



# *Научно-технический вестник*

БРЯНСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УНИВЕРСИТЕТА

Б Р Я Н С К

---

2018(3)

ISSN 2413-9920

**Научно-технический  
ВЕСТНИК  
Брянского  
государственного  
университета**

**№ 3  
2018**

**Технические науки**

**Nauchno-tekhnicheskij**  
**VESTNIK**  
**Bryanskogo**  
**gosudarstvennogo**  
**universiteta**

**Scientific and Technical Journal of**  
**Bryansk State University**

**№ 3**  
**2018**

**Engineering Science**

ББК 74.580.4

Н-34

Научно-технический вестник Брянского государственного университета. № 3 (2018). Брянск: РИО БГУ, 2018. – Точка доступа: <http://ntv-brgu.ru>  
Размещено на официальном сайте журнала: 25.09.2018

**Председатель Редакционного совета БГУ им. акад. И.Г. Петровского:**

*А.В. Антюхов* – доктор филологических наук, профессор, ректор Брянского государственного университета им. акад. И.Г. Петровского (г. Брянск, Россия).

**Главный редактор сетевого издания:**

*А.В. Лагерев* – доктор технических наук, заместитель директора НИИ фундаментальных и прикладных исследований Брянского государственного университета им. акад. И.Г. Петровского (г. Брянск, Россия)

**Ответственный секретарь сетевого издания:**

*И.В. Мельников* – кандидат биологических наук, начальник Редакционно-издательского отдела Брянского государственного университета им. акад. И.Г. Петровского (г. Брянск, Россия).

**Редакционная коллегия сетевого издания:**

*Д.В. Артамонов* – доктор технических наук, первый проректор Пензенского государственного университета (г. Пенза, Россия);

*Н.И. Баурова* – доктор технических наук, декан факультета дорожных и технологических машин Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (г. Москва, Россия);

*В.В. Беляков* – доктор технических наук, начальник управления научно-исследовательских и инновационных работ Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (г. Нижний Новгород, Россия);

*А.В. Вершинский* – доктор технических наук, профессор кафедры подъемно-транспортных систем Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (г. Москва, Россия);

*А.А. Короткий* – доктор технических наук, заведующий кафедрой транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (г. Ростов-на-Дону, Россия);

*А.В. Лагерев* – доктор технических наук, заместитель директора НИИ фундаментальных и прикладных исследований Брянского государственного университета им. акад. И.Г. Петровского (г. Брянск, Россия);

*И.А. Лагерев* – доктор технических наук, проректор по инновационной работе Брянского государственного университета им. акад. И.Г. Петровского (г. Брянск, Россия);

*В.М. Пашкевич* – доктор технических наук, проректор по научной работе Белорусско-Российского университета (г. Могилев, Беларусь);

*И.А. Полянин* – доктор технических наук, профессор кафедры транспортно-технологических машин Поволжского государственного технологического университета (г. Йошкар-Ола, Россия);

*А.В. Рыбаков* – доктор технических наук, начальник лаборатории информационного обеспечения населения и технологий информационной поддержки Академии гражданской защиты МЧС России (г. Химки, Россия);

*Н.Г. Ярушкина* – доктор технических наук, первый проректор-проректор по научной работе Ульяновского государственного технического университета (г. Ульяновск, Россия).



**Editorial Council Chairman of Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University:**

*A.V. Antyukhov* – Doctor of Philological Sciences, Professor, Rector at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russia).

**Chief editor:**

*A.V. Lagerev* - Doctor of Technical Sciences, Vice director of Institute of basic and applied research at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russia).

**Executive secretary:**

*I.V. Melnikov* – Candidate of Biological Sciences, Chief of Editorial-publishing Department at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russia).

**Editorial Board:**

*D.V. Artamonov* – Doctor of Technical Sciences, first Vice rector at Penza State University (Penza, Russia);

*N.I. Baurova* – Doctor of Technical Sciences, Dean of faculty of road and technological machines at Moscow automobile and road construction state technical University (Moscow, Russia);

*V.V. Belyakov* – Doctor of Technical Sciences, Head of research and innovation Department at Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (Nizhny Novgorod, Russia);

*A.V. Vershinsky* - Doctor of Technical Sciences, Professor of chair of Lifting and transport system at Moscow State Technical University named N.E. Bauman (Moscow, Russia);

*A.A. Korotky* - Doctor of Technical Sciences, Head of chair of transport systems and logistics at Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia);

*A.V. Lagerev* - Doctor of Technical Sciences, Vice director of Institute of basic and applied research at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russia);

*I.A. Lagerev* – Doctor of Technical Sciences, Vice rector at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russia);

*V.M. Pashkevich* - Doctor of Technical Sciences, Vice rector at Belarusian-Russian University (Mogilev, Belarus Republic);

*I.A. Polyinin* - Doctor of Technical Sciences, Professor of chair of transport and technological machines at Povolzhskiy State Technical University (Yoshkar-Ola, Russia);

*A.V. Rybakov* - Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory of information technologies and providing the population at Academy of civil defence EMERCOM of Russia (Khimki, Russia);

*N.G. Yarushkina* - Doctor of Technical Sciences, first Vice rector at Ulyanovsk State Technical University (Ulyanovsk, Russia).

Электронный журнал «Научно-технический вестник Брянского государственного университета» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации: Эл № ФС77-62798 от 18 августа 2015 г.

16+

Ответственность за точность фактологического материала, используемого в статьях, несут авторы.

© Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2018  
© 2018 Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta



The Journal and its metadata are licensed under CC BY-SA

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

#### Машиностроение и машиноведение

Лагереv А.В., Лагереv И.А. (Брянск, Россия)

DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-03-261-271

Ускоренная оптимизационная оценка основных технических характеристик пассажирской подвесной канатной дороги ..... 261

Миронова М.Н. (Могилев, Республика Беларусь)

DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-03-272-282

Автоматизация проектно-конструкторских работ при разработке приводов машин с использованием функциональных семантических сетей ..... 272

#### Транспортное, горное и строительное машиностроение

Толкачев Е.Н. (Брянск, Россия)

DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-03-283-291

Математическая модель отказа ведущих подвесок конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом при заклинивании холостых роликов ..... 283

#### Безопасность деятельности человека

Котельников В.В., Егельская Е.В., Короткий А.А. (Москва, Ростов-на-Дону, Россия)

DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-03-292-303

Риск-ориентированный подход к аттестации специалистов в организациях, эксплуатирующих опасные производственные объекты ..... 292

#### Транспорт

Илесалиев Д.И. (Ташкент, Узбекистан)

DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-03-304-311

Анализ существующих способов доставки насыпных грузов в универсальных контейнерах ..... 304

#### Строительство и архитектура

Адилходжаев А.И., Махаматалиев И.М., Шаумаров С.С. (Ташкент, Узбекистан)

DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-03-312-320

Теоретические аспекты структурно-имитационного моделирования макроструктуры композиционных строительных материалов ..... 312

Макарова К. П., Левина Ю. С., Зарубин О. А., Климов А. Е. (Саранск, Россия)

DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-03-321-327

Математико-картографическое моделирование плотности застройки городской среды ..... 321

Тивари А.В., Рао Дж.Р.М. (Амравати, Виллупурам, Индия)

DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-03-328-337

Исследование прочности на сжатие битуминозного бетона с добавками пластмассовых отходов для дорожного строительства ..... 328

*Шаумаров С.С. (Ташкент, Узбекистан)*

*DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-03-338-346*

Моделирование процесса формирования температурного поля наружного  
ограждения зданий на железнодорожном транспорте ..... 338

## CONTENT

### ENGINEERING SCIENCE

#### Machinery Building and Theoretical Engineering

*Lagerev A.V., Lagerev I.A. (Bryansk, Russian Federation)*

DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-03-261-271

Accelerated optimization evaluation of the main technical characteristics of the passenger aerial ropeway ..... 261

*Mironova M.N. (Mogilev, Republic of Belarus)*

DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-03-272-282

Automation of design works at development of machine drives with the use of functional semantic networks ..... 272

#### Transport, Mining and Construction Machinery

*Tolkachev E.N. (Bryansk, Russian Federation)*

DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-03-283-291

Mathematical model of failure the drives suspensions of the conveyor with suspended belt and distributed drive at jamming non-drive rollers ..... 283

#### Safety of Human Activities

*Kotelnikov V.V., Yegelskaya E.V., Korotkiy A.A. (Moscow, Rostov-on-Don, Russian Federation)*

DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-03-292-303

Risk-based approach to the certification of specialists in organizations operating hazardous production facility ..... 292

#### Transport

*Ilesaliev D.I. (Tashkent, Uzbekistan)*

DOI: 10.22281/2413-9920-2016-02-04-304-311

Analysis of existing methods of delivery of fluid cargo in universal containers ..... 304

#### Construction and Architecture

*Adilhodzhaev A.I., Mahamataliev I.M., Shaumarov S.S. (Tashkent, Uzbekistan)*

DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-03-312-320

Theoretical aspects of structural and simulation modeling of the macrostructure of composite building materials ..... 312

*Makarova K.P., Levina Yu.S., Zarubin O.A., Klimov A.E. (Saransk, Russian Federation)*

DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-03-321-327

Mathematical-cartographic modeling of density of building of urban environment ..... 321

*Tiwari A.V., Rao Y.R.M. (Amravati, Villupuram, India)*

DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-03-328-337

Study on compressive strength of plastic waste bituminous concrete for road construction ..... 328

*Shaumarov S.S. (Tashkent, Uzbekistan)*

*DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-03-338-346*

Modeling of the process of formation of the temperature field of the outer fence of the  
buildings in railway transport ..... 338

УДК 625.54, 625.57

## УСКОРЕННАЯ ОПТИМИЗАЦИОННАЯ ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАССАЖИРСКОЙ ПОДВЕСНОЙ КАНАТНОЙ ДОРОГИ

### ACCELERATED OPTIMIZATION EVALUATION OF THE MAIN TECHNICAL CHARACTERISTICS OF THE PASSENGER AERIAL ROPEWAY

Лагереv А.В., Лагереv И.А.  
Lagerev A.V., Lagerev I.A.

Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Россия)  
Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)

**Аннотация.** В статье разработана математическая модель и методика ускоренной оптимизационной оценки основных технических характеристик пассажирской подвесной канатной дороги (шага и высоты промежуточных опор, усилия натяжения несущих канатов). Для вычисления оптимальных значений этих технических характеристик ранее была разработана задача технико-экономической оптимизации. В основу задачи оптимизации была положена минимизация целевой функции – стоимости затрат на строительство канатной дороги при учете ряда конструктивных ограничений. Ускоренная оптимизационная оценка основана на том, что положение точки минимума целевой функции следует искать вдоль линии одного из упомянутых ограничений – ограничения на минимальное усилие натяжения несущих канатов. Это позволило предложить два пути ускоренной оптимизационной оценки: 1) снижение размерности задачи оптимизации; 2) замена поиска минимума целевой функции на решение нелинейного алгебраического уравнения. Предложенный алгоритм ускоренной оптимизационной оценки основных технических характеристик подвесной канатной дороги позволяет получить в точности те же их значения, что и в результате решения разработанной ранее задачи технико-экономической оптимизации, но с применением более простых математических методов.

**Ключевые слова:** пассажирская подвесная канатная дорога, промежуточная опора, шаг опор, усилие натяжения каната, несущий канат, высота опоры, оптимизация, целевая функция, ограничения, стоимость.

**Дата принятия к публикации:** 01.07.2018  
**Дата публикации:** 25.09.2018

#### Сведения об авторах:

Лагереv Александр Валерьевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе НИИ фундаментальных и прикладных исследований ФГБОУ ВПО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», [bsu-avl@yandex.ru](mailto:bsu-avl@yandex.ru).  
ORCID: 0000-0003-0380-5456.

**Abstract.** In the article the mathematical model and the technique of the accelerated optimization estimation of the main technical characteristics of the passenger aerial ropeway (step and height of intermediate supports, tension force of the bearing ropes) are developed. To calculate the optimal values of these technical characteristics, the task of technical and economic optimization was previously developed. The optimization task was based on the minimization of the objective function - the cost of the aerial ropeway construction, taking into account a number of structural constraints. The accelerated optimization estimate is based on the fact that the position of the minimum point of the objective function should be searched along the line of one of the mentioned constraints – constraint on the minimum of tension force of the bearing ropes. This allowed us to propose two ways of accelerated optimization evaluation: 1) reduction of the dimension of the optimization problem; 2) replacement of the search for the minimum of the objective function by the solution of a nonlinear algebraic equation. The proposed algorithm of accelerated optimization evaluation of the main technical characteristics of the passenger aerial ropeway allows to obtain exactly the same values as the result of solving the previously developed problem of technical and economic optimization, but with the use of more simple mathematical methods.

**Keywords:** passenger aerial ropeway, intermediate support, step supports, tension force of rope, supporting rope, height of support, optimization, objective function, constraints, cost.

**Date of acceptance for publication:** 01.07.2018  
**Date of publication:** 25.09.2018

#### Authors' information:

Alexander V. Lagerev - Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice director of Research Institute of Fundamental and Applied Research at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, [bsu-avl@yandex.ru](mailto:bsu-avl@yandex.ru). ORCID: 0000-0003-0380-5456.

**Лагереv Игорь Александрович** – доктор технических наук, доцент, проректор по инновационной работе ФГБОУ ВПО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», [lagerev-bgu@yandex.ru](mailto:lagerev-bgu@yandex.ru).  
ORCID: 0000-0002-0921-6831.

**Igor A. Lagerev** - Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Vice rector for Innovations at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, [lagerev-bgu@yandex.ru](mailto:lagerev-bgu@yandex.ru).  
ORCID: 0000-0002-0921-6831.

## I. Введение.

Подвесные канатные дороги нашли широкое применение во многих странах мира в качестве непрерывного транспорта для организации пассажирских и грузовых перевозок [1, 2]. Пассажирские канатные дороги преимущественно используются для быстрого и удобного перемещения людей к труднодоступным спортивным, туристическим, экологическим и оздоровительным объектам в пределах природных территорий со сложным рельефом местности [3, 4]. Грузовые канатные дороги используются для транспортировки различных грузов во многих отраслях экономики – в горнорудной, угольной, химической, металлургической, энергетической, лесной и сельскохозяйственной промышленности [5-8]. Согласно данным технико-экономического анализа [2, 9-11], канатный транспорт является более экономически и экологически выгодным, чем наземный транспорт (автомобильный, конвейерный и железнодорожный). Особенно тех случаях, когда рельеф местности, высокая плотность жилой или промышленной застройки и различные градостроительные ограничения препятствуют развитию наземного трафика.

Теория подвесных пассажирских и грузовых канатных дорог начала активно разрабатываться в середине XX века. Одновременно такие исследования начались в Англии, Австрии, Германии, Италии, России и других странах [1, 5, 12].

Как показано в [2, 6, 9, 11, 13], подвесные канатные дороги являются эффективной альтернативой традиционным видам наземного общественного транспорта в мегаполисах и крупных городах. Их можно отнести к скоростному городскому транспорту. Средняя скорость движения пассажирских кабин может составлять 18...40 км/ч [9, 10, 13]. Это выше средней скорости движения традиционного наземного транспорта в стесненных городских условиях. Кроме того, проблема

транспортной доступности приобретает все большее значение при оценке проектов при модернизации транспортной инфраструктуры крупных городов [14]. По этому показателю подвесные канатные дороги также имеют несомненные достоинства.

Подробный обзор использования подвесные канатные транспортные дороги в различных городах содержится в [2, 9, 13]. В урбанизированной среде они стали наиболее активно использоваться в последние 10...15 лет [15]. Поэтому в настоящее время многие специфические вопросы проектирования, расчета и моделирования рабочих процессов в подвесных канатных дорогах, которые необходимо рассматривать именно для урбанизированной среды, теоретически исследованы недостаточно и на эту тему имеется мало научных публикаций. Одной из первых публикаций на эту тему явилось исследование [16]. В нем были рассмотрены вопросы производительности, стоимости и возможности применения кабельных самоходных систем в городских условиях. Ряд работ посвящен вопросам воздействия климатических факторов (ветра и перепада температур воздуха) на динамику пассажирских кабин и канатной системы подвесных канатных дорог [17, 18], расчету прочности и натяжения несущих канатов [19-21], безопасности транспортирования пассажиров [2, 3].

## II. Анализ научной проблемы.

Проблема исследования пассажирских подвесных канатных дорог имеет не только технический аспект. Например, в [4] рассматриваются вопросы социального и экономического влияния строительства канатных дорог на развитие прилегающих территорий, а в [22] – вопросы юридического оформления права собственности на воздушное пространство и землю для канатных дорог.

Однако экономические аспекты строительства канатных дорог пока не нашли своего достойного рассмотрения, хотя именно

они определяют перспективность модернизации городской транспортной инфраструктуры на основе пассажирских канатных дорог.

Строительство пассажирской канатной дороги в условиях сильно урбанизированной среды крупного города или мегаполиса является весьма затратной технической и экономической задачей [2, 23, 24]. Стоимость строительства включает расходы на проектно-конструкторские, проектно-изыскательские, строительные-монтажные работы, приобретение необходимого механического оборудования, создания автоматизированной системы управления движением и др. Значительную составляющую в общую стоимость строительства канатной дороги вносят затраты на строительство станций для посадки пассажиров, на изготовление и установку промежуточных опор вдоль линии канатной дороги, на приобретение тяговых и несущих стальных канатов.

Как было показано в [23-25], задача расположения промежуточных опор канатной дороги является задачей совместной техни-

кой и экономической оптимизации. Целью оптимизации является обеспечение минимальной величины затрат на возведение станций для посадки пассажиров, промежуточных опор, приобретение тягового и несущих канатов, а также комплекта устанавливаемого на опору необходимого технологического оборудования [23]. Постановка и решение данной оптимизационной задачи позволяет существенно удешевить строительство пассажирских подвесных канатных дорог в урбанизированной среде [2, 24, 25].

Впервые подход к анализу экономической составляющей проблемы модернизации системы городского общественного транспорта на основе пассажирских подвесных канатных дорог мехатронного типа и к разработке соответствующих оптимизационных математических моделей был сделан в [24]. Рассмотренная в [24] расчетная схема участка подвесной канатной дороги между двумя соседними промежуточными опорами приведена на рис. 1.

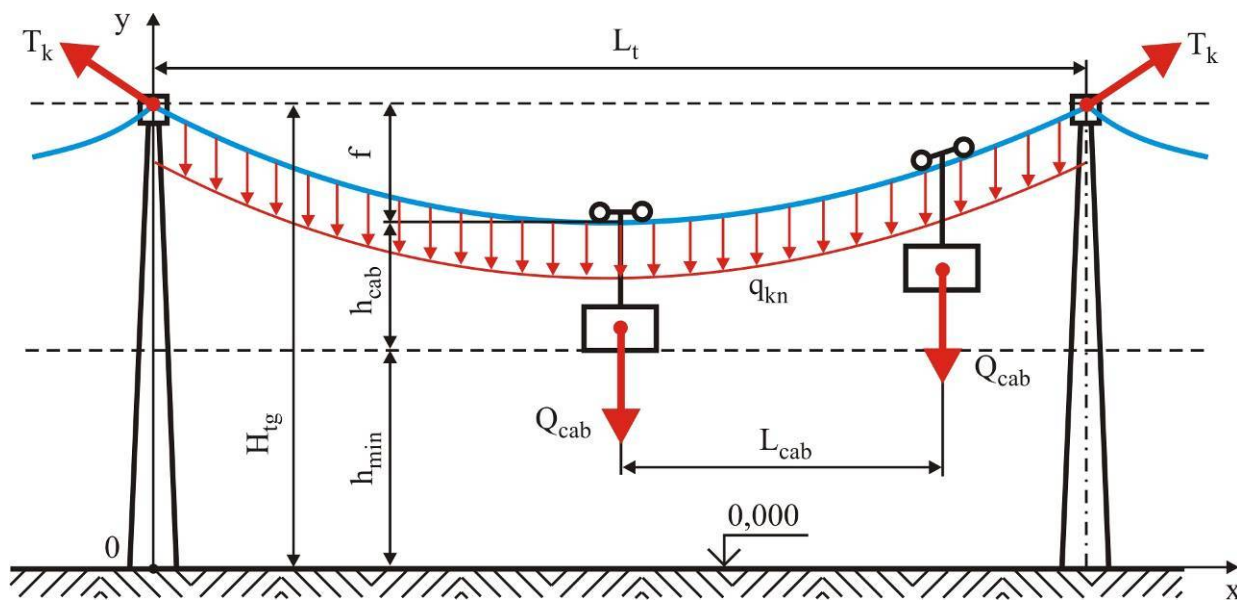


Рис. 1. Расчетная схема участка подвесной канатной дороги между соседними промежуточными опорами [24]

В качестве варьируемых параметров задачи оптимизации шага установки промежуточных опор канатного метро было предложено использовать две независимые величины: расстояние между опорами  $L_t$  и усилие

натяжения несущих канатов  $T_k$ . Из них был сформирован вектор управляемых параметров вида [24]

$$\{x\}^T = \{x_1 \ x_2\} = \{L_t \ T_k\}.$$



Другие технические и экономические характеристики канатной дороги предложено считать фиксированными, так как оно либо задаются в качестве исходных данных, либо вычисляются в зависимости от указанных управляемых параметров. К первой группе были отнесены [2, 24]: общая длина канатной дороги  $L_{tr}$ , расстояние между пассажирскими кабинами  $L_{cab}$ , вес пассажирской кабины  $Q_{cab}$ , допустимое высотное приближение пассажирских кабин к зданиям и сооружениям  $h_{min}$ , вертикальный габаритный размер кабины  $h_{cab}$ , коэффициент усиления конструкции опоры при действии максимально допустимого по условию прочности каната усилия натяжения  $\psi$ , коэффициент динамичности  $\psi_d$ , минимальный коэффициент запаса прочности каната  $[n]_k$ , число несущих канатов  $n_{kn}$ , эмпирические коэффициенты для расчета стоимости фундамента промежуточной опоры  $C_{f0}$  и  $a_f$ , эмпирические коэффициенты для расчета стоимости промежуточной опоры  $C_{i0}$  и  $a_i$ , эмпирический коэффициент для расчета собственного веса 1 погонного метра длины каната  $q_{k0}$ , эмпирические коэффициенты для расчета агрегатной прочности (разрывного усилия) каната  $r_{k0}$ ,  $r_{k1}$  и  $r_{k2}$ , эмпирические коэффициенты для расчета стоимости 1 погонного метра длины каната  $c_{k0}$ ,  $c_{k1}$  и  $c_{k2}$ . Ко второй группе отнесены [2, 24]: интенсивность распределенной нагрузки от собственного веса каната  $q_{kn}$ , интенсивность распределенной нагрузки от веса пассажирских кабин  $q_{cab}$ , стрела провисания несущих канатов в пролете между соседними промежуточными опорами  $f$ , диаметр тягового каната  $d_{kt}$ , диаметр несущего каната  $d_{kn}$ , геометрическая высота промежуточной опоры  $H_{ig}$ , длина канатов в пролете между соседними промежуточными опорами  $l_k$ , число промежуточных опор  $n_t$ . Из величин второй группы было предложено сформировать вектор управляемых параметров, которые не под-

