать щебеночно-мастичный композит с дисперсным армированием и армирующей прослойкой из геосетки.

В качестве дисперсного армирующего материала применяли рубленое волокно из Е-стекла с длиной 9–12 мм, диаметром 13 мкм, с замасливателем – силианом, соответствующее ГОСТ 34338-2017.

В качестве армирующей прослойки были использованы геосетки с различным относительным удлинением волокон.

Для оценки физико-механических характеристик щебеночно-мастичного композита использовались не только стандартные методики, но и в отдельных случаях оригинальные методы оценки качества.

Для оценки степени смачивания применяемых волокон для дисперсного армирования определяли краевые углы их смачивания тестовыми жидкостями, моделирующими смачивание их вязкими веществами. С помощью метода сорбции Вошборна определяли скорость, с которой жидкость с известными характеристиками смачивает волокно.

Испытания по определению степени сцепления битума с волокном проводились по стандартной методике определения адгезии вяжущего к заполнителю согласно ГОСТ 11508-74.

Адгезию композита к бетону определяли путем растяжения со скоростью 50 мм/мин склеенных исследуемым материалом внахлест полосок бетона.

Качество полимербитумного состава определяли путем изучения структурно-реологических параметров с использованием ротационного вискозиметра.

Устойчивость к колеобразованию определяли при температуре 50 °С (в соответствии с анализом данных дорожных измерительных станций).

Для количественной оценки деформативных свойств и устойчивости полученных материалов к усталостному разрушению применяли метод четырехточечного изгиба. Полное описание методики испытания приведено в СТБ EN 12697-24-2011. Целью испытания было определение числа циклов нагружения при постоянной деформации до достижения образцом потери 50 % модуля жесткости на изгиб при температуре минус 22 °С.

Особенностью применения ЦМДШ является их работа при динамических напряжениях и деформациях, в связи с чем изучение поведения материалов осуществлялось именно в таких условиях с помощью прибора ИПМ-1, основанного на нанесении удара индентором по поверхности материала и определении его характеристик по параметрам ударного импульса.

Предложенные методы испытаний позволяют в полной мере оценить качество исходных материалов и их поведение в составе ЦМДШ.

**В четвертой главе изложены результаты экспериментальных исследований щебеночно-мастичного композита.**

На основании экспериментов были рассчитаны краевые углы смачивания рубленого волокна из Е-стекла с замасливателем – силаном и без замасливателя тестовыми жидкостями. С использованием значения константы капиллярности были рассчитаны краевые углы смачивания, которые показали положительный эффект от наличия замасливателя – силана. Это подтвердили испытания на адгезию битума к волокну по стандартной методике.

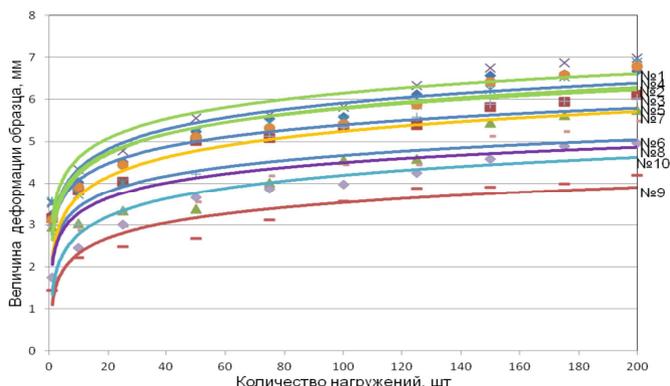
Были изучены составы армированных мастик, в результате чего установлено, что оптимальным является введение в мастику стекловолокна 0,3 % – 0,7 % от ее массы.

По полученным результатам при испытании на относительное удлинение образцов лучшее соотношение армированного вяжущего материала и щебня составило 1:3. При использовании одномерной фракции щебня 15–20 мм или 10–15 мм относительное удлинение было равно 24 % – 26 % , предел прочности при растяжении 0,12 0,14 МПа.