лежат варьированию в процессе решения оптимизационной задачи:

$$\{z\}^T = \{z_1 z_2 z_3 z_4 z_5 z_6 z_7 z_8\} = \{q_{kn} q_{cab} f d_{kt} d_{kn} H_{ig} l_k n_t\}.$$

Окончательно задача технико-экономической оптимизации шага установки промежуточных опор подвесной канатной дороги на горизонтальной плоскости сводится к минимизации целевой функции – суммарной стоимости изготовления и монтажа опор, приобретения тягового и несущих канатов. Согласно [24] целевая функция имеет вид:

$$\begin{aligned} \Pi(\{x\}, \{z\}) = & \frac{L_{tr}}{x_1} \left\langle C_{f0} \left[ h_{min} + h_{cab} + \frac{\psi_d(z_1 + z_2)x_1^2}{8x_2} \right] \times \right. \\ & \left. \times \left( 1 + \psi \frac{x_2[n]_k}{R_{kn}} \right) \right\rangle^{a_f} + \\ & + C_{i0} \left\langle \left[ h_{min} + h_{cab} + \frac{\psi_d(z_1 + z_2)x_1^2}{8x_2} \right] \times \right. \\ & \left. \times \left( 1 + \psi \frac{x_2[n]_k}{R_{kn}} \right) \right\rangle^{a_i} + C_e \left. \right\rangle + \\ & + (C_{kt} + n_{kn} C_{kn}) L_{tr} \left[ 1 + \frac{\psi_d^2 (z_1 + z_2)^2 x_1^2}{24x_2^2} \right] \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (1)$$

При этом должны выполняться ограничения в форме неравенств [24], определяющие требования к:

- допустимому диапазону изменения величины шага установки соседних опор
 
$$x_1 \geq 0; \quad L_{tmax} - x_1 \geq 0; \quad L_{tr}/x_1 - 1 \geq 0;$$
- допустимым диапазонам изменения диаметров тягового и несущих канатов
 
$$d_{ktmax} - d_{kt} \geq 0; \quad d_{kt} - d_{ktmin} \geq 0;$$

$$d_{knmax} - d_{kn} \geq 0; \quad d_{kn} - d_{knmin} \geq 0;$$
- максимально допустимой величине провисания несущего каната между опорами

$$\psi_f x_1 - \frac{\psi_d (z_1 + z_2)x_1^2}{8x_2} \geq 0;$$

- минимальному усилию натяжения каната согласно требованиям ПБ 10-559-03 [26]

$$x_2 - 10n_{cab}\psi_d Q_{cab} / n_{kn} \geq 0; \quad (2)$$

- максимальному усилию натяжения каната, исходя из его наибольшей возможной агрегатной прочности

$$R_{kn}(d_{kn \max})/[n]_k - x_2 \geq 0;$$

- максимальной высоте промежуточной опоры

$$H_{t \max} - h_{\min} - h_{cab} - \frac{\psi_d(z_1 + z_2)x_1^2}{8x_2} \geq 0,$$

где  $L_{t \max}$  - предельное расстояние между промежуточными опорами;  $d_{kt \max}$ ,  $d_{kn \max}$  - максимальный диаметр тягового и несущего канатов [2, 24];  $d_{kt \min}$ ,  $d_{kn \min}$  - минимальный диаметр тягового и несущего канатов [2, 24];  $\psi_f$  - коэффициент допустимого провисания каната между опорами;  $n_{cab}$  - число пассажирских кабин, одновременно находящихся в пределах одного пролета;  $R_{kn}(d_{kn \max})$  - агрегатная прочность каната максимального диаметра выбранной конструкции [2, 24];  $H_{t \max}$  - предельно допустимая высота промежуточной опоры.

### III. Математическая модель и методика ускоренной оптимизационной оценки основных технических параметров подвесной канатной дороги.

В [24] было выполнено решение указанной задачи оптимизации (1) с учетом приведенных выше ограничений на варьируемые переменные - расстояние между промежуточными опорами  $L_t$  и усилие натяжения несущих канатов  $T_k$ . Для этого использовался один из прямых методов нелинейной условной оптимизации типа метода Хука-Дживса [27].

Расчеты показали, что в пределах изменения исходных параметров задачи оптимизации  $L_{tr}$ ,  $L_{cab}$ ,  $Q_{cab}$ ,  $h_{\min}$ ,  $h_{cab}$ ,  $\psi$ ,  $\psi_d$ ,  $[n]_k$ ,  $C_{f0}$ ,  $a_f$ ,  $C_{t0}$ ,  $a_t$ ,  $q_{k0}$ ,  $r_{k0}$ ,  $r_{k1}$ ,  $r_{k2}$ ,  $c_{k0}$ ,  $c_{k1}$ ,  $c_{k2}$ , характерных для современных пассажирских подвесных канатных дорог, точка минимума целевой функции (1) лежит на ограничении (2), т.е. определяется минимальным усилием натяжения несущего каната согласно требованиям ПБ 10-559-03 [26]. При этом точка минимума лежит на достаточном удалении от возможных точек пересечения ограничения (2) с каким-либо другим ограничением задачи оптимизации.

Этот факт позволяет сделать вывод о том, что положение точки минимума целевой функции (1) в двухмерном пространстве  $\{x\}^T = \{x_1 \ x_2\} = \{L_t \ T_k\}$  можно искать не во всем этом пространстве, а только вдоль линии ограничения (2). Учитывая, что принадлежность точки минимума линии ограничения (2) определяется равенством

$$x_2 - 10n_{cab}\psi_d Q_{cab} / n_{kn} = 0,$$

можно сразу же определить оптимальное значение одного из варьируемых параметров задачи оптимизации:

$$x_2^{opt} = T_k^{opt} = 10n_{cab}\psi_d Q_{cab} / n_{kn}. \quad (3)$$

При расчете  $x_2^{opt} = T_k^{opt}$  с помощью уравнения (3) следует принимать число пассажирских кабин  $n_{cab} = 1$ .

Таким образом, теперь в процессе оптимизации целевой функции (1) необходимо определять оптимальное значение лишь одного варьируемого параметра - шага промежуточных опор  $x_1^{opt} = L_t^{opt}$ , т.е. исходная задача двумерной оптимизации сводится к более простой в математическом аспекте одномерной задаче нелинейной оптимизации.

Тот факт, что точка минимума целевой функции (1) не совпадает с какими-либо точками пересечения ограничения (2) с другими ограничениями, еще более упрощает задачу, так как она превращается в задачу безусловной нелинейной оптимизации. Ее решение возможно не только с помощью эффективных численных методов, но и аналитически. Естественно, полученное в результате решения оптимальное значение шага промежуточных опор  $x_1^{opt} = L_t^{opt}$  должно быть проверено на его соответствие остальным ограничениям задачи оптимизации [31].

Таким образом, целевую функцию (1) можно записать в виде

$$U(x_1, \{z\}) = \frac{L_{tr}}{x_1} \left\{ C_{f0} \left[ h_{\min} + h_{cab} + \frac{\psi_d(z_1 + z_2)x_1^2}{8T_k^{opt}} \right] \times \right. \\ \left. \times \left( 1 + \psi \frac{T_k^{opt} [n]_k}{R_{kn}} \right) \right\}^{a_f} +$$

$$+ C_{t0} \left\{ \left[ h_{\min} + h_{cab} + \frac{\psi_d(z_1 + z_2)x_1^2}{8T_k^{opt}} \right] \times \right. \quad (4)$$

$$\left. \times \left( 1 + \psi \frac{T_k^{opt}[n]_k}{R_{kn}} \right) \right\}^{a_t} + C_e \left. \right\} +$$

$$+ (C_{kt} + n_{kn}C_{kn})L_{tr} \left[ 1 + \frac{\psi_d^2(z_1 + z_2)^2 x_1^2}{24(T_k^{opt})^2} \right] \rightarrow \min$$

или в более компактном виде

$$\Pi(x_1, \{z\}) = \frac{1}{x_1} \left[ A_f(H + Bx_1^2)^{a_f} + A_t(H + Bx_1^2)^{a_t} + C_e \right] +$$

$$+ A_k(1 + Dx_1^2) \rightarrow \min,$$

где  $A_f = L_{tr}C_{f0} \left( 1 + \psi \frac{T_k^{opt}[n]_k}{R_{kn}} \right)^{a_f}$  ;

$$A_t = C_{t0} \left( 1 + \psi \frac{T_k^{opt}[n]_k}{R_{kn}} \right)^{a_t} ; \quad A_k = C_{kt} + n_{kn}C_{kn} ;$$

$$B = \frac{\psi_d(z_1 + z_2)}{8T_k^{opt}} ; \quad D = \frac{\psi_d^2(z_1 + z_2)^2}{24(T_k^{opt})^2} .$$

Нахождение минимума целевой функции (4) одного переменного  $x_1$  может выполняться одним из численных методов безусловной оптимизации [27-29].

Возможен другой подход к определению  $x_1^{opt} = L_t^{opt}$ . Учитывая, что в точке минимума  $x_1^{opt} = L_t^{opt}$  целевой функции (4) выполняется условие [30]

$$\frac{d}{dx_1} \Pi(x_1, \{z\}) = 0 ,$$

то для определения искомого значения  $x_1^{opt} = L_t^{opt}$  получим нелинейное алгебраическое уравнение следующего вида:

$$2A_k D(x_1^{opt})^3 + 2 \left\{ A_f a_f [H + B(x_1^{opt})^2]^{a_f - 1} + \right.$$

$$+ A_t a_t [H + B(x_1^{opt})^2]^{a_t - 1} \left. \right\} (x_1^{opt})^2 -$$

$$- \left\{ A_f [H + B(x_1^{opt})^2]^{a_f} + A_t [H + B(x_1^{opt})^2]^{a_t} + C_e \right\} = 0 . \quad (5)$$

Уравнение (5) может быть решено с помощью одного из численных методов решения алгебраических уравнений [31].

Если найденное значение

$$x_1^{opt} = L_t^{opt} \in (L_{cab}; 2L_{cab}] ,$$

то, следовательно, в пределах одного пролета между соседними промежуточными опо-

рами будут находиться две пассажирские кабины. Поэтому необходимо провести новую итерацию определения оптимального значения шага  $x_1^{opt} = L_t^{opt}$ . Для этого необходимо вычислить новые значения  $x_2^{opt} = T_k^{opt}$  с помощью уравнения (3) и неуправляемого параметра  $z_2$  с помощью уравнения

$$z_2 = \frac{n_{cab} Q_{cab}}{n_{kn} L_{cab}} ,$$

подставив в указанные уравнения величину  $n_{cab} = 2$ .

Аналогично, если найденное значение

$$x_1^{opt} = L_t^{opt} \in (2L_{cab}; 3L_{cab}] ,$$

то, следовательно, в пределах одного пролета между соседними промежуточными опорами будут находиться три пассажирские кабины. При этом новые значения  $x_1^{opt} = L_t^{opt}$  и  $z_2$  необходимо найти при  $n_{cab} = 3$ . И так далее.

На основе найденных оптимальных значений шага промежуточных опор  $L_t^{opt}$  и усилия натяжения несущих канатов  $T_k^{opt}$  могут быть рассчитаны другие основные технические характеристики пассажирской подвесной канатной дороги по следующим зависимостям:

- высота промежуточных опор

$$H_{ig} = h_{\min} + h_{cab} + \frac{\psi_d(z_1 + z_2)(L_t^{opt})^2}{8T_k^{opt}} ;$$

- длина несущего каната в пределах одного пролета

$$l_k = L_t^{opt} \left[ 1 + \frac{\psi_d^2(z_1 + z_2)^2 (L_t^{opt})^2}{24(T_k^{opt})^2} \right] ;$$

- диаметр несущего каната

$$d_{kn} = \frac{\sqrt{r_{k1}^2 - 4r_{k2} \{ r_{k0} - [n]_k (T_k^{opt}) \}} - r_{k1}}{2r_{k2}} .$$

#### IV. Анализ результатов расчетов.

Зависимость (3) для оценки оптимального значения усилия натяжения несущих канатов можно представить в виде

$$x_2^{opt} = T_k^{opt} = 10\psi_d L_{cab} z_2 .$$

Из данного выражения видно, что при заданном значении расстояния между пассажир-

скими кабинами  $L_{cab}$  величина  $T_k^{opt}$  определяется интенсивность распределенной нагрузки на несущий канат от веса пассажирской кабины  $z_2$ . Соотношение между весом пассажирской кабины и расстоянием между кабинами при равном значении параметра  $z_2$  для двух характерных значений 20 и 40 Н/м показано на рис. 2.

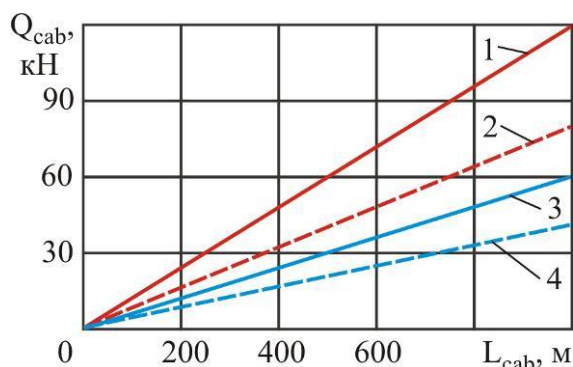


Рис. 2. Соотношение между весом пассажирской кабины и расстоянием между кабинами при равном значении параметра  $z_2$ : 1 -  $z_2 = 40$  Н/м,  $n_{kn} = 3$ ; 2 -  $z_2 = 40$  Н/м,  $n_{kn} = 2$ ; 3 -  $z_2 = 20$  Н/м,  $n_{kn} = 3$ ; 4 -  $z_2 = 20$  Н/м,  $n_{kn} = 2$

С целью сравнения результатов расчетов, проведенных путем оптимизации целевой функции двух переменных (1), предложенной в [24], и целевой функции одного переменного (4), предложенной в данной работе, указанные расчеты были выполнены при одинаковых исходных данных, соответствующих принятым в [24]. Были рассмотрены два варианта канатной дороги на основе использования опор, аналогичных по стоимости опорам типа ПГМ 500 и типа МУ 330, при трех несущих и одном тяговом канатах по ГОСТ 3079-80 маркировочной группы  $G_k = 2160$  (220) кН/мм<sup>2</sup> (кгс/мм<sup>2</sup>).

Расчеты по предложенному упрощенному алгоритму показали, что положения точек минимума целевых функций (4) и (1) в точности совпали. Это свидетельствует об адекватности предложенного подхода к ускоренной оптимизационной оценке основных технических характеристик подвесных канатных дорог.

На рис. 3 показаны графики изменения величины целевых функций (4) вдоль ограничения (2) в зависимости от шага промежуточных опор  $L_t$ . У всех графиков (для всех конструктивных типов промежуточных опор) наблюдается качественно сходная экстремальная форма. Однако количественно они зависят от типа использованных промежуточных опор. Экстремум оказывается более выраженным в том случае, когда величина оптимального шага промежуточных опор  $L_t^{opt}$  оказывается меньше. Этот факт можно объяснить тем, что стоимость промежуточных опор выражается степенной функцией от их высоты  $H_{ig}$ , причем скорость роста стоимости опоры с увеличением высоты различна для опор разного конструктивного исполнения [2, 24]. На рис. 4 приведены сравнительные данные изменения единичной стоимости  $C_t$  промежуточных опор типа МПГ 500 и типа МУ 330 в зависимости от шага их установки, а также график изменения необходимой высоты опор. Видно, что опорам (типа МУ 330), характеризующимся большей скоростью роста их стоимости с ростом высоты, соответствует более выраженная экстремальная форма зависимости  $C(L_t)$  и меньшие значения оптимального шага промежуточных опор  $L_t^{opt}$ . Объяснение этого факта заключается в следующем: при использовании таких промежуточных опор экономически выгодным является установка более низких опор, несмотря на то, что шаг их расположения должен быть меньше, а общее число в пределах канатной дороги – больше. В этом случае такая тенденция, как увеличение затрат на использование более высоких опор, превалирует над другой тенденцией - увеличением затрат на установку большего числа опор. С другой стороны, опорам (типа МПГ 500), характеризующимся сравнительно малой скоростью роста их стоимости с ростом высоты, соответствует менее выраженная экстремальная форма зависимости  $C(L_t)$  и большие значения оптимального шага промежуточных опор  $L_t^{opt}$ . В этом случае, наоборот, такая тенденция, как



увеличение затрат на установку большего числа опор, превалирует над другой тенденцией - увеличением затрат на использование более высоких опор.

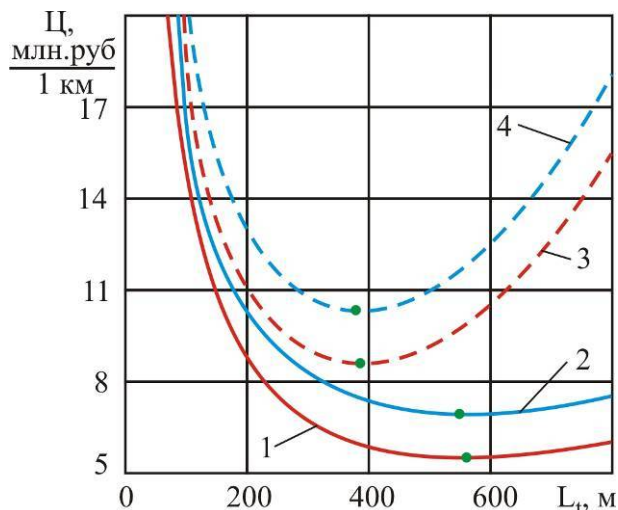


Рис. 3. Изменение величины целевых функций (4) вдоль ограничения (2) в зависимости от шага промежуточных опор:

- 1 – опоры типа МПГ 500,  $z_2 = 20$  Н/м;
- 2 – опоры типа МПГ 500,  $z_2 = 40$  Н/м;
- 3 – опоры типа МУ 330,  $z_2 = 20$  Н/м;
- 4 – опоры типа МУ 330,  $z_2 = 40$  Н/м

#### Список литературы

1. Scheingert, Z. Aerial Ropeways and Funicular Railways / Z. Scheingert. - London, 1966. - 555 p.

2. Короткий, А.А. Развитие транспортной инфраструктуры крупных городов и территорий на основе технологии канатного метро / А.А. Короткий, А.В. Лагереv, Б.Ч. Месхи, И.А. Лагереv, А.В. Панфилов. - Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2017. - 344 с. ISBN 978-5-7890-1378-6  
 DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1311913>

3. Логвинов, А.С. Пассажирские одноканатные дороги. Устройство и эксплуатация / А.С. Логвинов, А.А. Короткий. - Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2016. - 210 с.

4. Nikšić, M. Geographic and Traffic Aspects of Possibilities for Implementing Ropeway Systems in Passenger Transport / M. Nikšić, S. Gašparović // Promet-Traffic &

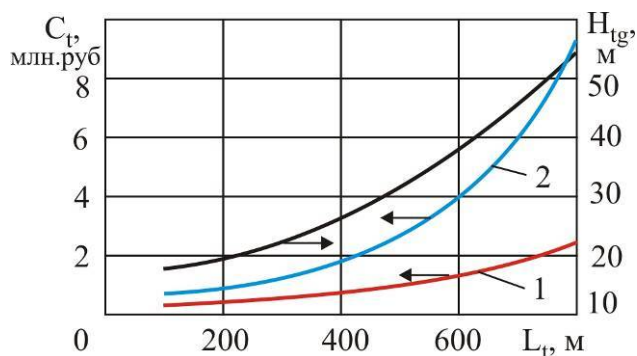


Рис. 4. Зависимости высоты и единичные стоимости промежуточных опор от шага их установки: 1 – опоры типа МПГ 500; 2 – опоры типа МУ 330

#### V. Заключение.

Предложенный алгоритм ускоренной оптимизационной оценки основных технических характеристик подвесной канатной дороги (шага установки и высоты промежуточных опор, усилия натяжения несущих канатов) позволяет получить в точности те же их значения, что и в результате решения сформулированной в [24] задачи технико-экономической оптимизации, но с применением более простых математических методов.

#### References

1. Scheingert, Z. Aerial Ropeways and Funicular Railways. London, 1966. 555 p.

2. Korotkiy A.A., Lagerev A.V., Meskhi B.Ch., Lagerev I.A., Panfilov A.V. *Razvitie transportnoy infrastruktury krupnykh gorodov i territoriy na osnove tekhnologii kanatnogo metro* [The development of transport infrastructure of large cities and territories on the basis of technology of passenger ropeways]. Rostov-na-Donu, DGTU, 2017. 344 p. ISBN 978-5-7890-1378-6  
 DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1311913>

(In Russian)

3. Logvinov A.S., Korotkiy A.A. *Passazhirskie odnokanatnye dorogi. Ustroystvo i ekspluatatsiya* [Passenger ropeways with single rope. Device and operation]. Rostov-na-Donu, DGTU, 2016. 210 p. (In Russian)

4. Nikšić M., Gašparović S. Geographic and Traffic Aspects of Possibilities for Imple-

- Transportation. – 2010. - Vol. 22. - No. 5. - P. 389-398.
5. Pestal, E. Seilbahnen und Seilkrane in Holz und Materialtransport. Wien, 1961. - 410 s.
6. Escobar-García, D. Political Determinants and Impact Analysis of Using a Cable System as a Complement to an Urban Transport System / D. Escobar-García, F. García-Orozco, C. Cadena-Gaitán // *UNU-MERIT Working Paper Series*. - 2013. - No. 2013-017. - 24 p.
7. Беркман, М.Б. Подвесные канатные дороги / М.Ю. Беркман, Г.Н. Бовский, Г.Г. Куйбида. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
8. Бовский, Г.Н. Фрагменты истории развития канатных дорог в нашей стране / Г.Н. Бовский // *Безопасность труда в промышленности*. – 2013. - № 4. – С. 86-88.
9. El-Jouzou H. A Comparative Study of Aerial Ropeway Transit (ART) Systems. Advantages and Possibilities. A thesis of Master of Sciences / H. El-Jouzou H. - Frankfurt, 2016. - 219 p.
10. Лагереv, А.В. Концепция инновационной системы городского транспорта «Канатное метро города Брянска» / А.В. Лагереv, И.А. Лагереv А.А., Короткий, А.В. Панфилов // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2012. - №3. – С. 12-15.  
DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302025>
11. Лагереv, А.В. Перспективы внедрения инновационной технологии надземных пассажирских перевозок на основе подвесных пассажирских канатных дорог для модернизации системы общественного транспорта города Брянска / А.В. Лагереv, И.А. Лагереv // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. – 2017. - №2. – С. 163-177. DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-02-163-177
12. Дукельский, А.И. Подвесные канатные дороги и кабельные краны / А.И. Дукельский. – М-Л: Машиностроение, 1966. – 484 с.
13. Alshalalfah, B. Experiences with Aerial Ropeway Transportation Systems in the Urban Environment / B. Alshalalfah, A. Shalaby, S. Dale, F. Othman // *Journal of Urban Planning and Development*, 2014, Vol.140, No.1, 04013001.
- menting Ropeway Systems in Passenger Transport. *Promet-Traffic & Transportation*, 2010, Vol. 22, No. 5, pp. 389-398.
5. Pestal E. Seilbahnen und Seilkrane in Holz und Materialtransport. Wien, 1961. 410 s.
6. Escobar-García D., García-Orozco F., Cadena-Gaitán C. Political Determinants and Impact Analysis of Using a Cable System as a Complement to an Urban Transport System. *UNU-MERIT Working Paper Series*, 2013, No. 2013-017. 24 p.
7. Berkman M.B., Bovskiy G.N., Kuybida G.G. *Podvesnye kanatnye dorogi* [Aerial ropeways]. Moscow, Mashinostroenie, 1984. 264 p.
8. Bovskiy G.N. *Fragments of the history of cable cars in our country* [Fragments of the history of cable cars in our country]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2013, No. 4, pp. 86-88 (In Russian)
9. El-Jouzou H. A Comparative Study of Aerial Ropeway Transit (ART) Systems. Advantages and Possibilities. A thesis of Master of Sciences. Frankfurt, 2016. 219 p.
10. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Korotkiy A.A., Panfilov A.V. Innovation transport system “Bryansk rope metro”. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, No. 3, pp. 12-15. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302025> (In Russian)
11. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Prospects of introduction of innovative technology overhead passenger traffic on the basis of the passenger ropeways for the modernization of the public transport system of the Bryansk city. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, No.2, pp. 163-177.  
DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2017-03-02-163-177>. (In Russian)
12. Dukelskiy A.I. *Podvesnye kanatnye dorogi i kabelnye kраны* [Overhead cableways and cable cranes]. Moscow-Leningrad, Mashinostroenie, 1966. 484 p. (In Russian)
13. Alshalalfah B., Shalaby A., Dale S. Experiences with Aerial Ropeway Transportation Systems in the Urban Environment. *Journal of Urban Planning and Development*, 2014, Vol.140, No.1, 04013001.

- ban Planning and Development. - 2014. - Vol. 140. - No. 1.  
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000158](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000158).
14. Gutiérrez, J. Using Accessibility Indicators and GIS to Assess Spatial Spillovers of Transport Infrastructure Investment / J. Gutiérrez, A. Condeco-Melhorado, J. Martín // *Journal of Transport Geography*. – 2010. – No. 18. – P. 141-152.
15. Alshalalfah, B. Improvements and Innovations in Aerial Ropeway Transportation Technologies: Observations from Recent Implementations / B. Alshalalfah, A. Shalaby, S. Dale, F. Othman // *Journal of Transportation Engineering*. - 2013. - Vol. 139. - No. 8. - P. 814-821.  
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000548](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000548).
16. Neumann, E. Cable Propelled People Movers in Urban Environments / E. Neumann // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. - 1992. - No. 1349. – P. 125-132.
17. Guštinčič, J. Analysis of Oscillations in a Cableway: Wind Load Effects / J. Guštinčič, L.M.G. Raffi // *Modelling in Science Education and Learning*. – 2013. - Vol. 6 (1). - No. 11. - P. 145-155.
18. Hoffman, K. Simulation of Vortex Excited Vibrations of a Bicable Ropeway / K. Hoffman, R. Petrova // *Engineering Review*. – 2009. – Vol. 29. – No. 1. – P. 11-23.
19. Патарая, Д.И. Расчет и проектирование канатных систем на примере подвесных дорог / Д.И. Патарая. – Тбилиси: Метснереба, 1991. – 102 с.
20. Gavrilov, S. Non-stationary problems in dynamics of a string on an elastic foundation subjected to a moving load / S. Gavrilov // *Journal of Sound and Vibration*. – 1999. – Vol. 222. – No. 1. - P. 345-361.
21. Jian Qin. Analysis of the Working Cable System of Single-span Circulating Ropeway / Jian Qin, Liang Qiao, Jun Chen, Jiancheng Wan, Ming Jiang, Chunhua Hu // *MATEC Web of Conferences*. – 2017. - Vol. 136. DOI: [10.1051/mateconf/201713602003](https://doi.org/10.1051/mateconf/201713602003)
22. Nordin, A.S. Air rights - A study of urban ropeways from a real estate law perspective. Master of Sciences Thesis. Stockholm, Sweden, 2016, No. TRITA-FOB-FaV-MASTER-2016:33. 66 p.
23. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Optimal design of the cable car line. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, No. 2, pp. 406-415.  
DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302241>
14. Gutiérrez J., Condeco-Melhorado A., Martín J. Using Accessibility Indicators and GIS to Assess Spatial Spillovers of Transport Infrastructure Investment. *Journal of Transport Geography*, 2010, No.18, pp. 141-152.
15. Alshalalfah B., Shalaby A., Dale S., Othman F. Improvements and Innovations in Aerial Ropeway Transportation Technologies: Observations from Recent Implementations. *Journal of Transportation Engineering*, 2013, Vol.139, No.8, pp. 814-821.
16. Neumann, E. Cable Propelled People Movers in Urban Environments. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1992, No.1349, pp.125-132.
17. Guštinčič J., Raffi L.M.G. Analysis of Oscillations in a Cableway: Wind Load Effects. *Modelling in Science Education and Learning*, 2013, Vol. 6(1), No.11, pp. 145-155.
18. Hoffman K., Petrova R. Simulation of Vortex Excited Vibrations of a Bicable Ropeway. *Engineering Review*, 2009, Vol.29, No.1, pp. 11-23.
19. Pataraya D.I. *Raschet i proektirovanie kanatnykh system na primere podvesnykh dorog* [Calculation and design of cable systems on the example of suspension roads]. Tbilisi, Metsniereba, 1991. 102 p. (In Russian)
20. Gavrilov S. Non-stationary problems in dynamics of a string on an elastic foundation subjected to a moving load. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, Vol. 222, No.1, pp. 345-361.
21. Jian Qin, Liang Qiao, Jun Chen, Jiancheng Wan, Ming Jiang, Chunhua Hu. Analysis of the Working Cable System of Single-span Circulating Ropeway. *MATEC Web of Conferences*, 2017, Vol. 136, 02003. DOI: [10.1051/mateconf/201713602003](https://doi.org/10.1051/mateconf/201713602003)
22. Nordin A.S. Air rights - A study of urban ropeways from a real estate law perspective. Master of Sciences Thesis. Stockholm, Sweden, 2016, No. TRITA-FOB-FaV-MASTER-2016:33. 66 p.
23. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Optimal design of the cable car line. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, No. 2, pp. 406-415.  
DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302241>

- tive. Master of Sciences Thesis / A.S. Nordin. – Stockholm, 2016. - No. TRITA-FOB-FaV-MASTER-2016:33. - 66 p.
23. Лагерев, А.В. Оптимальное проектирование линии канатного метро / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев // Вестник Брянского государственного университета. - 2015. – № 2. – С. 406-415.  
DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302241>
24. Лагерев, А.В. Оптимизация шага установки промежуточных опорных конструкций вдоль линии канатного метро / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев // Вестник Брянского государственного университета. – 2014. - № 4.- С. 22-30.  
DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302237>
25. Лагерев, А.В. Оптимальное проектирование линий канатного метро в условиях сильно урбанизированной городской среды / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев // Известия МГТУ «МАМИ». - 2015. – Т.1. - № 1 (23). – С. 57-65.
26. ПБ 10-559-03. Правила устройства и безопасной эксплуатации пассажирских подвесных и буксировочных канатных дорог. – Введ. 2003-05-01. – М.: Госстандарт: Изд-во стандартов, 2003. – 47 с.
27. Reklaitis, G.V. Engineering optimization. Methods and applications / G.V. Reklaitis, A. Ravindran, K.M. Ragsdell. – N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1983.
28. Лагерев, И.А. Оптимальное проектирование подъемно-транспортных машин / И.А. Лагерев, А.В. Лагерев. – Брянск: БГТУ, 2013. 228 с. - ISBN 978-5-89838-680-1.  
DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1202230>
29. Gill, Ph.E. Practical optimization / Ph.E. Gill, W. Murray, M.H. Wright. – London: Academic Press Inc. Ltd, 1981.
30. Борнштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Борнштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1980. – 976 с.
31. Shoup T.E. A practical guide to computer methods for engineers / T.E. Shoup. - Prentice-Hall, 1979.
- (In Russian)
24. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Cable transport system “Kanatnoe metro” towers distance optimization. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, No.4, pp. 22-30.  
DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302237>  
(In Russian)
25. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Optimal design of cable subway lines in a highly urbanized city environment. *Izvestiya MGTU “MAMI”*, 2015, Vol.1, No.2, pp. 57-65. (In Russian)
26. ПБ 10-559-03. Правила устройства и безопасной эксплуатации пассажирских подвесных и буксировочных канатных дорог. Moscow, Gosstandart, 2003. 47 p. (In Russian)
27. Reklaitis G.V., Ravindran A., Ragsdell K.M. Engineering optimization. Methods and applications. N.Y., John Wiley & Sons, Inc., 1983.
28. Lagerev I.A., Lagerev A.V. *Optimalnoe proektirovanie pod'yemno-transportnykh mashin* [Optimal design of lifting-transport machines]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Tekhnicheskiiy Universitet, 2013. 228 p. ISBN 978-5-89838-680-1.  
DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1202230>  
(In Russian)
29. Gill Ph.E., Murray W., Wright M.H. Practical optimization. London, Academic Press Inc. Ltd, 1981.
30. Bronshteyn I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchshchikhsya vtuzov* [Handbook of mathematics for engineers and students of technical schools]. Moscow, Nauka, 1980. 976 p. (In Russian)
31. Shoup T.E. A practical guide to computer methods for engineers. Prentice-Hall, 1979.



УДК 621.833.16

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ РАБОТ ПРИ РАЗРАБОТКЕ  
ПРИВОДОВ МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ  
СЕМАНТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

AUTOMATION OF DESIGN WORKS AT DEVELOPMENT OF MACHINE DRIVES  
WITH THE USE OF FUNCTIONAL SEMANTIC NETWORKS

Миронова М.Н.  
Mironova M.N.

Белорусско-Российский университет (Могилев, Республика Беларусь)  
Belarusian-Russian University (Mogilev, Republic of Belarus)

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы расчета параметров приводов. Использован подход, базирующийся на технологиях функциональных семантических сетей. Описана интеллектуальная система Compact, осуществляющая многофакторную оптимизацию параметров радиально-плунжерного редуктора. Рассмотрена задача расчета и проектирования приводов на основе использования функциональной семантической сети.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, функциональные семантические сети, интеллектуальная система, многофакторная оптимизация.

**Дата принятия к публикации:** 06.09.2018  
**Дата публикации:** 25.09.2018

**Сведения об авторе:**

**Миронова Марина Николаевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Государственного учреждения высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет»; [MarinaMN16@mail.ru](mailto:MarinaMN16@mail.ru).

**Abstract.** The questions of calculation of parameters of drives are considered in this article. An approach based on the technologies of functional semantic networks was used. The intelligent system Compact is described, which performs multifactor optimization of the radial-plunger reducer parameters. The problem of calculating and designing drives based on the use of a functional semantic network is considered.

**Keywords:** artificial intelligence, functional semantic networks, intelligent system, multifactor optimization.

**Date of acceptance for publication:** 06.09.2018  
**Date of publication:** 25.09.2018

**Author' information:**

**Marina N. Mironova** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department «Engineering Technology» at State Institution of Higher Professional Education «Belarusian-Russian University»; [MarinaMN16@mail.ru](mailto:MarinaMN16@mail.ru).

Снижение материалоемкости приводных устройств машин, автоматизация расчетов и проектирования редуцирующих агрегатов позволяет снизить себестоимость и повысить конкурентоспособность продукции по сравнению с зарубежными аналогами.

Однако последовательное снижение массогабаритных показателей отдельных деталей с целью оптимизации массогабаритных показателей конструкции, как правило, малоэффективно, так как при этом не в полной мере учитываются функциональные взаимосвязи между параметрами конструкции и общие требования к ее эксплуатационным показателям. Это объясняется отчасти тем, что расчет и проектирование механизмов базируется на использовании значительного

количества математических выражений и ограничений сложного вида, связанных между собой функциональными зависимостями. Учет таких связей позволяет построить вычислительные алгоритмы, учитывающие общие требования к конструкции, и обеспечить минимальные массогабаритные показатели при сохранении требуемой функциональности.

Выявление взаимосвязей между параметрами приводов механизмов возможно на основе подхода, базирующегося на технологиях искусственного интеллекта (функциональных семантических сетей), позволяющих осуществлять выбор оптимальных значений параметров приводов, обеспечиваю-

щих минимальные их массогабаритные показатели [1].

В связи с этим для расчета и проектирования машин была разработана система искусственного интеллекта Compact [2], построенная на базе функциональных семантических сетей, обеспечивающая многофакторную оптимизацию конструкции. В отличие от существующих, такая система позволяет обеспечить комплексную автоматизацию проектирования за счет учета функциональных взаимосвязей между параметрами деталей и узлов конструкции.

Особенностью системы является отсутствие традиционного программирования процедуры поиска решения задачи, так как данное программное обеспечение формирует алгоритм решения задачи самостоятельно, используя набор зависимостей (формул), предварительно введенных в символьном виде. Последовательность расчета, преобразований, подстановок формул при этом выбирается самой системой, что позволяет ее использовать проектировщиками невысокой квалификации, а также в качестве консультанта конструктора на промышленных предприятиях.

Общая структура системы и схема ее взаимодействия с конечным пользователем показаны на рис. 1.

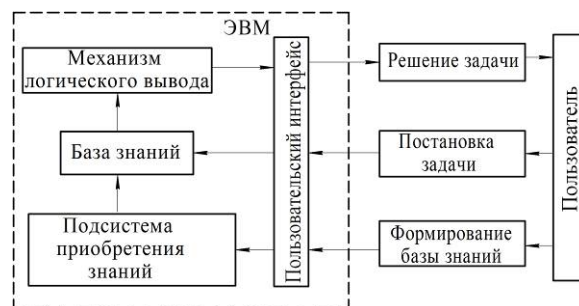


Рис. 1. Структура системы и ее взаимодействие с конечным пользователем

В состав системы входят следующие модули:

- пользовательский интерфейс;
- подсистема приобретения знаний;
- база знаний;
- механизм логического вывода.

Интерфейс системы, представленный на рис. 2, ориентирован на диалог пользователя с программным обеспечением как на стадии ввода исходной информации, так и при получении готового решения поставленной задачи.

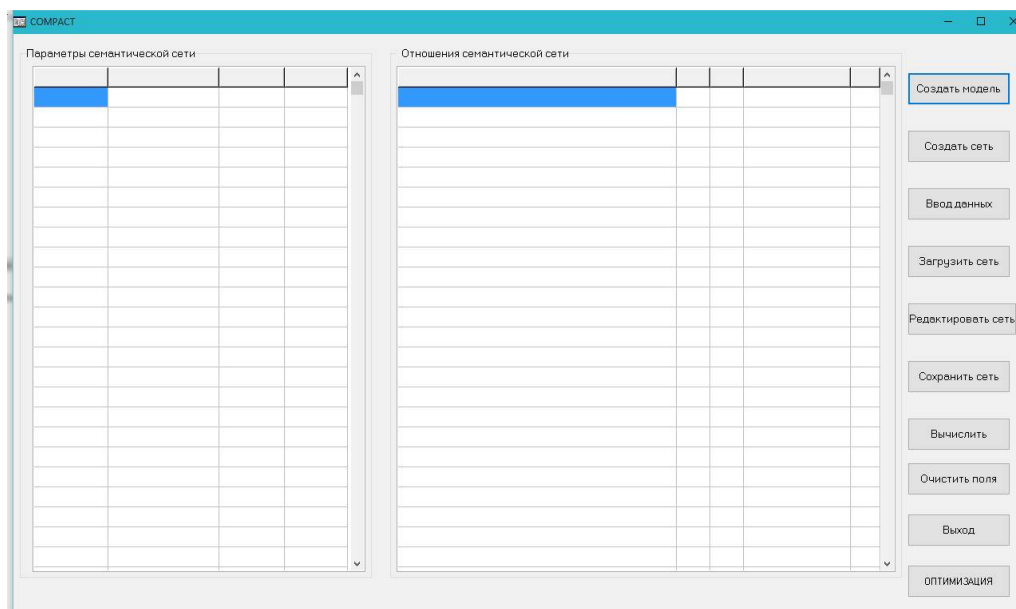


Рис. 2. Интерфейс системы

Подсистема приобретения знаний включает:

- модуль создания базы знаний;
- модуль загрузки ранее созданной базы знаний;

- модуль редактирования базы знаний;
- модуль сохранения базы знаний.

Модуль загрузки базы знаний с помощью процедуры «Загрузить сеть» (рис. 2) позво-

ляет системе работать с готовыми базами знаний, которые хранятся в файлах текстового типа.

Процедура «Редактировать сеть» добавляет новые отношения в базу знаний или вносит изменения в отношения ранее по-

строенной функциональной семантической сети (рис. 3).

Модуль сохранения позволяет сохранять как созданную базу знаний, так и изменения, внесенные в готовую базу с помощью процедуры «Сохранить сеть» (рис. 3).

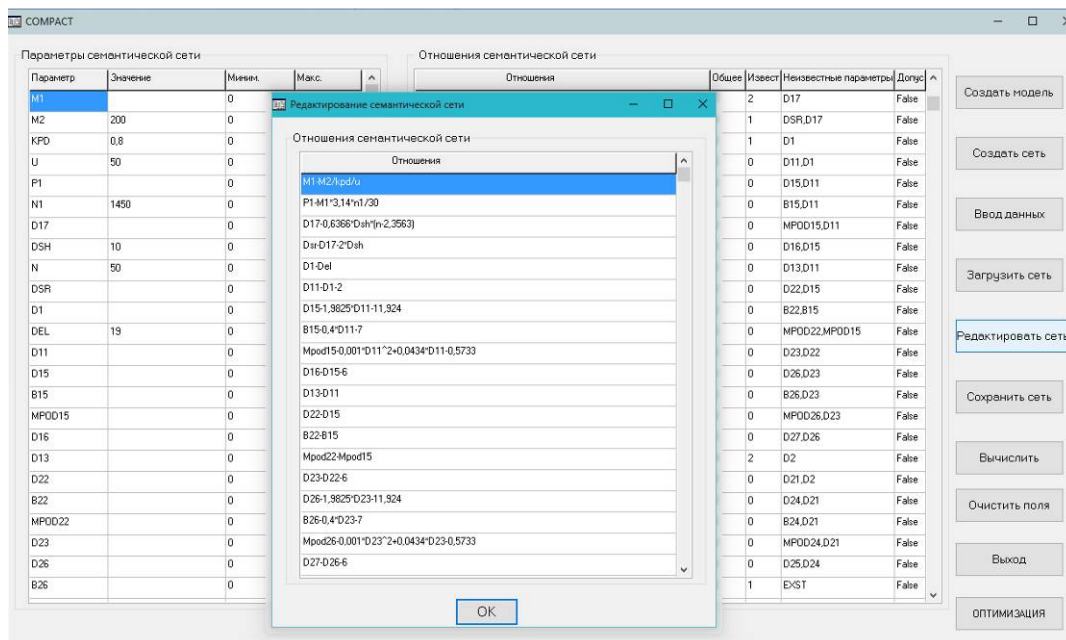


Рис. 3. Диалоговое окно редактирования семантической сети

Модуль создания базы знаний осуществляет построение технической модели проектируемого механизма, а также определение математических зависимостей, описывающих созданную модель.

С помощью процедуры «Создать сеть» (рис. 3) система самостоятельно определяет параметры, входящие в состав математических зависимостей, описывающих ранее созданную техническую модель, и автоматически формирует математическую модель проектируемой системы в виде функциональной семантической сети, представляющую собой логическую схему, описывающую функциональные взаимосвязи между аргументами совокупности указанных математических зависимостей [3].

Таким образом, функционирование системы Comprast осуществляется по следующему принципу. Первоначально создается техническая модель, затем строится математическая модель и формируется алгоритм решения задачи. Формирование моделей осуществляется тремя соответствующими

процессорами (рис. 4).

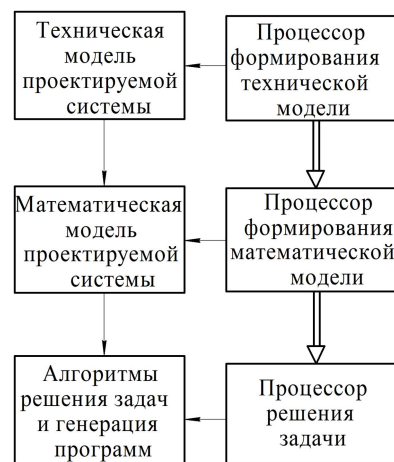


Рис. 4. Алгоритм функционирования системы

Процессор формирования технической модели содержит набор диалоговых окон, с помощью которых последовательно выбираются характеристики проектируемых приводов механизмов.