Установлено, что наилучший показатель прочности при сдвиге композитного материала по поверхности бетона наблюдается для состава с содержанием волокна 0,5 %.

Для определения деформационных показателей образцов, армированных геосетками, их подвергали циклическому нагружению величиной 50 Н (50 % от разрушающей нагрузки). Количество циклов составляло 199 (максимальное, согласно методике), скорость нагружения – 10 мм/мин.

Графики деформирования образцов представлены на рисунке 4.



**Рисунок 4 – Результаты испытаний составов смесей с разными видами волокна в заполнителе**

Установлена зависимость между содержанием волокна в смеси и коэффициентом накопленной пластической деформации, выражаемая формулой

$$K_{\text{нп}} = 1,66e^{-5,24x}, \quad (3)$$

где  $K_{\text{нп}}$  – коэффициент накопленной пластической деформации;  
 $x$  – содержание волокна в смеси, %.

Установлена зависимость между характеристиками сеток, применяемых для устройства армирующей прослойки, а именно, относительного удлинения волокон сетки при разрыве (данные взяты из технической документации на волокна) и коэффициентом накопленной пластической деформации, определяемая по формуле

$$K_{\text{нн}} = 0,15 \ln(y) + 0,35, \quad (4)$$

где  $y$  – значение относительного удлинения волокон (продольных и поперечных) сетки при разрыве, %.

Решая систему уравнений (3) и (4), получили, что оптимальное количество волокна из Е-стекла в материале заполнителя составляет 0,1 % – 0,12 %, а относительное удлинение волокон сетки 3 % – 5 %, что и явилось определяющим фактором выбора базальтовой геосетки для армирования шва.

В конструкции материал заполнителя шва должен воспринимать транспортную нагрузку аналогично как и рядом расположенный асфальтобетон. Подобранный оптимальный состав композитного материала был уложен в штрабу деформационного шва, и проведены сравнительные испытания его реологических характеристик и характеристик прилегающего асфальтобетона методом динамического индентирования. Результаты испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты испытаний методом динамического индентирования на объекте автодороги М-6, путепровод, км 11

Наименование показателя	Покрытие из асфальтобетона			Щебеночно-мастичный шов		
Энергия деформирования, Дж	1,23	1,25	1,28	1,18	1,16	1,17
Энергия упругого деформирования, Дж	0,16	0,12	0,15	0,06	0,06	0,07
Энергия вязкого деформирования, Дж	1,07	1,14	1,13	1,13	1,11	1,10
Вязкость по модели Максвелла, Н·с/м	4688,14	3343,68	3927,10	1693,76	1846,69	1848,93

Результаты испытаний показали, что при сопоставимой энергии деформирования 1,25 Дж у асфальтобетона и 1,17 Дж у материала заполнителя шва вязкая составляющая энергии деформирования для асфальтобетона составляет 89 % от общей энергии удара, а для материала заполнителя шва – 95 %, что свидетельствует о близкой деформационной устойчивости обоих материалов при динамическом нагружении. Вязкость отражает способность материала к рассеиванию энергии, соответственно, в щебеночно-мастичном шве в меньшей степени происходит аккумуляция возникающих

напряжений, что позволяет данному материалу надежно воспринимать циклическое динамическое воздействие транспортных средств без нарушения сплошности.

Таким образом, материал заполнителя шва и прилегающий асфальтобетон в равной степени воспринимают динамическую транспортную нагрузку. При этом вязкость по Максвеллу материала заполнителя шва в 2 раза меньше, что позволяет ему деформироваться при перепадах температуры без трещинообразования, поскольку в этом случае деформирование происходит существенно медленнее и вязкое течение мастичной составляющей препятствует нарушению герметичности ЩМДШ.

Для испытаний на устойчивость к колееобразованию использовали два вида материала: традиционный щебеночно-мастичный композит и материал, армированный волокном из Е-стекла. Армирование волокном дает значимое снижение скорости нарастания пластических деформаций.