Процессор формирования математической

модели устанавливает соответствие между компонентами технической модели и моделирующими их математическими отноше-

ниями, а также строит математическую модель проектируемой системы в виде функциональной семантической сети (рис. 5).

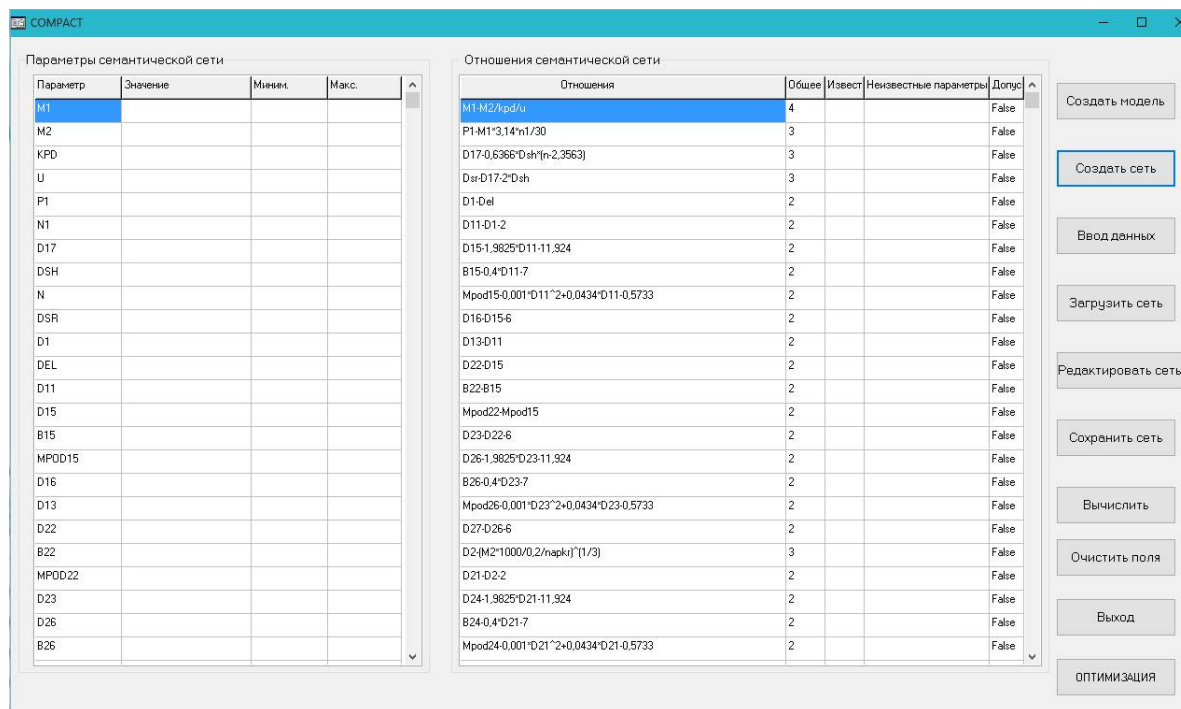


Рис. 5. Диалоговое окно с функциональной семантической сетью

Процессор решения задач осуществляет планирование вычислений на семантических сетях, заключающееся в синтезе алгоритма решения задачи, и формирует программу, выполняемую системой логического вывода.

Переход от математического уровня к программному осуществляется в процессе постановки задачи при нахождении минимально замкнутой системы отношений, построение которой позволяет указать какие разрешения должны быть у каждого из отношений сети и из каких программных модулей образуется цепочка рабочей программы [4].

Организацию и управление вычислительным процессом осуществляет механизм логического вывода, состоящий из трех основных модулей:

- модуля, осуществляющего семантический анализ строкового выражения, содержащего функциональную зависимость;
- модуля, который производит чтение заданного текста и формирует так называемую польскую запись;
- модуля, осуществляющего расчет выра-

жения по сформированной польской записи.

Модуль, осуществляющий семантический анализ строкового выражения, поочередно считывает символы строки и определяет его принадлежность или к числовой константе, переменной, символу операции, или к имени функции.

По результатам семантического анализа строкового выражения, содержащего функциональную зависимость, создается обратная польская запись, представляющая собой массив управляющих команд, выполнение которых обеспечивает требуемую последовательность вычислений [5].

Задача расчета и проектирования приводов на основе использования функциональной семантической сети сводится к задаче многофакторной оптимизации:

$$\begin{cases} M(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n) \rightarrow \min; \\ \pi_i \in \{R_j\}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $M$  – масса проектируемого механизма, кг;  $\pi_i$  – параметры деталей и узлов привода;  $\{R_j\}$  – область ограничений оптимизируе-

мых параметров.

Оптимизация параметров приводов механизмов на семантической сети заключается в том, чтобы, используя функциональные зависимости, определить значения параметров, при которых обеспечиваются его минимальные массогабаритные показатели.

В системе Comrast для определения рациональных параметров проектируемой системы на функциональной семантической сети используется комбинированный алгоритм, сочетающий преимущества методов случайного поиска и покоординатного спуска [6].

Чтобы повысить уровень взаимозаменяемости и уменьшить номенклатуру изделий и типоразмеров заготовок, размерного режущего инструмента, оснастки, а также, чтобы создать условия для эффективной специализации предприятий, удешевления продукции при унификации и разработке стандартов применяют принцип предпочтительности, являющийся теоретической базой стандартизации. Согласно этому принципу устанавливают несколько рядов значений стандартизуемых параметров с тем, чтобы при их выборе первый ряд предпочитать второму, второй – третьему.

Таким образом, при выборе параметров необходимо придерживаться определенных, строго обоснованных рядов чисел, которые подчиняются определенной математической закономерности.

В связи с этим в разработанной интеллектуальной системе предусмотрена функция, осуществляющая округление полученных значений до номинальных размеров, представленных в стандартах (ГОСТ 8032-84, ГОСТ 6636-69 и др.).

Кроме того, предложено использовать списочные структуры для описания в системе параметров, имеющих дискретный характер (например, материалов деталей изделий, размеров подшипников).

Так, системой учитывается, что диаметры участков валов под подшипники качения должны приниматься равными диаметру внутреннего кольца подшипника и должны быть кратны пяти.

Системой также учитываются как физические, так и механические свойства широ-

кого круга материалов (углеродистые, легированные стали, цветные металлы, пластик и др.). Многообразие материалов, используемых при изготовлении элементов конструкций, объясняется тем, что различные материалы имеют неодинаковые свойства, которые используются инженерами для решения тех или иных конструкторских или технологических задач.

Наиболее важным физическим свойством, значение которого учитывают при практическом использовании материалов, является плотность, так как уменьшение расхода материалов и снижения массы металлоконструкций и машин является тенденцией современного машиностроения. Чем меньше плотность материалов, тем ниже динамические нагрузки на детали и меньше расход энергии на эксплуатацию машины.

Механические свойства материалов, учитываемые системой при расчетах деталей машин на прочность, жесткость и устойчивость, включают пределы текучести  $\sigma_T$ , прочности  $\sigma_e$ , выносливости материала при деформации изгиба  $\sigma_n$ , кручения  $\tau_n$  и др.

На этой основе разработанная система позволяет не только учитывать свойства конкретного материала при прочностных расчетах деталей машин, но и может обеспечивать выбор материала, пригодного для изготовления конкретной детали, исходя из принятого критерия оптимальности.

Рассмотрим расчет и проектирование радиально-плунжерного редуктора с помощью системы Comrast. Расчетная схема механизма представлена на рис. 6.

При проектировании редуктора исходными данными являются:

- частота вращения ведущего вала (приводного электродвигателя)  $n_1 = 1450$  об/мин;
- передаточное отношение редуктора  $U = 50$ ;
- КПД редуктора  $\eta = 0,8$ ;
- вращающий момент на ведомом валу редуктора  $M_2 = 200$  Н·м;
- диаметр вала электродвигателя  $d_{el} = 19$  мм;
- предел прочности на растяжение  $[\sigma_H] = 2200$  МПа;
- предел прочности на кручение стальных валов  $[\tau_k] = 180$  МПа.



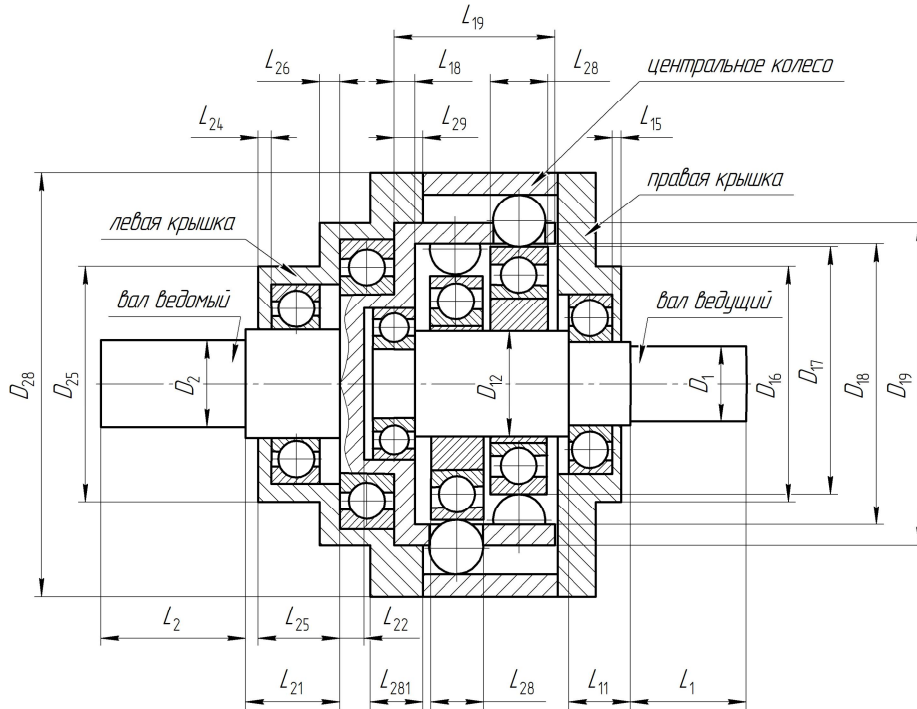


Рис. 6. Расчетная схема редуктора

После выбора характеристик редуктора автоматически определяются математические отношения, которые будут использоваться при расчете его параметров (рис. 7).

Далее с помощью процедуры «Создать сеть» (рис. 7) анализируются полученные математические зависимости и определяются параметры, входящие в состав этих отношений. В результате формируется функциональная семантическая сеть, отношения и

параметры которой представлены в таблицах главного диалогового окна системы (рис. 8).

После ввода исходных данных и ограничений параметров сети (рис. 9) заполняются все поля таблиц главного диалогового окна (рис. 10).

В таблице «Параметры семантической сети» содержатся параметры проектируемой системы, их величины, а также интервал значений для поиска решений (рис. 10).

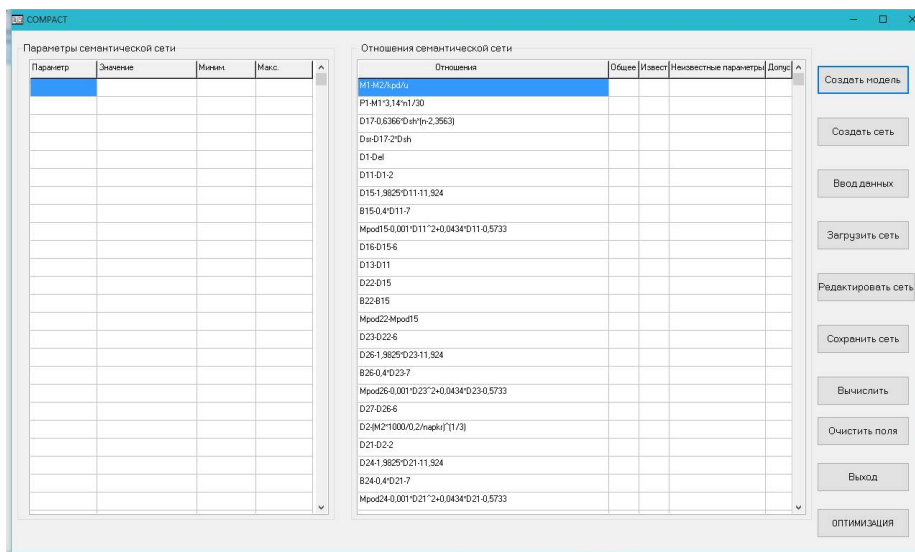


Рис. 7. Главное диалоговое окно с отношениями

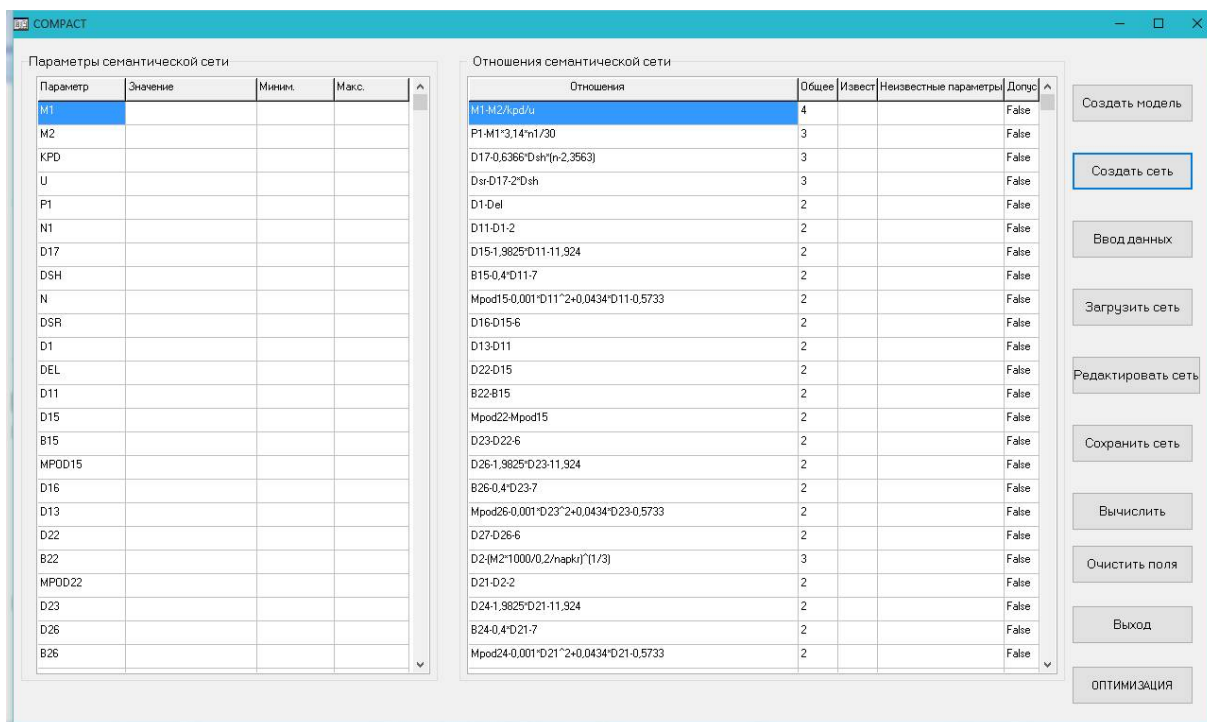


Рис. 8. Главное диалоговое окно с функциональной семантической сетью

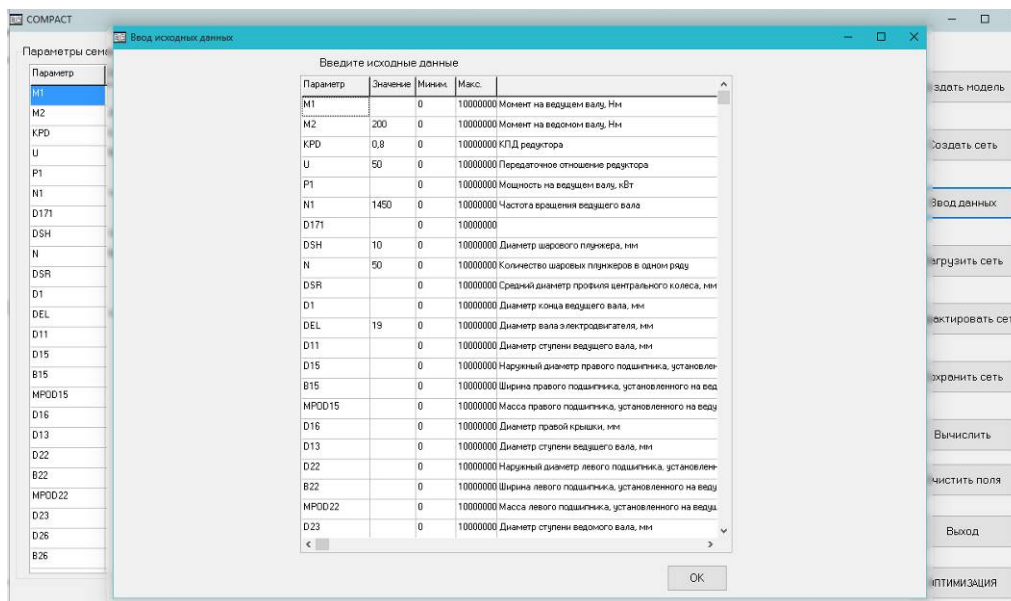


Рис. 9. Диалоговое окно ввода исходных данных

В таблице «Отношения семантической сети» представлены отношения, которые используются при расчете радиально-плунжерного редуктора. Для каждого из отношений указано общее количество параметров (столбец «Общее»), число известных параметров (столбец «Извест.»), а также приведен список неизвестных параметров (столбец

«Неизвестные параметры»), значения которых должны быть определены (рис. 10).

С помощью процедуры «Вычислить» определяем массу редуктора MRED (рис. 11).

Так, при приведенных исходных данных была определена масса редуктора, равная 60,05 кг (рис. 12).

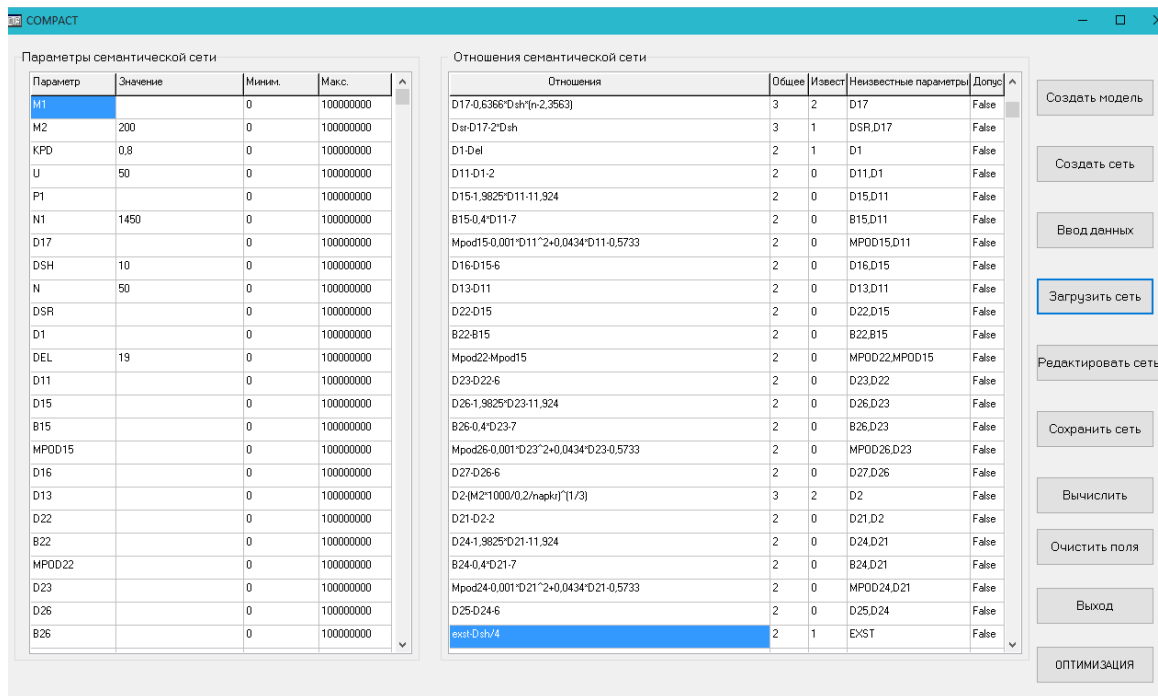


Рис. 10. Главное диалоговое окно после загрузки базы данных

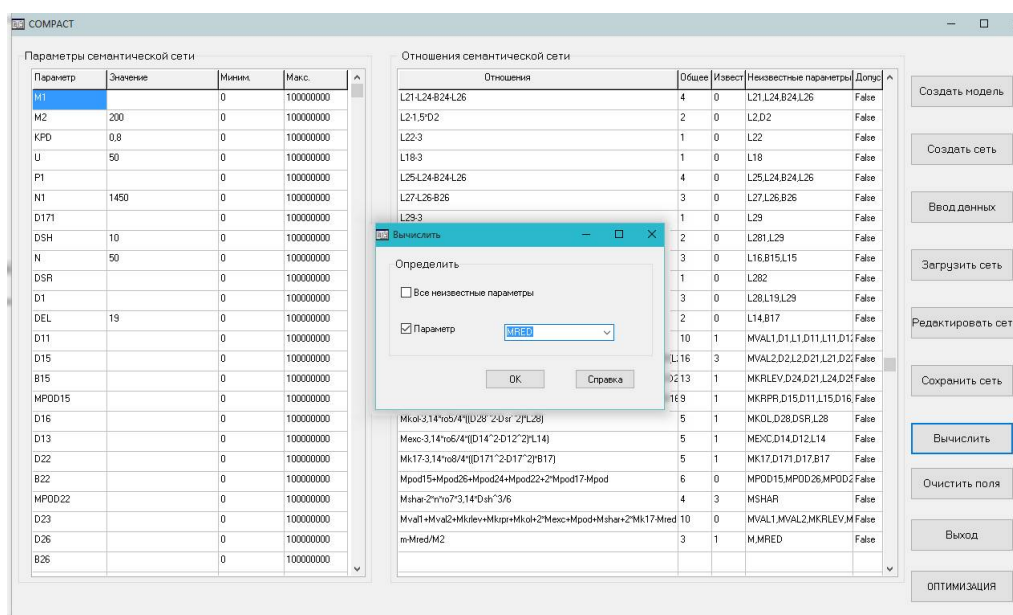


Рис. 11. Диалоговое окно выбора рассчитываемого параметра

С целью минимизации массы редуктора с помощью процедуры «Оптимизация» система осуществила выбор оптимальных параметров редуктора. Для этого указывались в диалоговом окне, представленном на рис. 13, оптимизируемые параметры  $D_{12}$ ,  $D_{16}$ ,  $D_{17}$ ,  $D_{25}$ ,  $D_{28}$ ,  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_{15}$ ,  $L_{18}$ ,  $L_{19}$ ,  $L_{22}$ ,  $L_{24}$ ,  $L_{26}$ .

В результате системой были найдены оптимальные значения параметров редуктора, при которых обеспечивается наименьшая

масса редуктора, равная 48,995 мм (рис. 14).

Таким образом, после определения системой оптимальных параметров деталей редуктора его масса была снижена на 22 %.

При этом масса ведущего вала (рис. 6) уменьшилась с 0,568 до 0,479 кг (на 15,7 %) за счет оптимизации размеров  $L_1$ ,  $D_{12}$ , а также оптимизации толщины стенки правой крышки  $L_{15}$ , приведшей к уменьшению размера  $L_{11}$ .



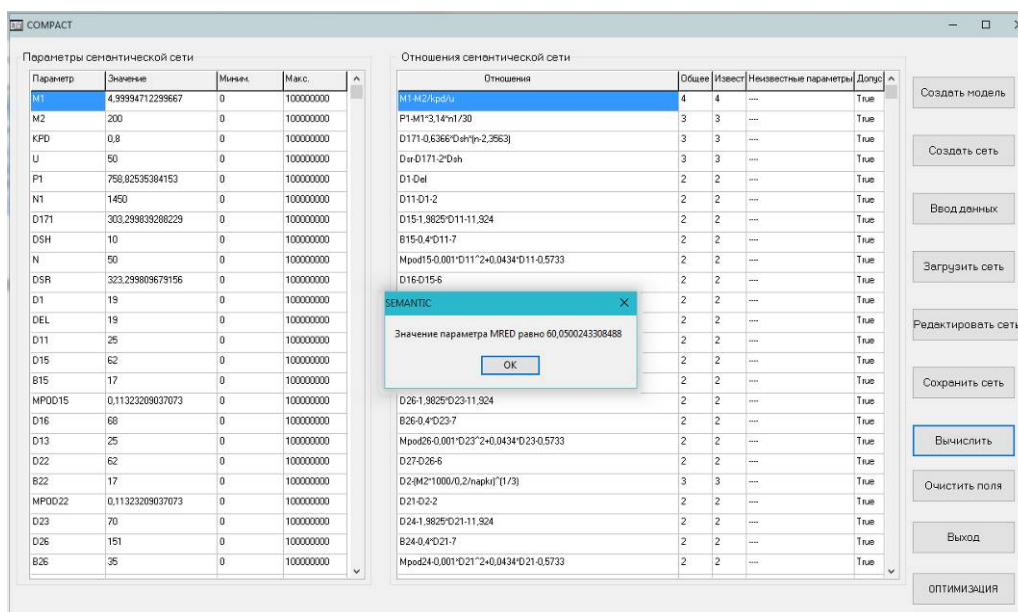


Рис. 12. Результат решения системой

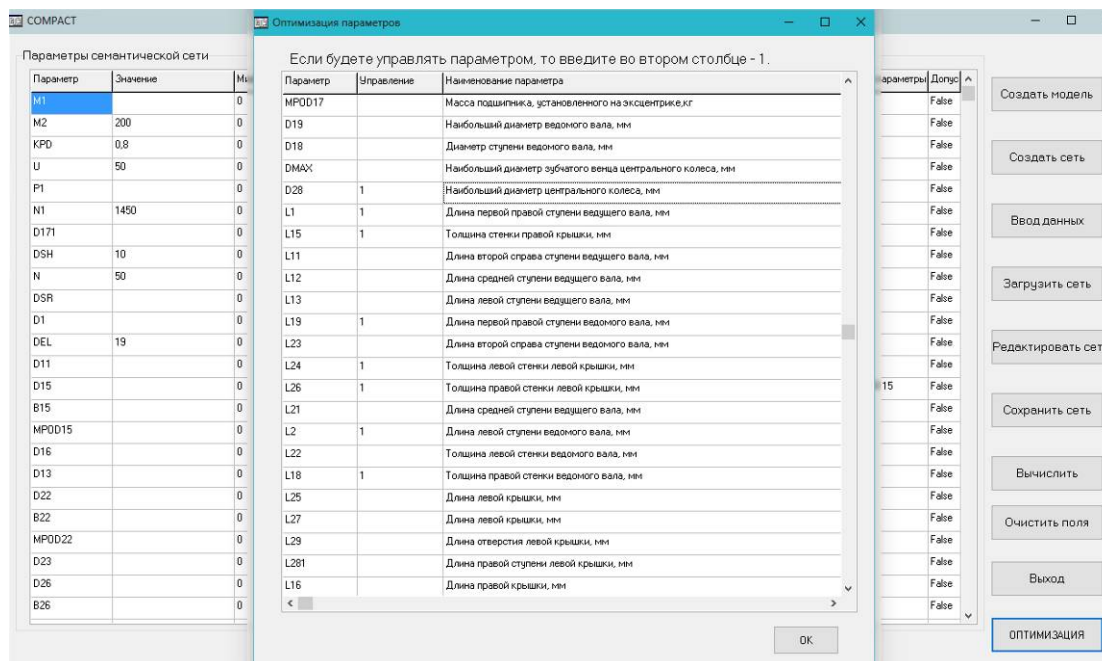


Рис. 13. Выбор управляемых параметров

Масса ведомого вала (рис. 6) снизилась в 1,5 раза (с 6,02 до 3,916 кг) за счет оптимизации толщин его стенок  $L_{18}$ ,  $L_{22}$ , размеров  $L_{19}$ ,  $L_2$ ,  $D_2$ , а также оптимизации толщин стенок левой крышки  $L_{24}$ ,  $L_{26}$ , приведшей к уменьшению размера  $L_{21}$ , и оптимизации диаметра  $D_{17}$ , что уменьшило наружный диаметр вала  $D_{19}$ .

Масса левой крышки (рис. 6) изменилась с

8,33 до 5,54 кг (уменьшилась на 33,4 %) за счет оптимизации ее наружных диаметров  $D_{25}$ ,  $D_{28}$ , толщин ее стенок  $L_{24}$ ,  $L_{26}$ , а также оптимизации толщины стенки ведомого вала  $L_{18}$ , что привело к изменению размеров  $L_{29}$ ,  $L_{281}$ .

Масса правой крышки (рис. 6) уменьшилась с 7,63 до 7,05 кг (на 7,6 %) за счет оптимизации наружного диаметра  $D_{16}$  и толщины ее стенки  $L_{15}$ .

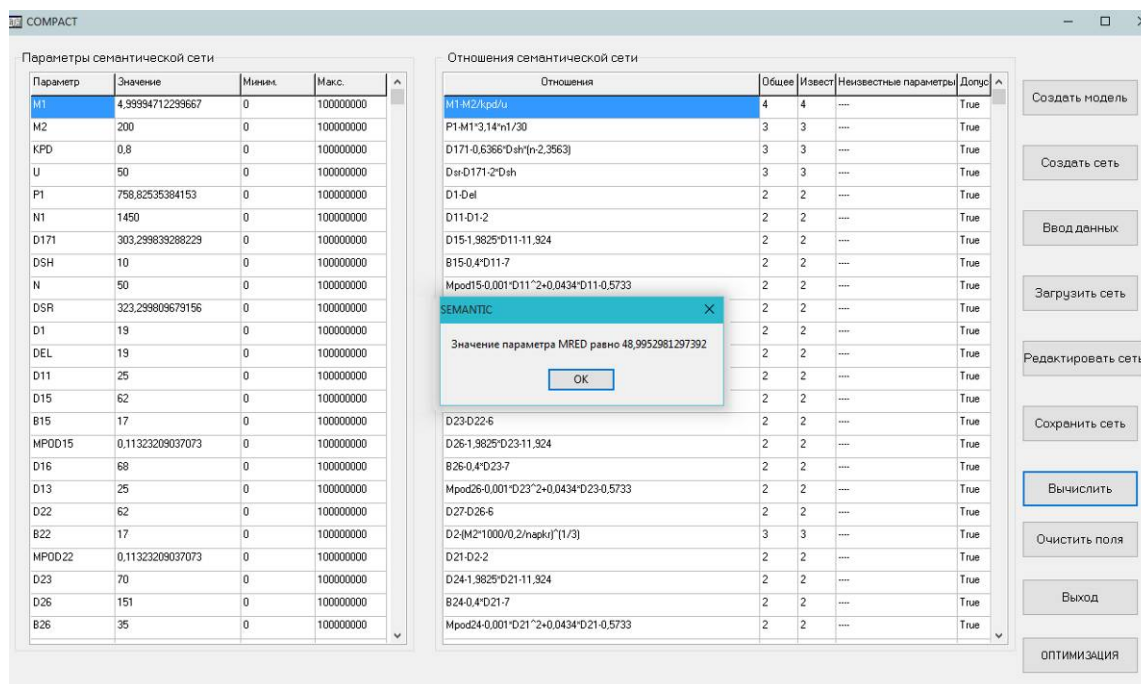


Рис. 14. Результат расчета системой

Масса центрального колеса (рис. 6) снизилась с 5,61 до 4,04 кг в результате уменьшения его наружного диаметра  $D_{28}$ , оптимизации толщины стенки  $L_{18}$  и размера ведомого вала  $L_{19}$ , что привело к уменьшению ширины колеса  $L_{28}$ .

Таким образом, использование системы Comrast позволяет обеспечить комплексную автоматизацию проектирования приводных устройств машин. Так как за счет учета функциональных взаимосвязей между параметрами деталей и узлов конструкции при

оптимизации параметров одной детали система автоматически корректирует размеры других деталей, входящих в узел. При этом достигается одновременное снижение массогабаритных показателей нескольких деталей проектируемого узла.

Установлено, что учет функциональных взаимосвязей между параметрами конструкции по сравнению с традиционными методиками расчета обеспечивает резервы снижения материалоемкости и массогабаритных показателей приводных устройств до 8...22 %.

### Список литературы

1. Пашкевич, В.М. Расчет параметров радиально-плунжерного редуктора на основе использования функциональных семантических сетей / В.М. Пашкевич, М.Н. Миронова // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2016. – № 4. – С. 52–62. DOI: 10.22281/2413-9920-2016-02-04-52-63
2. Компьютерная программа COMPACT: свидетельство о регистрации компьютерной программы № 949 / В.М. Пашкевич, М.Н. Миронова; заявитель и правообладатель Белорус.-Рос. ун-т. – № 949; заявл. 22.03.2017; зарегистр. 19.04.2017. – 1 с.
3. Пашкевич, В.М. Методология ком-

### References

1. Pashkevich V.M., Mironova M.N. Raschet parametrov radialno-plunzhernogo reduktora na osnove ispolzovania funktsionalnykh semanticheskikh setey [Calculation of parameters of radial-piston reducer based on the use of functional semantic networks]. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, No. 4, pp. 52–62. DOI: 10.22281/2413-9920-2016-02-04-52-63 (In Russian)
2. Pashkevich V.M., Mironova M.N. *Kompyuternaya programma COMPACT* [Computer program COMPACT]: certificate of registration of computer program, 2017, No. 949, 1 p. (In Russian)
3. Pashkevich V.M., Mironova M.N. Me-



УДК 621.867

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОТКАЗА ВЕДУЩИХ ПОДВЕСОК  
КОНВЕЙЕРА С ПОДВЕСНОЙ ЛЕНТОЙ И РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ПРИВОДОМ  
ПРИ ЗАКЛИНИВАНИИ ХОЛОСТЫХ РОЛИКОВ

MATHEMATICAL MODEL OF FAILURE THE DRIVES SUSPENSIONS OF THE  
CONVEYOR WITH SUSPENDED BELT AND DISTRIBUTED DRIVE AT JAMMING  
NON-DRIVE ROLLERS

Толкачев Е.Н.  
Tolkachev E.N.

Брянский государственный технический университет (Брянск, Россия)  
Bryansk State Technical University (Bryansk, Russian Federation)

**Аннотация.** Статья посвящена актуальному вопросу, связанному с моделированием отказов приводных подвесок конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом. Разработана математическая модель отказа индивидуальных приводов подвесок вследствие заклинивания холостых роликов. Для базового варианта конвейера с подвесной лентой выполнено моделирование динамических характеристик.

**Ключевые слова:** конвейер ленточный, лента подвесная, модель математическая, отказ, подвеска, привод распределенный, заклинивание ролика.

**Дата принятия к публикации:** 11.09.2018  
**Дата публикации:** 25.09.2018

**Сведения об авторе:**

Толкачев Евгений Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», [tolkachev\\_en@mail.ru](mailto:tolkachev_en@mail.ru).  
ORCID: 0000-0002-2567-6336

† **Abstract.** The article is devoted to the topical issue, which is related to simulation of the failures of drives suspensions of the conveyor with suspended belt and distributed drive. A mathematical model of the failure of individual drives of suspensions due to the jamming of the non-drive rollers has been developed. Dynamic characteristics of the basic version of a conveyor-feeder with suspended belt were simulated.

† **Keywords:** conveyor belt, distributed drive, failure, jamming roller, mathematical model, suspended belt, suspension.

† **Date of acceptance for publication:** 11.09.2018  
† **Date of publication:** 25.09.2018

† **Author' information:**

† Evgeniy N. Tolkachev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department “Lifting and transport machines and equipment” at Bryansk State Technical University, [tolkachev\\_en@mail.ru](mailto:tolkachev_en@mail.ru).  
† ORCID: 0000-0002-2567-6336

Конвейеры с подвесной лентой и распределенным приводом (рис. 1) предназначены для бесперегрузочного транспортирования насыпных грузов по трассам произвольной конфигурации и неограниченной протяженности. Подробное описание конструкций и принципа действия таких транспортирующих установок приводится в широком ряде научных работ [1-5].

Отличительная конструктивная особенность конвейеров с подвесной лентой и распределенным приводом заключается в наличии большого количества приводных и не-приводных подвесок, закрепленных по бортам ленты с постоянным шагом вдоль трассы

конвейера. В тяжелых условиях эксплуатации, связанных с транспортированием насыпных грузов (в особенности пылевидных, агрессивных) под влиянием факторов окружающей среды, в совокупности с несвоевременным техническим обслуживанием и ремонтом, происходят отказы подвесок конвейера, проявляющиеся в заклинивании холостых роликов. Потенциально возможные специфические виды отказов, обусловленные конструктивными особенностями конвейеров с подвесной лентой и распределенным приводом, приведены в ряде публикаций [6-8]. Особенностью протекания рассматриваемых видов отказов является то, что



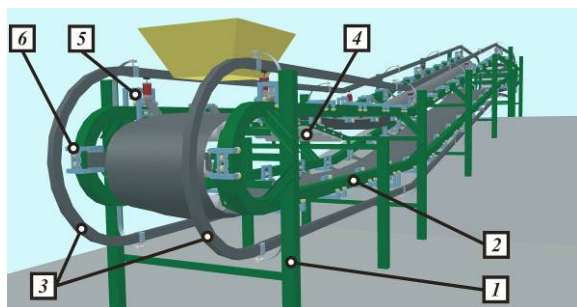


Рис. 1. Конвейер с подвесной лентой и распределенным приводом:

- 1 – став; 2 – направляющие качения;
- 3 – токоведущий тролейный шинопровод;
- 4 – стационарные роlikоопоры;
- 5 – приводные подвески; 6 – не приводные подвески;
- 7 – лента

единичные отказы практически не оказывают существенного влияния на основные характеристики конвейера. Основанием для остановки конвейера с целью проведения ремонтно-восстановительных мероприятий являются множественные отказы. Поэтому определенный научный интерес представляет количественный анализ степени влияния характера распределения и количества по длине трассы отказавших подвесок. Данная работа посвящена разработке математической модели и расчету динамических характеристик конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом при отказах ведущих подвесок вследствие заклинивания холостых роликов.

Моделирование динамических процессов, протекающих при отказе ведущих подвесок конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом вследствие заклинивания холостых роликов, предлагается осуществлять, используя следующую математическую модель.

Работоспособное состояние приводной подвески, подобно изложенному в работе [7], характеризуется величиной, представленной в общем виде в виде вектор-столбца, количество элементов которого соответствует количеству ведущих подвесок на одном контуре направляющих качения трассы конвейера:

$$N_{отк} = (n_{a,b}),$$

где  $n$  – показатель работоспособного состояния  $i$ -й ведущей подвески ( $n=0$  – холостой ролик свободно вращается,  $n=1$  – холостой ролик заклинил);  $a$  – количество строк матрицы, равное количеству приводных подвесок ( $n_n$ );  $b$  – количество столбцов матрицы, равное единице.

Проявление отказов во времени моделируется следующей зависимостью:

$$N_{отк}(t) = \begin{cases} k_{pc}, & \text{если } t \leq t_{отк}; \\ \text{иначе } N_{отк}, & \end{cases}$$

где  $t_{отк}$  – время наступления отказа;  $k_{pc} = (1_{a,b})$  – величина, характеризующая работоспособное состояние всех приводных подвесок.

Особенность моделирования отказов, связанных с заклиниванием холостых роликов ведущих подвесок, заключается в том, что в момент наступления отказа сопротивление движению от сил трения качения изменяется на сопротивление движению от сил трения скольжения. Таким образом, коэффициент сопротивления движению может быть записан в виде:

$$k_{сопр}(t) = N_{отк}(t) \cdot (f_{нр} + \mu_{нрo} r_o) + (1 - N_{отк}(t)) \cdot \mu_{нр} r_n,$$

где  $f_{нр}$  – коэффициент трения качения холостого ролика ведущей подвески;  $\mu_{нрo}$  – коэффициент трения скольжения в оси холостого ролика ведущей подвески;  $\mu_{нр}$  – коэффициент трения скольжения холостого ролика ведущей подвески;  $r_n$  – наружный радиус холостого ролика ведущей подвески;  $r_o$  – наружный радиус холостого ролика ведущей подвески.

Ввиду принятого при разработке математических моделей динамики конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом ряда допущений о том, что конвейер моделируется системой дискретных масс, соединенных друг с другом упруго-вязкими связями, а также каждая дискретная масса характеризует подвеску с сопряженным с ней участком ленты и грузом и представлена роликом с приведенными к его центру силами и массами, изменение характера движе-

ния холостых роликов ведущей подвески с чистого качения на скольжение (юз) находит математическое отражение в формулах приведения сил элементов механической системы – холостых роликов ведущей подвески – звену приведения – приводному ролику.

Момент сопротивления движению холостых роликов ведущей подвески, приведенный к приводному ролику определяется по следующим зависимостям:

- на концевых поворотных и загрузочном участках, оборудованных стационарными роликосопами:

$$M_{ni}^{np}(t) = (1 - k_{пол} \cdot \cos \alpha_i) \cdot \left\{ (T_i \sin \beta_i + G_{нс}) \cos \alpha_i - F_{np} \right\} + T_i \cos \beta_i \cdot k_{сноп}^{хол}(t) \frac{r_{np}}{r_n} + k_{пол} \cos \alpha \cdot T_i \sin \beta_i (f_{po} + \mu_{po} r_{po}) \frac{r_{np}}{R_{po}} \cos \alpha_i;$$

- на грузовой и холостой ветви:

$$M_{ni}^{np}(t) = \left[ (T_i \sin \beta_i + G_{нс}) \cos \alpha_i - F_{np} \right] \cdot k_{сноп}^{хол}(t) \cdot \frac{r_{np}}{r_n},$$

где  $T_i = T_i(x_i)$  – усилие, передаваемое через узел крепления к ленте подвеске со стороны ленты и транспортируемого груза;  $G_{нс}$  – сила тяжести несущей секции ведомой подвески;  $F_{np}$  – усилие со стороны прижимного устройства;  $k_{пол}$  – коэффициент, учитывающий долю нагрузки от ленты с грузом, приходящуюся на стационарную роликовую опору;  $f_{po}$  – коэффициент трения качения стационарной роликовой опоры;  $\mu_{np_o}$  – коэффициент трения скольжения в цапфе стационарной роликосопы;  $r_{np}$  – наружный радиус приводного ролика ведущей подвески;  $R_{po}$  – наружный радиус обечайки стационарной роликовой опоры;  $r_{po}$  – наружный радиус цапфы стационарной роликосопы;  $r_o$  – наружный радиус холостого ролика ведущей подвески;  $\alpha_i = \alpha_i(x_i)$  – угол поворота веду-

щей подвески в вертикальной плоскости;  $\beta_i = \beta_i(x_i)$  – угол наклона к горизонту бортов ленты [9, 10].

Кроме того, для исключения самопроизвольного перемещения механической системы под действием сил сопротивлений в обратном направлении, в математической модели используется функция знака  $\text{sgn}(x)$  [11-13]. Уравнения движения приводного и холостого роликов при моделировании отказа записываются в виде [7, 8].