Результаты испытаний щебеночно-мастичного дисперсно-армированного материала на усталостную долговечность показали, что данный материал имеет деформативность при отрицательных температурах, аналогичную деформативности материала без армирования, то есть арматура в виде волокна не препятствует растяжению–сжатию.

Был рассчитан срок службы этого материала из условий появления критических пластических деформаций, который составит 11,4 года, тогда как для традиционного материала он равен 7,6 года.

В **главе 5** представлена технология устройства ЩМДШ при пониженных температурах окружающей среды. Рассмотрены результаты производственной апробации технических и технологических решений. Приведены результаты мониторинга за устроеными швами и процессом их содержания. Выполнена экономическая оценка эффективности применения новых швов.

В августе 2019 года устройство ЩМДШ осуществлялось Государственным предприятием «Гордорматериалы» в г. Минске на путепроводе на пересечении просп. Партизанского и ул. Селицкого. На этом объекте отработывалась технология устройства ЩМДШ, которая затем вошла в технологическую карту с разработкой индивидуального норматива расхода ресурсов.

Технология устройства ЩМДШ включает следующие основные технологические операции:

- очищение полости шва (стенок и дна);
- монтаж резинового лотка, нанесение грунтовки;
- после полного высыхания – обработку стенок и дна полости шва горячей мастикой в 2–3 слоя общей толщиной не менее 1,5 мм;

– укладку пластин для перекрытия зазора между несущими конструкциями. Укладку пластин производят плотно встык с втапливанием их в горячую мастику. Не допускается укладка пластин внахлест;

– приклеивание алюминиевой фольги на поверхность пластин для перекрытия зазора также с помощью горячей мастики и обработка поверхности фольги антиадгезионной жидкостью с помощью кисти;

– приготовление щебеночно-мастичной смеси для заполнения шва осуществляется непосредственно на месте производства работ с использованием комбинированной дорожной машины КДМ-150 на базе МАЗ-63035 и котла-заливщика типа ЗШ-4. В котел загружается щебень и нагревается до  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ , после этого загружается волокно. Состав смешивается в течение 5 мин. Одновременно происходит разогрев битумно-эластомерной мастики до рабочей температуры на специальном оборудовании беспламенного нагрева при постоянном контроле температурного режима. Затем выполняется загрузка мастики в котел и состав перемешивается в течение не более 10 мин до получения однородной массы. Однородность оценивается визуально.

Расход материалов на  $1\text{ м}^3$  шва составляет: щебень фракции 10–15 мм – 1400 кг, мастика – 420 кг, стекловолокно – 2,1 кг, геосетка – по проекту;

– очищение ниши деформационного шва от пыли непосредственно перед заполнением штрабы щебеночно-мастичной смесью, подогрев поверхностей шва (кромки асфальтобетонного покрытия и защитного слоя) до  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

– заполнение полости деформационного шва щебеночно-мастичной смесью до половины глубины и уплотнение вибротрамбовкой;

– устройство армирующей прослойки из геосетки поверх устроенного слоя на всю ширину верхней части шва. Геосетка может укладываться с нахлестом 0,1–0,15 м;

– повторное распределение по устроенной прослойке щебеночно-мастичного материала до тех пор, пока шов не будет полностью заполнен, и уплотнение вибротрамбовкой.

В процессе уплотнения шва в бетоносмесителе производят подогрев щебня фракции 2,5–5,0 мм до температуры  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$  для устройства слоя износа. Если одновременное выполнение работ невозможно, после уплотнения шва устраивают технологический перерыв на 12 часов.

Через 12 часов выполняют подогрев поверхности материала заполнителя шва газовой горелкой до температуры плавления мастики. Затем выполняют распределение горячей мастики с расходом  $1\text{ кг/м}^2$  по поверхности шва и прилегающей зоны дорожного покрытия (по 5 см с каждой стороны) и осуществляют посыпку горячей поверхности щебнем фракции 2,5–5,0 мм, нагре-

тым до температуры 150 °С – 160 °С, с одновременным уплотнением всей конструкции виброплитой.