Движение всех подвесок одного контура направляющей качения конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом согласно математической модели с учетом выше изложенных особенностей описывается системой дифференциальных уравнений первого порядка, количество которых определяется числом и типом подвесок [6-9, 14], а общий вид выглядит как

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_1}{d\tau} &= \dot{x}_1; \\ \frac{d\dot{x}_1}{d\tau} &= \frac{1}{m_{n1}^{np}(x_1)} \left[ F_{cu1} + (G_{n1} + T_1 \sin \beta_1) \cdot \sin \alpha_1 + c \cdot (x_n - 2x_1 + x_2 - L_{mp}) + k_1(\dot{x}_n - 2\dot{x}_1 + \dot{x}_2) \right]; \\ \frac{d\varphi_1}{d\tau} &= \dot{\varphi}_1; \\ \frac{d\dot{\varphi}_1}{d\tau} &= \frac{1}{J_{n1}^{np}} \left[ M_{kp1} - F_{cu1} r_{np} - M_{n1}^{np}(t) \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_1) - f_{np} (G_{nc1} \cos \alpha_1 + F_{np}) \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_1) \right]; \\ \frac{dx_2}{d\tau} &= \dot{x}_2; \\ \frac{d\dot{x}_2}{d\tau} &= \frac{r_h}{J_{h2}^{np} + m_{h2}^{np} r_h^2} \left\{ -M_{h2}^{np} \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_2) + r_h \left[ (G_{h2} + T_2 \sin \beta_2) \sin \gamma_2 + c(x_1 - 2x_2 + x_3) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + k_2(\dot{x}_1 - 2\dot{x}_2 + \dot{x}_3) \right] - (f_{hp} + \mu_{hp_o} r_o) (G_{h2} + T_2 \sin \beta_2) \cos \gamma_2 \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_2) \right\}; \\ \frac{dx_3}{d\tau} &= \dot{x}_3; \\ \frac{d\dot{x}_3}{d\tau} &= \frac{r_h}{J_{h3}^{np} + m_{h3}^{np} r_h^2} \left\{ -M_{h3}^{np} \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_3) + r_h \left[ (G_{h3} + T_3 \sin \beta_3) \sin \gamma_3 + c(x_2 - 2x_3 + x_4) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + k_2(\dot{x}_2 - 2\dot{x}_3 + \dot{x}_4) \right] - (f_{hp} + \mu_{hp_o} r_o) (G_{h3} + T_3 \sin \beta_3) \cos \gamma_3 \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_3) \right\}; \\ \dots \\ \frac{dx_i}{d\tau} &= \dot{x}_i; \\ \frac{d\dot{x}_i}{d\tau} &= \frac{1}{m_{hi}^{np}} \left[ F_{cu_i} + (G_{ni} + T_i \sin \beta_i) \sin \alpha_i + c(x_{i-1} - 2x_i + x_{i+1}) + k_i(\dot{x}_{i-1} - 2\dot{x}_i + \dot{x}_{i+1}) \right]; \\ \frac{d\varphi_i}{d\tau} &= \dot{\varphi}_i; \\ \frac{d\dot{\varphi}_i}{d\tau} &= \frac{1}{J_{ni}^{np}} \left[ M_{kp_i} - F_{cu_i} r_{np} - M_{ni}^{np}(t) \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_i) - f_{np} (G_{nc_i} \cos \alpha_i + F_{np}) \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_i) \right]; \\ \dots \\ \frac{dx_n}{d\tau} &= \dot{x}_n; \\ \frac{d\dot{x}_n}{d\tau} &= \frac{r_h}{J_{hn}^{np} + m_{hn}^{np} r_h^2} \left\{ -M_{hn}^{np} \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_n) + r_h \left[ (G_{hn} + T_n \sin \beta_n) \sin \gamma_n + c(x_{n-1} - 2x_n + x_{n+1} + L_{mp}) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + k_n(\dot{x}_{n-1} - 2\dot{x}_n + \dot{x}_{n+1}) \right] - (f_{hp} + \mu_{hp_o} r_o) (G_{hn} + T_n \sin \beta_n) \cos \gamma_n \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}_n) \right\}. \end{aligned} \right.$$

где

$$F_{cy}(x_1, x_2, x_n, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_n, \dot{\varphi}_1, t_1) = \begin{cases} \mu_{np}(G_{nc1} \cos \alpha_1 + F_{np}), & \text{если } \dot{\varphi}_1 r_{np} - \dot{x}_1 > 0; \\ -\mu_{np}(G_{nc1} \cos \alpha_1 + F_{np}), & \text{если } \dot{\varphi}_1 r_{np} - \dot{x}_1 < 0; \\ \frac{1}{J_{ni}^{np} + m_{ni}^{np} r_{np}^2} \left\{ m_{ni}^{np} r_{np} (M_{kp1} - M_{n1}^{np}(t) \cdot \text{sgn}(\dot{x}_1) - N_{np1} f_{np} \cdot \text{sgn}(\dot{x}_1)) - \right. \\ \left. - J_{n1}^{np} [(G_{n1} + T_1 \sin \beta_1) \sin \alpha_1 + c(x_n - 2x_1 + x_2 - L_{mp}) + k_1(\dot{x}_n - 2\dot{x}_1 + \dot{x}_2)] \right\}. \end{cases}$$

при начальных условиях

$$\begin{aligned} x_i(\tau = 0) &= -h_n(i-1); \\ \dot{x}_i(\tau = 0) &= 0; \\ \varphi_i(\tau = 0) &= 0; \\ \dot{\varphi}_i(\tau = 0) &= 0. \end{aligned}$$

Приведенная система дифференциальных уравнений решается численным методом Рунге-Кутты 4-го порядка.

В качестве объекта для выполнения вычисления динамических характеристик и демонстрации результатов, полученных при использовании предложенной математической модели отказа ведущих подвесок при заклинивании холостых роликов, использован конвейер-питатель с подвесной лентой и распределенным приводом, схема трассы и основные технические характеристики которого приведены в работах [7, 8, 14].

Моделирование выполнялось в интервале времени от 0 до 65 с с шагом 0,01 с. В качестве отказавшей подвески принята ведущая подвеска №1. Время наступления отказа равно 30 с.

Полученные результаты расчета динамических характеристик приводных подвесок в стационарном режиме работы и при отказе ведущей подвески № 1 представлены на рис. 5-7.

Период времени от 0 до 30 с характеризуется работой конвейера в штатном режиме. Перемещение ведущей подвески № 1 и вращение ее приводного ролика осуществляются по линейным зависимостям (рис. 5). Вместе с тем, изменение линейной и угловой скоростей происходит с незначительной амплитудой колебаний – порядка 9...13 % и 6...13% от средних значений соответственно в зависимости от участка трассы (рис. 6).

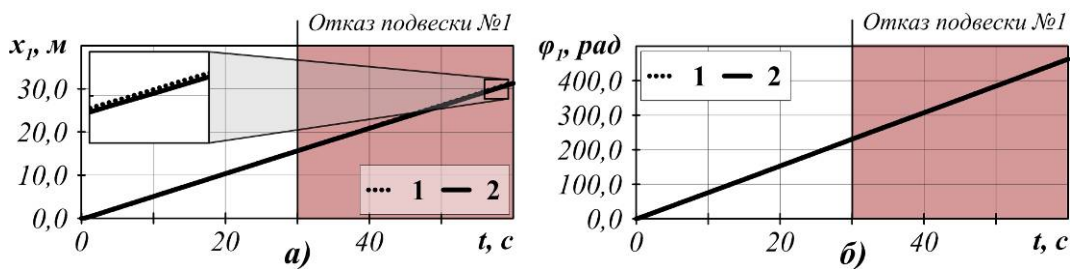


Рис. 5. Изменение динамических характеристик приводного ролика от времени при наступлении отказа ведущей подвески № 1: а – линейного перемещения; б – углового перемещения (1 – штатный режим работы; 2 – работа при наступлении отказа)

После наступления отказа ведущей подвески № 1 вследствие заклинивания холостых роликов параметры, характеризующие ее положение (рис. 5) и скорость (рис. 6), изменяются практически незначительно. Наибольшее изменение значений отмечается лишь у угловой скорости отказавшей ведущей подвески № 1 (рис. 6, а): в период дви-

жения по грузовой ветви (соответствует перемещению 15...22,5 м) средние значения угловой скорости сокращаются на 4 %.

Анализируя графики изменения коэффициента буксования (рис. 7) также можно отметить наиболее существенные изменения значений только у ведущей подвески № 1 в период движения по грузовой ветви (соот-



ветствует перемещению 15...22,5 м). Величина падения коэффициента составляет по-

рядка 16 % от среднего значения коэффициента при штатном режиме работы.

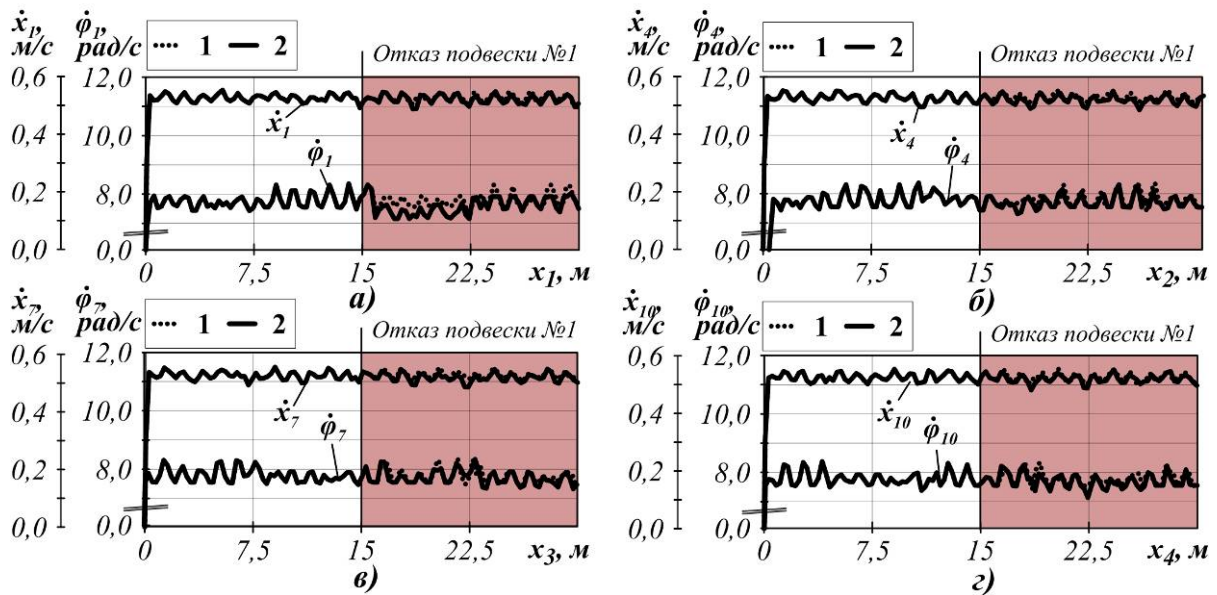


Рис. 6. Изменение динамических характеристик приводных роликов ведущих подвесок от перемещения при наступлении отказа ведущей подвески № 1: а – подвеска № 1; б – подвеска № 4; в – подвеска № 7; г – подвеска № 10 (1 – штатный режим работы; 2 – работа при наступлении отказа)

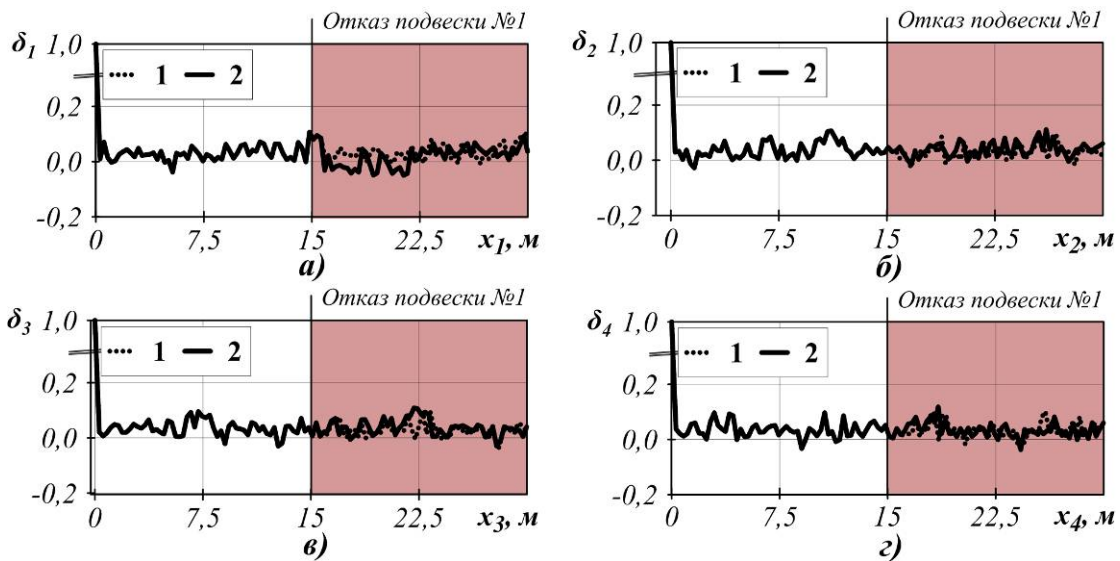


Рис. 7. Изменение коэффициентов буксования приводных роликов ведущих подвесок от перемещения при наступлении отказа ведущей подвески № 1: а – подвеска № 1; б – подвеска № 4; в – подвеска № 7; г – подвеска № 10 (1 – штатный режим работы; 2 – работа при наступлении отказа)

Таким образом, из комплексного анализа параметров, характеризующих положение и скорости подвесок приводных подвесок конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом, полученных при моделировании следует, что при отказе ведущей под-

вески вследствие заклинивания холостых роликов, происходит падение угловой скорости вращения ее приводного ролика. Однако вследствие того, что все подвески конвейера последовательно связаны между собой бесконечно замкнутой конвейерной лентой, то

отказ связанный с заклиниванием холостых роликов и повышением сопротивления движению одной ведущей подвески в данном случае не оказывает критического влияния на скорость транспортирования. Линейные скорости всех ведущих, в том числе и отказавшей, подвесок остаются практически неизменными. Следовательно, вышедшая из строя ведущая подвеска продолжает движение со скольжением (юзом) приводного ролика, что наиболее ярко выражено при движении по грузовой ветви, когда нагрузки со стороны ленты и транспортируемого груза принимают максимальные значения.

Полученные на основе разработанной математической модели результаты позволяют проанализировать физическую картину процесса транспортирования груза приводными

подвесками при возникновении отказа ведущей подвески вследствие заклинивания холостых роликов. Проведение комплексного качественного анализа и выполнение количественной оценки влияния различных конструктивных параметров элементов конвейера на основные технические характеристики будет выполнено на основе моделирования динамики протяженного конвейера со значительным количеством приводных и неприводных подвесок в последующих работах.

**Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ для научных проектов, выполняемых молодыми учеными (Мой первый грант) № 16-38-00058.**

#### Список литературы

1. Лагереv, А.В. Исследование движения подвесок дискретного участка конвейера с подвесной лентой, распределенным приводом и вертикально замкнутой трассой с помощью одномассовой динамической модели / А.В. Лагереv, Е.Н. Толкачев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. – № 4. – С. 33-40.

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302214>

2. Лагереv, А.В. Конвейеры с подвесной грузонесущей лентой – инновационный вид машин непрерывного транспорта / А.В. Лагереv, В.П. Дунаев // Справочник. Инженерный журнал, 2009. – № 10. – С. 9-14.

3. Lagerev, A.V. Analyzing the Discreet Section Suspension Parameters in a Conveyor with Suspended Belt and Distributed Drive / A.V. Lagerev, E.N. Tolkachev, I.A. Lagerev // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2017. – Vol. 31. - № 10. – P. 4669-4678. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0913-7>

4. Lagerev, A.V. The Influence of Distributing the Conveyor Suspensions with Suspended Belt and Distributed Drive on Its Main Technical Characteristics / A.V. Lagerev, E.N. Tolkachev, I.A. Lagerev // International Review on Modelling and Simulations. – 2018. – Vol. 11. - № 3. – P. 176-186.

#### References

1. Lagerev A.V., Tolkachev E.N. The study of the motion of suspensions of discrete section of a conveyor with suspended belt, distributed drive, and the vertically-closed track with the singlemass di-namic model. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, No.4, pp. 33–40.

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302214>  
(In Russian)

2. Lagerev A.V., Dunaev V.P. Conveyors with suspension carrying belt – new type of continuous transport mashines. *Inzhenerniy zhurnal. Spravochnik*, 2009, No.10, pp. 9-14. (In Russian)

3. Lagerev A.V., Tolkachev E.N., Lagerev I.A. Analyzing the Discreet Section Suspension Parameters in a Conveyor with Suspended Belt and Distributed Drive. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2017. Vol. 31, No. 10. pp. 4669-4678.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0913-7>

4. Lagerev A.V., Tolkachev E.N., Lagerev I.A. The Influence of Distributing the Conveyor Suspensions with Suspended Belt and Distributed Drive on Its Main Technical Characteristics. *International Review on Modelling and Simulations*. 2018. Vol. 11, No. 3. pp. 176-186.

DOI: <https://doi.org/10.15866/iremos.v11i3.12796>

5. Boslovyak P.V., Tolkachev E.N. Mathematical model of metal construction optimization of drive conveyor with the suspended belt

DOI: <https://doi.org/10.15866/iremos.v1i3.12796>

5. Бословяк, П.В. Математическая модель оптимизации приводной подвески конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом / П.В. Бословяк, Е.Н. Толкачев // Вестник СибАДИ. – 2018. – № 1. – С. 8-18.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-1-8-18>

6. Лагереv, А.В. Моделирование рабочих процессов и проектирование многоприводных ленточных конвейеров / А.В. Лагереv, Е.Н. Толкачев, К.А. Гончаров. – Брянск: РИО БГУ, 2017. – 384 с.

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1196612>

7. Толкачев, Е.Н. Математическая модель отказа приводов ведущих подвесок конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом при разрыве электроцепи / Е.Н. Толкачев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2017. – № 2. – С. 178-189. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2017-03-02-178-189>

8. Толкачев, Е.Н. Математическая модель отказа приводов ведущих подвесок конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом при заклинивании приводных роликов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2017. – № 3. – С. 333-343. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2017-03-03-333-343>

9. Лагереv, А.В. Проектирование и исследования конвейеров с подвесной грузонесущей лентой / А.В. Лагереv, Е.Н. Толкачев, П.В. Бословяк. – Брянск: РИО БГУ, 2016. – 303 с.

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1197308>

10. Толкачев, Е.Н. Особенности определения усилий, приложенных к подвескам конвейера с подвесной лентой и распределенным приводом, в зависимости от их пространственной конфигурации на трассе / Е.Н. Толкачев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2015. – № 2. – С. 44-51. – Режим доступа: <http://ntv-brgu.ru/wp-content/arhiv/2015-N2/2015-02-06.pdf>.

11. Дмитриева, В.В. Разработка математической модели ленточного конвейера

and distributed drive. *Vestnik SibADI*, 2018, No. 1, pp. 8-18. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-1-8-18>. (In Russian)

6. Lagerev A.V., Tolkachev E.N., Goncharov K.A. *Modelirovanie rabochih protsessov i proektirovanie mnogoprivodnyh lentochnyh konveyerov* [Modeling of work processes and the design of multi-drive belt conveyor]. Bryansk: RIO BGU, 2017. 384 p. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1196612> (In Russian)

7. Tolkachev E.N. Mathematical model of failure the drives suspensions of the conveyor with suspended belt and distributed drive at break in the electric chain. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, No. 2, pp. 178-189. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2017-03-02-178-189> (In Russian)

8. Tolkachev E.N. Mathematical model of failure the drives suspensions of the conveyor with suspended belt and distributed drive at jamming rollers. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, No. 3, pp. 333-343. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2017-03-03-333-343> (In Russian)

9. Lagerev A.V., Tolkachev E.N., Boslovjak P.V. *Proektirovanie i issledovaniya konveyerov s podvesnoy gruzonesushchey lentoy* [Design and research of the hanging ribbon]. Bryansk: RIO BGU, 2016. 303 p. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1197308> (In Russian)

10. Tolkachev E.N. Specifics of determining the forces are applied to the suspensions of conveyor with suspended belt and distributed drive, depending on their spatial configuration on the route. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, No. 2, pp. 44-51. Available at: <http://ntv-brgu.ru/wp-content/arhiv/2015-N2/2015-02-06.pdf> (In Russian)

11. Dmitrieva V.V., Gershun S.V. Development of a mathematical model of a belt conveyor with a two-motor drive. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2008, No. 8, pp. 295-303. (In Russian)

12. Dmitrieva V.V. Modeling of starting-brake modes of the belt conveyor. *Gornye nauki i tekhnologii*, 2014, No. 3, pp. 50-56. (In

с двухдвигательным приводом / В.В. Дмитриева, С.В. Гершун // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 8. – С. 295-303.

12. Дмитриева, В.В. Моделирование пуска-тормозных режимов ленточного конвейера / В.В. Дмитриева // Горные науки и технологии. – 2014. – № 3. – С. 50-56.

13. Никитин, С.В. Динамическая модель ленточного конвейера / С.В. Никитин // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2014. – № 4. – С.722-731.

14. Lagerev, A.V. Modelling of a Vertical Loop Conveyor with Suspended Belt and Distributed Drive / A.V. Lagerev, E.N. Tolkachev, I.A. Lagerev // International Review on Modelling and Simulations. – 2016. – Vol. 9. - № 4. – P. 271-279.

DOI: <https://doi.org/10.15866/iremos.v9i4.9808>

Russian)

13. Nikitin S.V. Dynamic model of belt conveyor. *Sovremennoe mashinostroenie. Nauka i obrazovanie*, 2014, No. 4, pp. 722-731. (In Russian)

14. Lagerev A.V., Tolkachev E.N., Lagerev I.A. Modelling of a Vertical Loop Conveyor with Suspended Belt and Distributed Drive. *International Review on Modelling and Simulations*, 2016, Vol. 9, No. 4, pp. 271-279. DOI: <https://doi.org/10.15866/iremos.v9i4.9808>



УДК 331.43

РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К АТТЕСТАЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ  
В ОРГАНИЗАЦИЯХ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХ ОПАСНЫЕ  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ОБЪЕКТЫ

RISK-BASED APPROACH TO THE CERTIFICATION OF SPECIALISTS  
IN ORGANIZATIONS OPERATING HAZARDOUS PRODUCTION FACILITY

Котельников В.В.<sup>1</sup>, Егельская Е.В.<sup>2</sup>, Короткий А.А.<sup>2</sup>  
Kotelnikov V.V.<sup>1</sup>, Yegelskaya E.V.<sup>2</sup>, Korotkiy A.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> - Учебный центр «Безопасность в промышленности» (Москва, Россия)

<sup>1</sup> - Training center "Safety in Industry" (Moscow, Russian Federation)

<sup>2</sup> - Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Россия)

<sup>2</sup> - Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

**Аннотация.** Согласно многолетним статистическим наблюдениям причинами практически одной трети всех чрезвычайных происшествий, аварий, инцидентов и несчастных случаев на опасных производственных объектах являются организационные мероприятия, непосредственно связанные с присутствием человеческого фактора. В статье предлагаются пути повышения эффективности и качества аттестации по промышленной безопасности, посредством информационно-коммуникационных технологий, позволяющих внедрить единые требования к программам подготовки, к проверке знаний руководителей и специалистов для аттестационных комиссий организаций с использованием риск-ориентированного подхода.

**Ключевые слова:** опасные производственные объекты, специалисты, надзор, совершенствование требований, программы подготовки, аттестация, проверка знаний, информационные технологии, риск-ориентированный подход.

**Дата принятия к публикации:** 26.07.2018

**Дата публикации:** 25.09.2018

**Сведения об авторах:**

**Котельников Владимир Владимирович** – кандидат технических наук, директор негосударственного образовательного частного учреждения дополнительного профессионального образования «Учебный центр «Безопасность в промышленности»; [vvkotel@mail.ru](mailto:vvkotel@mail.ru).

**Егельская Елена Владимировна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского госу-

**Abstract.** During many years of statistical observations, the causes of almost one third of all emergencies, accidents, incidents and accidents at hazardous production facilities are organizational measures directly related to the presence of the human factor. The main tasks of the state policy in the field of industrial safety are: improving the requirements, training programs, certification and verification of knowledge of managers and specialists of operating organizations; development and implementation of information technologies that enable interaction with operating organizations, to optimize the acquisition, storage and analysis of information on production control over observance of requirements of industrial safety, systems safety management; introduction of risk-based approach in the organization of Federal state control (supervision) in the field of industrial safety. The ways to improve the efficiency and quality of certification of industrial safety, through information and communication technologies, allowing to introduce uniform requirements for training programs, to test the knowledge of managers and specialists for certification commissions of organizations, using a risk-based approach.

**Keywords:** hazardous production facilities, specialists, supervision, improvement of training, programs requirements, certification, verification of knowledge, information technology, risk-based approach.

**Date of acceptance for publication:** 26.07.2018

**Date of publication:** 25.09.2018

**Authors' information:**

**Vladimir V. Kotelnikov** - Candidate of Technical Sciences, Director of non-state educational private institution of additional professional education «Training Center of Safety in Industry»; [vvkotel@mail.ru](mailto:vvkotel@mail.ru).

**Elena V. Yegelskaya** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department «Operation of Transport Systems and Logistics» at Don State Tech-



дарственного технического университета;  
*egelskaya72@mail.ru.*

**Короткий Анатолий Аркадьевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета; *thought@novoch.ru.*

† nical University; *egelskaya72@mail.ru.*

†  
†  
† **Anatoliy A. Korotkiy** - Doctor of Technical Sciences, Head of Department «Operation of Transport Systems and Logistics» at Don State Technical University; *thought@novoch.ru.*

Согласно многолетним статистическим наблюдениям причинами практически одной трети всех чрезвычайных происшествий, аварий, инцидентов и несчастных случаев на опасных производственных объектах, являются организационные мероприятия, непосредственно связанные с присутствием человеческого фактора.

Основными задачами государственной политики в области промышленной безопасности являются [1]:

- внедрение риск-ориентированного подхода при организации федерального государственного контроля (надзора) в области промышленной безопасности;

- разработка нормативно-правовой базы в части, касающейся создания и внедрения системы государственного дистанционного мониторинга состояния промышленной безопасности, предусматривающей автоматизированный сбор, фиксацию, обобщение, систематизацию и оценку информации о значениях параметров технологических процессов на промышленных объектах в целях определения состояния промышленной безопасности;

- совершенствование требований к программам подготовки, к аттестации и проверке знаний руководителей и специалистов эксплуатирующих организаций и организаций, осуществляющих обслуживание промышленных объектов;

- развитие и внедрение информационных технологий, позволяющих осуществлять взаимодействие с эксплуатирующими организациями, оптимизировать процесс получения, хранения и анализа информации о производственном контроле за соблюдением требований промышленной безопасности, о системах управления промышленной безопасностью, об авариях и инцидентах на промышленных объектах;

- совершенствование правовых механиз-

мов ответственности за нарушение требований промышленной безопасности, а также формирование механизмов стимулирования деятельности по повышению ее уровня;

Безопасность опасных производственных объектов находится в прямой зависимости от уровня квалификации персонала, эксплуатирующего данный объект. Работники опасных производственных объектов являются важнейшим фактором производства, а уровень их квалификации - критерием конкурентоспособности предприятия. По-прежнему актуальны вопросы обучения, аттестации, подтверждения квалификации для работников опасных производственных объектов всех уровней.

Анализ аварийности на опасных производственных объектах всех классов опасности за последнее десятилетие свидетельствует о практически идентичных причинах, способствовавших их возникновению, а именно:

- технических;

- организационных, связанных с так называемым, «человеческим фактором» [5].

Технические причины возникновения аварийных ситуаций и травматизаций, послужившие возникновению неблагоприятных событий на опасных производственных объектах достаточно подробно исследовались в [3].

Организационные причины возникновения аварий и травматизаций, связанные с человеческим фактором, очевидны и являются следствием недостаточности знаний у специалистов, осуществляющих непосредственное руководство работами на опасных производственных объектах. На рис.1 приведены организационные причины аварий.

Обязательность прохождения подготовки и аттестации для руководителей и специалистов организаций, осуществляющих деятельность в области промышленной безопасности на опасных производственных объ-



ектах регламентирует Федеральный закон № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [2] и другие нормативно-правовые документы (рис. 2), определяющие направления аттестаций (области аттестаций), формы предат-

тестационной подготовки и периодичность аттестаций, а также аттестационные комиссии (рис. 3-5), уполномоченные осуществлять функции по аттестации руководителей и специалистов.



Рис. 1. Организационные причины аварий

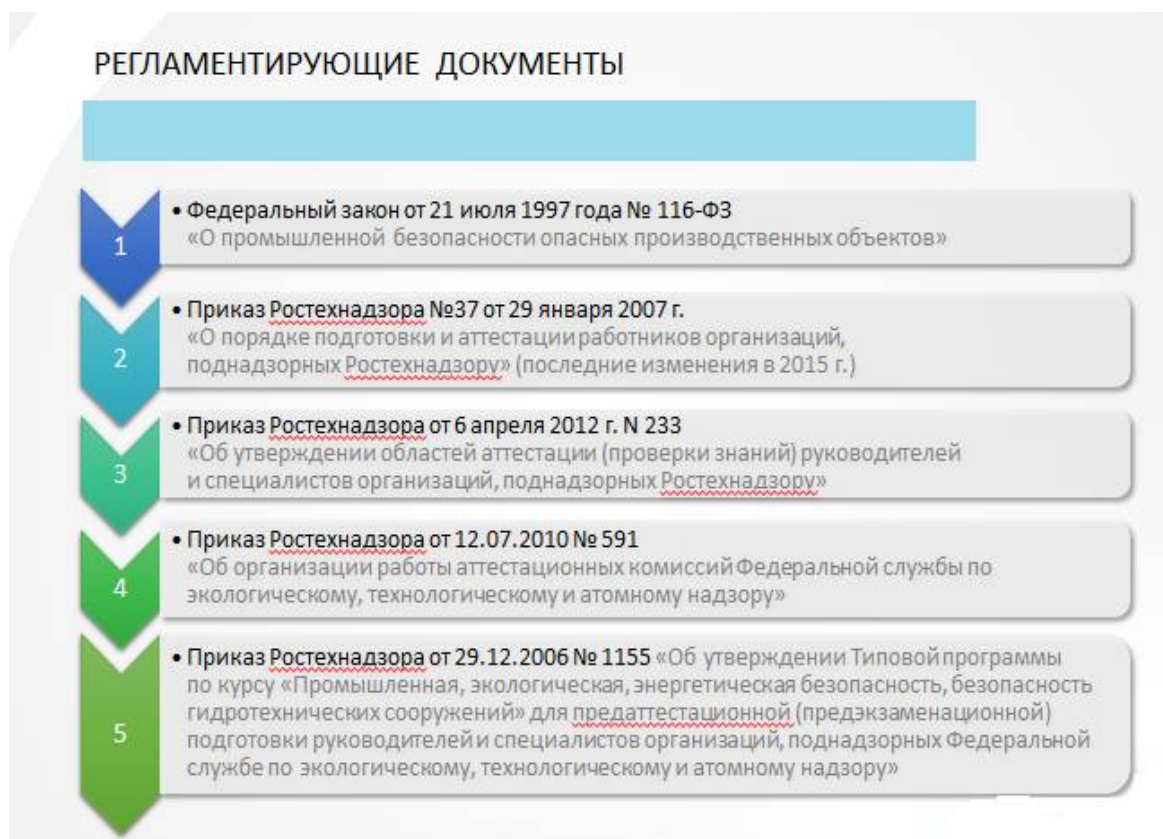


Рис. 2. Нормативно-правовые документами, регламентирующие подготовку и аттестацию работников организаций, эксплуатирующих опасные производственные объекты



Рис.3. Аттестационные комиссии

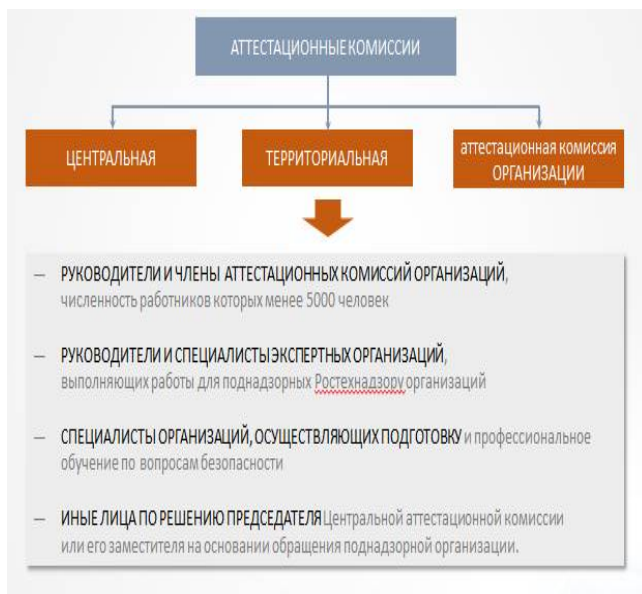


Рис. 4. Аттестационные комиссии

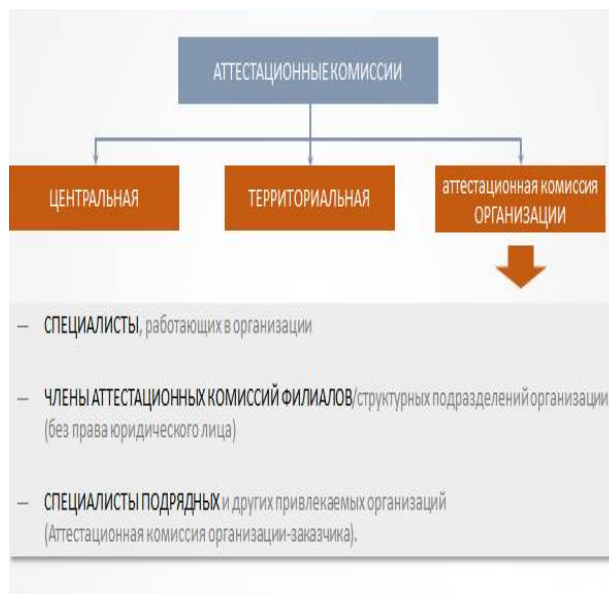


Рис. 5. Аттестационные комиссии

В настоящее время выявлены серьезные проблемы, связанные с организацией и осуществлением работ комиссий, поднадзорных Ростехнадзору организаций, по аттестации специалистов, находящихся в штате организации и осуществляющих руководство работами на объектах.

Можно привести основные факторы, способствовавшие вышесказанному, а именно то, что на руководство организаций, эксплуатирующих опасные производственные объ-

екты, возложена ответственность самостоятельных решений не только по достижению производственных целей, но и соблюдению требований промышленной безопасности на объекте. Одной из составляющих соблюдения требований промышленной безопасности являются вопросы достаточной квалификации рабочих профессий и специалистов. Другим немаловажным фактором служит отсутствие обязательных требований по участию в работе комиссии представителей Рос-

технадзора, а также по информированию указанной службы о работе комиссии поднадзорной организации.

В соответствии с действующими требованиями Ростехнадзора аттестация специалистов по вопросам безопасности в организациях осуществляется по графику, утверждаемому руководителем организации. Председателем комиссии назначается руководитель или его заместитель, а состав комиссии включает главных специалистов организации, начальников управлений, отделов, осуществляющих производственный и другие виды внутреннего контроля за соблюдением требований безопасности, а также представителей аварийно-спасательных служб предприятия и иных высококвалифицированных специалистов.

График аттестации должен направляться в соответствующие территориальные органы Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в порядке информирования. По инициативе председателя аттестационной комиссии организации или его заместителя в состав комиссии по согласованию могут включаться представители территориальных органов Ростехнадзора, если обязанность их участия не предусмотрена соответствующими нормативными правовыми актами.

Несмотря на практически полную самостоятельность в установлении графиков, формировании состава комиссии и проведе-

ния процедуры аттестации, комиссии предприятий обязаны взаимодействовать, информировать и привлекать надзорные органы.

Однако в связи с тем, что данные требования не являются принудительными, отмечается халатное отношение к данному вопросу большинства организаций и предприятий, а именно:

- не привлекаются представители Ростехнадзора;
- не информируются должным образом территориальные органы Ростехнадзора о графике аттестаций;
- не ведутся архивы (реестры) прохождения аттестации специалистами.

Следует подчеркнуть важность того, что регулярное проведение аттестации не должно носить формальный характер на предприятии. Подобная оценка работы и умений специалистов должна отражать реальное положение дел и по ее итогам обязательно следуют те или иные изменения в кадровом составе. Грамотная аттестация позволяет своевременно улучшить использование труда специалистов и усовершенствовать аппарат управления, что способствует повышению эффективности производства и уровня промышленной безопасности на опасных производственных объектах.

На рис. 6 представлены выявленные проблемы организации процедур аттестации для специалистов.

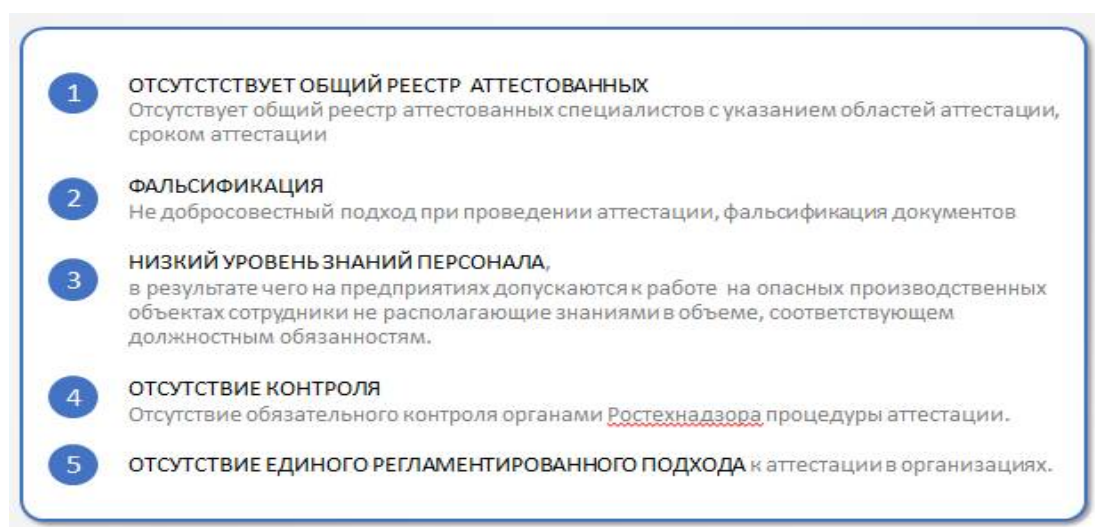


Рис. 6. Проблемы процедуры аттестации

Следствием перечисленных проблем являются:

- низкий уровень знаний специалистов, допущенных к организации и контролю на опасных производственных объектах;
- неспособность поставить производственную задачу, определить пути ее выполнения с учетом возможных рисков и осуществить контроль выполнения задач;
- неготовность к нештатным ситуациям на объектах (инциденты, аварии и т.д.).

Проблема организации качественной процедуры аттестации в комиссиях организаций, поднадзорных Ростехнадзору, в настоящее время обсуждается на разных уровнях государственной власти и некоммерческих структур.

Одним из предлагаемых решений, вынесенных на рассмотрение заседания комитета

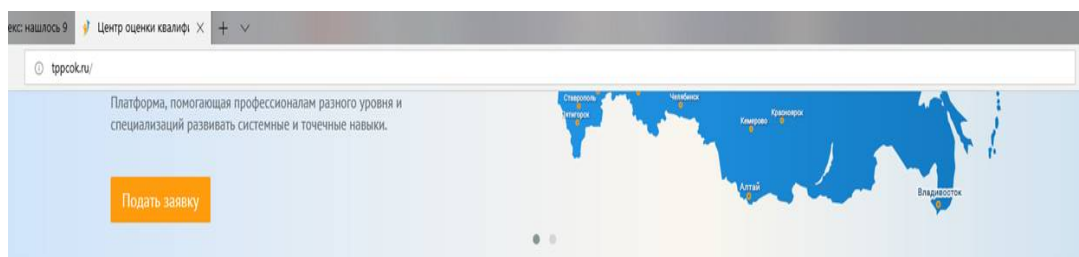
Торгово-промышленной палаты Российской Федерации по промышленной безопасности, является создание и внедрение Единой аттестационной программы, позволяющей решить ряд существенных задач и имеющей неоспоримые преимущества (рис. 7).

Ввиду проводимых реформ контрольно-надзорной деятельности развитие и использование дистанционных методов контроля набирает все большую актуальность. Так, в качестве примера можно представить программу, успешно реализуемую Автономной некоммерческой организацией «Центр оценки квалификации» (г. Москва). Главная страница сайта данной организации в информационно-коммуникативной сети «Интернет» представлена на рис. 8 и 9 (<http://tppcok.ru/>; <http://test.testonjob.ru/>).



Рис.7. Единая аттестационная программа





## Центр оценки квалификации

Автономная некоммерческая организация «Центр оценки квалификации» действует на основании Федерального закона от 03.07.2016 №238-ФЗ «О независимой оценке квалификации», Постановления Правительства Российской Федерации от 16.11.2016 №1204 «Об утверждении Правил проведения центром оценки квалификаций независимой оценки квалификации в форме профессионального экзамена», иных нормативно-правовых актов в сфере трудового законодательства Российской Федерации и документов Национального совета при Президенте Российской Федерации по профессиональным квалификациям (НСПК).

Автономная некоммерческая организация «Центр оценки квалификации» зарегистрирована в [Реестре Национального агентства развития квалификаций \(НАРК\), номер 77.029.](#)

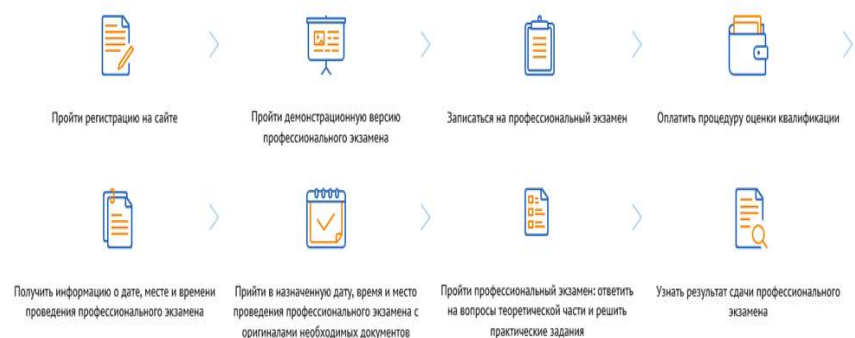


Рис. 8. Главная страница <http://tppok.ru/>

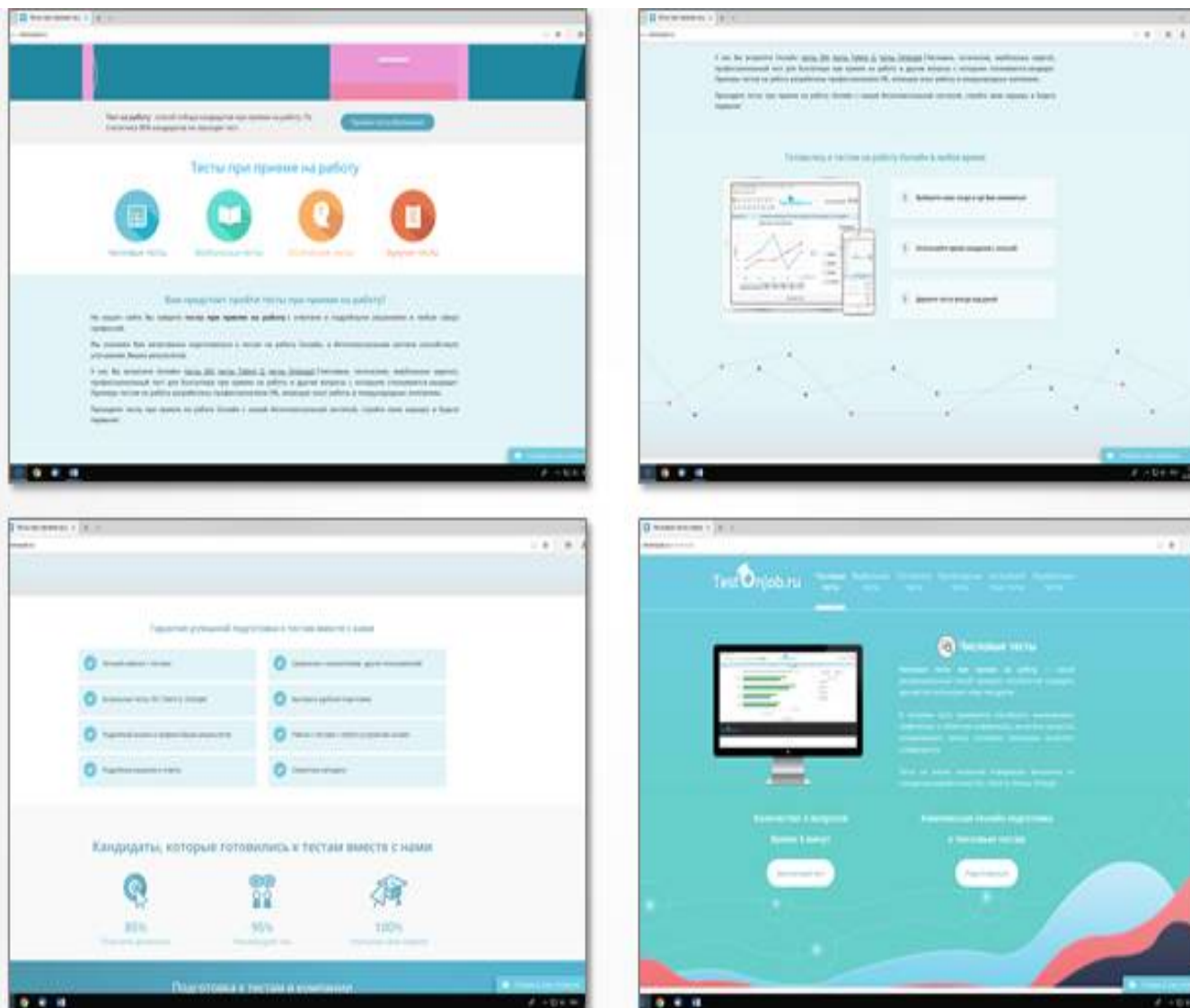


Рис. 9. Страница <http://test.testonjob.ru/>

Альтернативой представленной программы предлагается применение программы для ЭВМ «Инфоресурс-Аттестация», успешно реализуемой Малым инновационным предприятием ООО «ДГТУ-Обучающие технологии и консалтинг» (г. Ростов-на-Дону) для предаттестационной подготовки руководителей и специалистов по вопросам промышленной безопасности в соответствии с утвержденными областями аттестации (рис. 10).