Данное техническое решение приемлемо при устройстве ЩМДШ при пониженных температурах воздуха.

Практическое использование деформационных швов со щебеночно-мастичным заполнителем из эластичных армированных композитных материалов подтверждается актами и составляет в общем объеме 169,57 пог. м.

Экономия по устройству ЩМДШ с армирующим заполнителем (100 пог. м.) в год составляет **686,88 руб.**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа состояния вопроса, теоретических и лабораторных исследований, а также опытно-технологических и внедренческих работ были получены следующие результаты:

1. Разработан щебеночно-мастичный армированный композит для деформационных швов, который обладает минимальным коэффициентом накопленной пластической деформации и повышенной устойчивостью при действии циклических нагрузений во время сильного охлаждения мостовых конструкций. Предложена технология устройства ЩМДШ, в том числе, в условиях пониженных температур [1–17].

2. Выявлены закономерности влияния армирующих компонентов на устойчивость композитного материала заполнителя ЩМДШ к пластическим деформациям. Изучение физико-механических и реологических характеристик материала показало, что оптимальным является введение волокна из Е-стекла с замасливателем – силаном в количестве 0,10 % – 0,12 % в составе композита. При этом наблюдается максимальная динамическая вязкость и минимальный коэффициент накопления пластической деформации [3; 4; 6; 11; 12].

3. Установлена зависимость между содержанием волокна в смеси и коэффициентом накопленной пластической деформации, а также характеристиками геосеток, применяемых для устройства армирующей прослойки, а именно, относительным удлинением волокон сетки при разрыве и коэффициентом накопленной пластической деформации. Выявлено, что наилучших результатов можно достичь при уменьшении относительного удлинения волокон сетки до значений 3 % – 5 %, что характерно для базальтового материала [5; 12].

4. Изучение устойчивости материала заполнителя шва к воздействию транспортной нагрузки показало, что при приложении ударного импульса с помощью прибора ИПМ-1 вязкая составляющая энергии деформирования для асфальтобетона составляет 89 % от общей энергии удара, а для материала шва – 95 %, что свидетельствует о близкой деформационной устойчивости обоих материалов при динамическом нагружении. При этом вязкость по Максвеллу у материала шва в 2 раза меньше, что позволяет ему деформироваться при перепадах температуры без трещинообразования и нарушения герметичности [7; 13; 14].

5. Технология приготовления дисперсно-армированного материала заполнителя и устройства ЩМДШ описана в технологическом регламенте и технологической карте, которые используются в практике работы Государственного предприятия «Гордорматериалы». Опытные-технологические и

внедренческие работы выполнялись на ряде объектов с общей протяженностью ЩМДШ 169,57 пог. м [7; 9; 15; 16].

**Рекомендации по практическому использованию результатов работы**

Результаты исследований рекомендуются к использованию мостостроительными и дорожно-эксплуатационными организациями для:

- выполнения работ при устройстве и ремонте ЩМДШ, в том числе при пониженных температурах;
- налаживания серийного выпуска дисперсно-армированных композитных материалов для их использования при устройстве ЩМДШ;
- оценки качества ЩМДШ по результатам их динамического индентирования.



## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Статьи в научных изданиях

1. Бусел, А. В. Некоторые вопросы содержания и текущего ремонта магистральных автомобильных дорог / А. В. Бусел, Н. В. Радьков, А. Н. Евсикова (А. Н. Наумовец) // Автомобильные дороги и мосты. – 2010. – № 1 (5). – С. 17–21.
2. Радьков, Н. В. Применение складываемых органо-минеральных смесей для ямочного ремонта асфальтобетонных покрытий / Н. В. Радьков, Ю. М. Цыганок, А. Ю. Игошкина, А. Н. Наумовец // Автомобильные дороги и мосты. – 2011. – № 1 (7). – С. 59–64.
3. Бусел, А. В. Способы повышения устойчивости деформационных швов к воздействию температуры и транспортной нагрузки. / А. В. Бусел, А. Н. Наумовец // Строительная наука и техника. – 2011. – № 5 (38). – С. 23–26.
4. Бусел, А. В. Асфальтовяжущее на упрочняющих волокнистых компонентах / А. В. Бусел, Т. А. Чистова, А. Н. Наумовец // Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 1 (85). – С. 106–109.
5. Наумовец, А. Н. Мостовые щебеночно-мастичные деформационные швы из композитных материалов с макродисперсным армированием и усилением геосетками / А. Н. Наумовец, А. В. Бусел, А. И. Смыковский // Автомобильные дороги и мосты. – 2015. – № 1 (15). – С. 32–35.
6. Наумовец, А. Н. Исследование влияния Е-стекловолокна на реологические и деформационно-прочностные свойства композиционной системы на основе совмещенных битумных мастик / А. Н. Наумовец, В. М. Шаповалов, К. С. Носов // Автомобильные дороги мосты. – 2015. – № 1 (15). – С. 41–45.
7. Наумовец, А. Н. Технология устройства армированных щебеночно-мастичных швов при низких температурах / А. Н. Наумовец, Т. А. Чистова // Дороги и мосты. – 2021. – № 46/2. – С. 190–201.
8. Наумовец, А. Н. Обеспечение устойчивости материала заполнения щебеночно-мастичных деформационных швов на мостах и путепроводах /

А. Н. Наумовец, В. С. Артимович, Д. В. Кошелев // Автомобильные дороги и мосты. – 2022. – № 1 (29). – С. 57–65.

9. Наумовец, А. Н. Лабораторные исследования и практическое применение армированных щебеночно-мастичных материалов для деформационных швов / А. Н. Наумовец, А. В. Бусел // Автомобильные дороги и мосты. – 2023. – № 1 (31). – С. 19–24.

### **Материалы конференций**

10. Бусел, А. В. Защитные слои для дорог транспортных коридоров / А. В. Бусел, А. Н. Евсикова (А. Н. Наумовец) // Сб. докл. междунар. науч.-практ. конф. «Новые материалы и технологии для проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог СНГ», Москва, 13–14 мая 2009 г. / МСД. – М., 2009. – Ч. I. – С. 44–47.

11. Бусел, А. В. Технология и материалы для устройства защитно-гидроизоляционных слоев и деформационных швов на мостах / А. В. Бусел, А. Н. Наумовец // Сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы повышения качества и ресурсосбережение в дорожной отрасли», Минск, 30–31 мая 2013 г. / Департамент «Белавтодор», БНТУ. – Минск, 2013. – С. 30–33.

12. Бусел, А. В. Роль деформационных швов на мостах и путепроводах в обеспечении безопасности проезда / А. В. Бусел, Р. Г. Кротов, А. Н. Наумовец // Сб. докл. междунар. юбил. науч.-техн. конф. «Автомобильные дороги: безопасность и надежность», Минск, 22–23 ноября 2018 г. – Минск, 2018. – С. 28–36.

13. Наумовец, А. Н. Улучшенные щебеночно-мастичные деформационные швы и контроль их качества / А. Н. Наумовец // Сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Дорожное строительство и его инженерное обеспечение» / БНТУ. – Минск, 2021. – С. 101–109.

14. Наумовец, А. Н. Устройство деформационных швов заполненного типа с повышенной устойчивостью к воздействию температуры и транспортной нагрузки / А. Н. Наумовец, Т. А. Чистова // Сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Muhandislik-texnologiya fan sohalariidagi muammolar: yechim va takliflar», Термиз, 03 июня 2022 г. – Термиз, 2022. – С. 5–7.

### **Тезисы докладов**

15. Бусел, А. В. Заполнитель деформационного шва с повышенной устойчивостью к воздействию температуры и транспортной нагрузки / А. В. Бусел, А. Н. Наумовец // Тезисы докл. Республ. науч.-техн. конф. «Автомобильные дороги – дороги в будущее», Минск, 10 марта 2011 г. / БелдорНИИ. – Минск, 2011. – С. 14–15.