Программа «Инфоресурс-Аттестация» позволяет пользователям формировать заявки на прохождение полного курса подготовки с последующей аттестацией по заявленным областям аттестаций, получить персональный доступ к актуализированной библиотеке, оценить уровень своей компетент-

ности, пройдя обязательное вступительное тестирование, а по достижении готовности к аттестации - пройти итоговое тестирование с формированием протокола.

Веб-портал представляет собой систему дистанционного обучения и аттестации, позволяющую организовать через Интернет полный цикл подготовки и аттестации, включая создание и ведение электронной библиотеки, учебных программ, тестирования пользователей и контроля их знаний.

Использование программы «Инфоресурс-Аттестация» достаточно просто, не требует специальных знаний и навыков программирования и, что немаловажно, не требует существенных затрат, поскольку возможно с любых средств, поддерживающих с



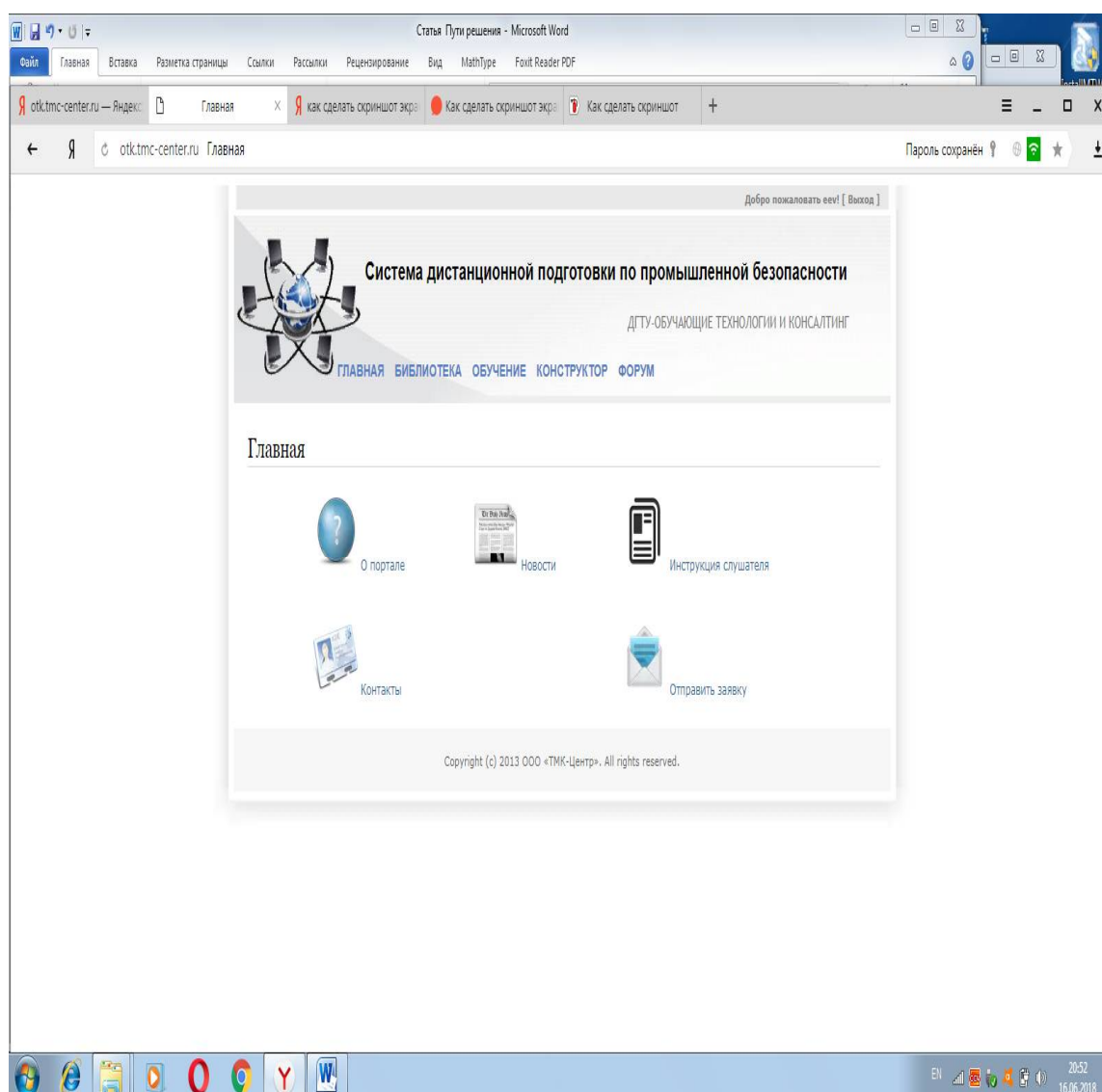


Рис.10. Главная страница портала

связь с Интернет по индивидуальному логин-пароллю. При необходимости можно получить сопровождение тьютора по электронной почте или используя Скайп.

База данных программы – законодательные, нормативные документы и тестовые задания – формируется в соответствии с приказами Ростехнадзора «Об утверждении областей аттестации проверки знаний руководителей и специалистов организаций, поднадзорных Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору (утверждён 06 апреля 2012 г. № 233) и «О внесении изменений в Положение об организации работы по подготовке и аттестации специалистов организаций, поднадзор-

ных Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору» (утверждён 29 января 2007 г. № 37) и может использоваться не только в процессе предаттестационной подготовки специалистов, но и при проведении итогового тестирования, успешное прохождение которого можно считать аттестацией.

На рис. 11-13 представлены скриншоты экранов блока обучения, отображающие текст изучаемого документа (рис.11), тестового вопроса к изучаемому документу для самоконтроля (рис. 12) и получения результатов тестирования (рис. 13).

## Обучение

Программы обучения → Учебно-тематический план → Модульный блок 1: Общие вопросы промышленной безопасности → Учебный элемент 1.1: Разрешительная деятельность в области промышленной безопасности → 1.1.1. Лицензирование в области промышленной безопасности

Дидактические материалы		
1. Федеральный закон «О промышленной безопасности ОПО» № 116-ФЗ Принят Государственной Думой 20 июня 1997 года (послед. Измен 30.11.11 №347-ФЗ)		
<a href="#">Описание дидактического материала</a>		
<a href="#">Изучение</a>	Вопросов по документу: 1	<a href="#">Тестовый вопрос</a>
<p>авария - разрушение сооружений и (или) технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, неконтролируемые взрыв и (или) выброс опасных веществ;</p> <p>инцидент - отказ или повреждение технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, отклонение от режима технологического процесса, нарушение положений настоящего Федерального закона, других федеральных законов, принимаемых в соответствии с ними нормативных правовых актов Президента Российской Федерации, нормативных правовых актов Правительства Российской Федерации, а также федеральных норм и правил в области промышленной безопасности;</p> <p>(в ред. Федерального закона от 19.07.2011 N 248-ФЗ) (см. текст в предыдущей редакции)</p> <p>технические устройства, применяемые на опасном производственном объекте, - машины,</p>		

Рис. 11. Скриншот экрана блока обучения  
(предоставлен текст документа и возможность самоконтроля с помощью тестового вопроса)

## Обучение

Программы обучения → Учебно-тематический план → Модульный блок 1: Общие вопросы промышленной безопасности → Учебный элемент 1.1: Разрешительная деятельность в области промышленной безопасности → 1.1.1. Лицензирование в области промышленной безопасности

Дидактические материалы		
1. Федеральный закон «О промышленной безопасности ОПО» № 116-ФЗ Принят Государственной Думой 20 июня 1997 года (послед. Измен 30.11.11 №347-ФЗ)		
<a href="#">Описание дидактического материала</a>		
<a href="#">Изучение</a>	Вопросов по документу: 1	<a href="#">Тестовый вопрос ↑</a>
<p>Промышленная безопасность опасных производственных объектов в соответствии с ФЗ "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" - это: (№ 116-ФЗ. Ст.1 ч.1)</p> <p><input type="checkbox"/> Система установленных законом мер, обеспечивающих состояние защищенности жизненно важных интересов личности и общества от аварий на опасных производственных объектах и последствий указанных аварий</p> <p><input type="checkbox"/> Система установленных законом запретов, ограничений и предписаний по безопасной эксплуатации опасных производственных объектов</p>		

Рис.12. Скриншот экрана блока обучения  
(предоставлен тестовый вопрос для самоконтроля)

## Обучение

Программы обучения → Учебно-тематический план → Модульный блок 1: Общие вопросы промышленной безопасности → Учебный элемент 1.1: Разрешительная деятельность в области промышленной безопасности → 1.1.1. Лицензирование в области промышленной безопасности

Дидактические материалы			
1. Федеральный закон «О промышленной безопасности ОПО» № 116-ФЗ Принят Государственной Думой 20 июня 1997 года (послед. Измен 30.11.11 №347-ФЗ)			
<u>Описание дидактического материала</u>			
<u>Изучение</u>	Вопросов по документу: 1	<u>Тестовый вопрос ↑</u>	
Вопрос	Ответов	Выбрано	Верных
Промышленная безопасность опасных производственных объектов в соответствии с ФЗ "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" - это: (№ 116-ФЗ. Ст.1 ч.1)	1	1	0
<input type="checkbox"/> Показать все ответы			
Ответ	Верно		
Система установленных законом мер, обеспечивающих состояние защищенности жизненно важных интересов личности и общества от аварий на опасных производственных объектах и последствий указанных аварий	Неверно		

Рис. 13. Скриншот экрана блока обучения (предоставлен результат тестирования)

Информирование органов Ростехнадзора о работе комиссий, поднадзорных организаций и аттестации с предоставлением результатов проведенных тестирований с фиксацией реального времени и данных тестируемого, осуществляемое посредством информационно-коммуникационных технологий, позволит оптимизировать процесс получения, хранения и анализа информации об аттестованных специалистах.

**Заключение.** Предлагаемые пути повышения качества аттестации посредством введения Единой аттестационной системы позволят решить задачи внедрения риск-ориентированного подхода при организации федерального государственного контроля (надзора) в области промышленной безопас-

ности. Это будут способствовать созданию и внедрению системы государственного дистанционного мониторинга состояния промышленной безопасности, совершенствованию требований к программам подготовки, к аттестации и проверке знаний руководителей и специалистов эксплуатирующих организаций и организаций, осуществляющих обслуживание промышленных объектов, а также развитию и внедрению информационных технологий, позволяющих осуществлять взаимодействие с эксплуатирующими организациями, что в полной мере соответствует проводимым в настоящее время реформам контрольно-надзорной деятельности.

### Список литературы.

1. Указ Президента РФ от 6 мая 2018 г. №198 «Об Основах государственной политики Российской Федерации в области промышленной безопасности на период до 2025 года и дальнейшую перспективу».
2. Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности

†  
†  
†  
†  
†  
†  
†  
†  
†  
†

### References

1. Presidential decree No. 198 of 6 May 2018 "On the Basis of the State Policy of the Russian Federation in the Field of Industrial Security for the Period up to 2025 and beyond". (In Russian)
2. Federal law No. 116-FZ of 21.07.1997 "On Industrial Safety of Hazardous Production





опасных производственных объектов».

3. Короткий, А.А. Оценка риска человеческого фактора в системе «персонал - подъемные механизмы - производственная среда» на предприятиях машиностроения / А.А. Короткий, Е.В. Егельская // Вестник ДГТУ. - 2015. - Т.15. - № 1 (80). - С.131-137.

4. Короткий, А.А. Роль человеческого фактора при эксплуатации подъемных сооружений / А.А. Короткий, В.В. Котельников, Е.В. Егельская // Химагрегаты. - 2014. - № 4 (28). - С. 42-45.

5. Короткий, А.А. Мониторинг производственного контроля, аварийности и опасности ОПО IV класса при эксплуатации башенных кранов / А.А. Короткий, А.В. Кинжибалов, А.А. Кинжибалов // Мониторинг. Наука и технологии. - 2017. - № 4 (33). - С. 80-85.

† Facilities". (In Russian)

† 3. Korotkiy A.A., Yegelskaya E.V. Risk assessment of the human factor in the system "personnel-lifting mechanisms-production environment" at machine-building enterprises. *Vestnik DGTU*, 2015, Vol. 15, No. 1 (80), pp. 131-137. (In Russian)

† 4. Korotkiy A.A., Kotelnikov V.V., Yegelskaya E.V. The role of the human factor in the operation of lifting facilities. *Khimagregaty*, 2014, No. 4 (28), pp. 42-45. (In Russian)

† 5. Korotkiy A.A., Kinzhibalov A.V., Kinzhibalov A.A. Monitoring of production control, accident rate and danger of hazardous production facilities of class IV during operation of tower cranes. *Monitoring. Nauka i tekhnologii*, 2017, No. 4 (33), pp. 80-85. (In Russian)

УДК 656.073

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБОВ ДОСТАВКИ НАСЫПНЫХ ГРУЗОВ В  
УНИВЕРСАЛЬНЫХ КОНТЕЙНЕРАХ

ANALYSIS OF EXISTING METHODS OF DELIVERY OF FLUID CARGO IN  
UNIVERSAL CONTAINERS

Илесалиев Д.И.  
Ilesaliev D.I.

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (Ташкент, Узбекистан)  
Tashkent institute of railway engineering (Tashkent, Uzbekistan)

**Аннотация.** В целях наилучшего использования грузоподъемности и вместимости универсальных контейнеров, а также обеспечения рациональных перегрузочных работ и сокращения времени простоя транспортных средств, проанализированы существующие способы доставки насыпных грузов. Определены преимущества и недостатки способов, обеспечивающие своевременную обработку грузов.

**Ключевые слова:** параметры груза, упаковка, тара, размещения, поддон, транспортный пакет, контейнер, условия перевозок.

**Дата принятия к публикации:** 26.07.2018  
**Дата публикации:** 25.09.2018

**Сведения об авторе:**

Илесалиев Дауренбек Ихтиярович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Транспортная логистика и сервис», Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (Узбекистан); [ilesaliev@mail.ru](mailto:ilesaliev@mail.ru).

**Введение.**

На сегодняшний день перевозка насыпных грузов на железнодорожном транспорте осуществляется в специализированных вагонах. Содержание таких вагонов связано с дополнительными расходами, кроме того, имеет место дефицит таких вагонов. В связи с этим возникает необходимость внедрения инновационных технологий обусловленных уменьшением расходов логистических издержек на доставку грузов. Для решения данной задачи необходимо проанализировать существую-

**Abstract.** In order to make the best use of the carrying capacity and capacity of universal containers, as well as to ensure rational transshipment and reduce downtime of vehicles, the existing methods of delivering bulk cargoes are analyzed. The advantages and disadvantages of methods ensuring timely handling of cargoes are determined. The subject of the study is the structure of technology for the delivery of bulk cargo transported in containers. The purpose of the study is to improve the delivery system based on a more efficient structure of the supply chain in the field of automated loading and unloading of bulk goods into containers. The research methods are based on the analysis and generalization of the existing methods of collecting the initial information, the methods of its processing in support of the choice of the most rational technology for the transport of loose goods in containers.

**Keywords:** cargo parameters, packaging, packaging, placement, pallet, transport package, container, transportation conditions.

**Date of acceptance for publication:** 26.07.2018  
**Date of publication:** 25.09.2018

**Author' information:**

Daurenbek I. Ilesaliev – Ph.D. (Eng), Department “Transport logistics and services” at Tashkent institute of railway engineering (Uzbekistan); [ilesaliev@mail.ru](mailto:ilesaliev@mail.ru).

щие способы доставки насыпных грузов в универсальных контейнерах.

**1. Способы доставки насыпных грузов в затаренном виде.**

Один из самых простых и часто применяемых способов перевозок является доставка насыпных грузов в мешках, поштучно (рис. 1, а). Способ доставки поштучно не требует дополнительных расходов на поддоны и другие средства пакетирования, обеспечивает более плотную погрузку; не требует дополнительных расходов на крепление

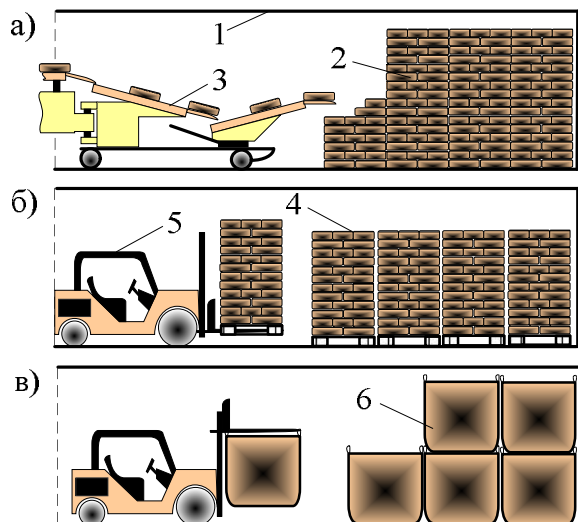


Рис. 1. Способы погрузки насыпных грузов предварительно в затаренном виде:  
 а - в мешках (поштучно); б - в транспортных пакетах; в - мягких контейнерах (в биг-бегах): 1 – универсальный контейнер; 2 – насыпные грузы, затаренные в мешки; 3 – конвейерная машина; 4 – транспортный пакет, сформированный из мешков; 5 – электропогрузчик; 6 – мягкий контейнер

грузов. Однако перевозка поштучно требует применения ручного труда. Кроме низкой производительности грузовых операций такие перевозки приводят к потерям продукции. Проблема решается переходом на пакетные перевозки (рис. 1, б) [1, 5-9, 11-12, 14-17, 1-23]. Данная технология перевозок имеет ряд преимуществ по сравнению с пе-

ревозками поштучно. Они заключаются в сокращении трудозатрат на перегрузочные операции и штат рабочих, снижении себестоимости погрузочно-разгрузочных работ и доставки в целом. За последнее время перевозка насыпных грузов в мягких контейнерах (биг-беги) вытесняют другие виды перевозок (рис. 1, в). Мягкие контейнеры универсальны и могут быть адаптированы под любое погрузочно-разгрузочное оборудование. Преимущества данного способа заключается в невысокой стоимости и эффективности перегрузочных работ, в возможности многократного использования, а также в возможности хранения на открытых площадках. Впрочем, такой способ доставки имеет и свои недостатки в требовании особых условий перегрузки грузов, а также не полное использование контейнера.

## 2. Способы доставки насыпных грузов россыпью.

Основным недостатком вышеперечисленных способов доставки насыпных грузов является не только простота под погрузочно-разгрузочными операциями, но и нерациональное использование вместимости универсального контейнера. Как видно из анализа рис. 2 применение контейнерного вкладыша позволяет практически полностью использовать универсальный контейнер по вместимости.

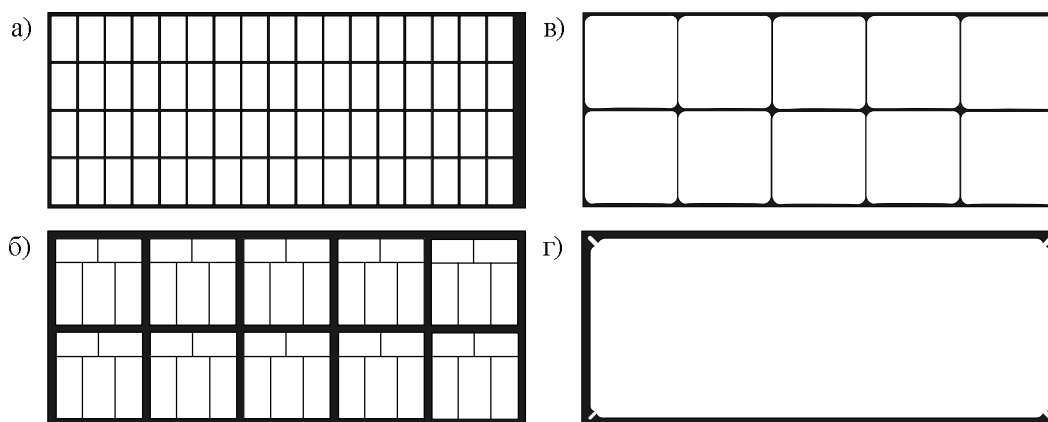


Рис. 2. Сравнение вариантов загрузки насыпных грузов: а - в мешках (поштучно); б - в транспортных пакетах; в - мягких контейнерах (в биг-бегах); г - при применении контейнерного вкладыша (россыпью)



Контейнерный вкладыш – это специализированная тара, которая защищает перевозимый насыпной груз в контейнерах от влаги, пыли и различных воздействий. Особая пропиленовая ткань позволяет «дышать» насыпному грузу в контейнере, который вентилируется за счёт системы вытяжки, при этом исключает попадание воды в контейнер. Стоит отметить, что использование контейнерного вкладыша позволяет минимизировать естественную убыль насыпного груза при транспортировке. Испытание универсального контейнера с контейнерным вкладышем произвела транспортно-логистическая компания «КонтРейл-Байт-Сибирь» по маршруту со станции г. Новосибирска по Дальневосточному транспортному коридору в морские порты.