16. Бусел, А. В. Герметизирующий материал для устройства эластичных деформационных швов / А. В. Бусел, А. Н. Наумовец // Тезисы докл. 10-й Междунар. науч.-техн. конф. «Наука – образованию, производству, экономике», Минск, 17–18 мая 2012 г. / БНТУ. – Минск, 2012. – С. 83.

### **Патенты**

17. Герметизирующий материал для устройства деформационных швов : пат. 16802 Респ. Беларусь : МПК Е 01С 11/02, С 08L 95/00 // Наумовец А. Н., Цыганок Ю. М., Бусел А. В. ; заявитель и патентообладатель государственное предприятие «БелдорНИИ». – № а 20110700 ; заявл. 19.05.2011 ; опубл. 29.10.2012. – 3 с.

## РЭЗЮМЭ

Наумавец Ганна Мікалаеўна

### ТЭХНАЛОГІЯ І МАТЭРЫЯЛЫ ДЛЯ ЎСТРОЙВАННЯ ДАЎГАВЕЧНЫХ ШЧЭБЕНЕВА-МАСТЫЧНЫХ ДЭФАРМАЦЫЙНЫХ ШВОЎ НА МАСТАХ І ПУЦЕПРАВОДАХ

**Ключавыя словы:** арміруючы матэрыял, шчэбенева-мастычны кампазіт, пругкавязкія дэфармацыі, дэфармацыйны шоў запоўненага тыпу, каэфіцыент пластычнай накопленай дэфармацыі

**Мэта працы:** распрацаваць шчэбенева-мастычны кампазіт для дэфармацыйных швоў, які валодае палепшанымі фізіка-механічнымі характарыстыкамі, і тэхналогіі яго вырабу і прымянення, якія дазваляюць павысіць працаздольнасць і даўгавечнасць канструктыўных элементаў маставага палатна.

**Метады даследавання:** у тэарэтычных даследаваннях выкарыстаны метады аналізу і навуковага прагназавання, статыстычнай апрацоўкі вынікаў выпрабаванняў з давернай верагоднасцю 0,875, стандартныя метады выпрабаванняў і арыгінальныя метады ацэнкі якасці выкарыстоўваных матэрыялаў, праграмны комплекс аналізу напружанняў метадам канечных элементаў. Пры выпрабаваннях ужываліся атэставаныя ў адпаведнасці з патрабаваннямі СТБ, ДАСТ і ТУ прыборы і абсталяванне.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** праведзены тэарэтычны аналіз спосабаў умацнення структуры шчэбенева-мастычнага кампазітнага матэрыялу і абгрунтавана неабходнасць даследавання арміруючых кампанентаў на прадмет іх адгезіі да бітуму і павышэння ўстойлівасці мінеральнага каркаса; устаноўлена залежнасць паміж утрыманнем арміруючых кампанентаў, іх характарыстыкамі і каэфіцыентам накопленай пластычнай дэфармацыі, якая дазваляе праектаваць кампазітны матэрыял з неабходнай зрухаўстойлівасцю; распрацаваны шчэбенева-мастычны кампазіт, які дазваляе палепшыць дэфармацыйна-трывальные ўласцівасці запаўняльніка шва і забяспечыць яго працаздольнасць пад уздзеяннем шматразовай транспартнай нагрузкі і пры паніжаных тэмпературах.

Выканана вытворчая апрацацыя вынікаў дысертацыі, якая пацвердзіла магчымасць **практычнага прымянення ШЦМДШ**, здольных захоўваць эксплуатацыйную прыгодасць ва ўмовах інтэнсіўнага руху транспарту на працягу доўгага часу.

Вынікі даследаванняў рэкамендуюцца да выкарыстання маста-будаўнічымі і дарожна-эксплуатацыйнымі арганізацыямі.

## РЕЗЮМЕ

Наумовец Анна Николаевна

### ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ УСТРОЙСТВА ДОЛГОВЕЧНЫХ ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ШВОВ НА МОСТАХ И ПУТЕПРОВОДАХ

**Ключевые слова:** армирующий материал, щебеночно-мастичный композит, упруговязкие деформации, деформационный шов заполненного типа, коэффициент пластической накопленной деформации

**Цель работы:** разработать щебеночно-мастичный композит для деформационных швов, обладающий улучшенными физико-механическими характеристиками, и технологии его изготовления и применения, позволяющие повысить работоспособность и долговечность конструктивных элементов мостового полотна.

**Методы исследования:** в теоретических исследованиях использованы методы анализа и научного прогнозирования, статистической обработки результатов испытаний с доверительной вероятностью 0,875, стандартные методы испытания и оригинальные методы оценки качества используемых материалов, программный комплекс анализа напряжений методом конечных элементов. При испытаниях применялись аттестованные в соответствии с требованиями СТБ, ГОСТ и ТУ приборы и оборудование.

**Полученные результаты и их новизна:** проведен теоретический анализ способов усиления структуры щебеночно-мастичного композитного материала и обоснована необходимость исследования армирующих компонентов на предмет их адгезии к битуму и повышения устойчивости минерального каркаса; установлена зависимость между содержанием армирующих компонентов, их характеристиками и коэффициентом накопленной пластической деформации, позволяющей проектировать композитный материал с требуемой сдвигоустойчивостью; разработан щебеночно-мастичный композит, позволяющий улучшить деформационно-прочностные свойства заполнителя шва и обеспечить его работоспособность под воздействием многократной транспортной нагрузки и при пониженных температурах.

Выполненная производственная апробация результатов диссертации подтвердила возможность **практического применения** ЩМДШ, способных сохранять эксплуатационную пригодность в условиях интенсивного движения транспорта в течение длительного времени.

Результаты исследований рекомендуются к использованию мостостроительными и дорожно-эксплуатационными организациями.

## SUMMARY

Naumovets Anna Nikolaevna

### TECHNOLOGY AND MATERIALS FOR THE CONSTRUCTION OF DURABLE GRAVEL-MASTIC EXPANSION JOINTS ON BRIDGES AND OVERPASSES

**Key words:** reinforcing material, gravel-mastic composite, elastic-viscous deformations, filled-type expansion joint, coefficient of accumulated plastic deformation

**Objective:** to develop a gravel-mastic composite for expansion joints with improved physical and mechanical characteristics, as well as the technology of its production and application, to increase the performance and durability of structural elements of bridge pavements.

**Research methods:** theoretical research methods such as analysis and scientific forecasting were used, along with statistical processing methods of test results with a confidence probability of 0.875, standard testing methods, original methods for evaluating the quality of materials used, and a software complex for stress analysis using finite element method. When testing devices and equipment certified in accordance with the requirements of STB, GOST and TU were used.

**The results and their innovation:** a theoretical analysis of methods for reinforcing the structure of gravel-mastic composite material was conducted, and the need to study reinforcing components for their adhesion to bitumen and improving the stability of the mineral framework was justified. A relationship was established between the content of reinforcing components, their characteristics, and the coefficient of accumulated plastic deformation, which allows designing a composite material with the required shear resistance. A gravel-mastic composite was developed to improve the deformational and strength properties of the joint filler and ensure its performance under multiple transportation loads and at reduced temperatures.

The production approbation of the dissertation results was performed; it confirmed the possibility of **practical application** of gravel-mastic expansion joints that maintain operational suitability in conditions of heavy traffic for a long period of time.

The research results are recommended to be used as a practical guide for bridge-building and road-maintenancing organizations.

Научное издание

**НАУМОВЕЦ**  
**Анна Николаевна**

**ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ УСТРОЙСТВА ДОЛГОВЕЧНЫХ  
ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ШВОВ  
НА МОСТАХ И ПУТЕПРОВОДАХ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.23.11 – проектирование и строительство дорог,  
метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

Подписано в печать 06.05.2024. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Цифровая печать.  
Усл. печ. л. 1,27. Уч.-изд. л. 1,17. Тираж 60. Заказ 324.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск.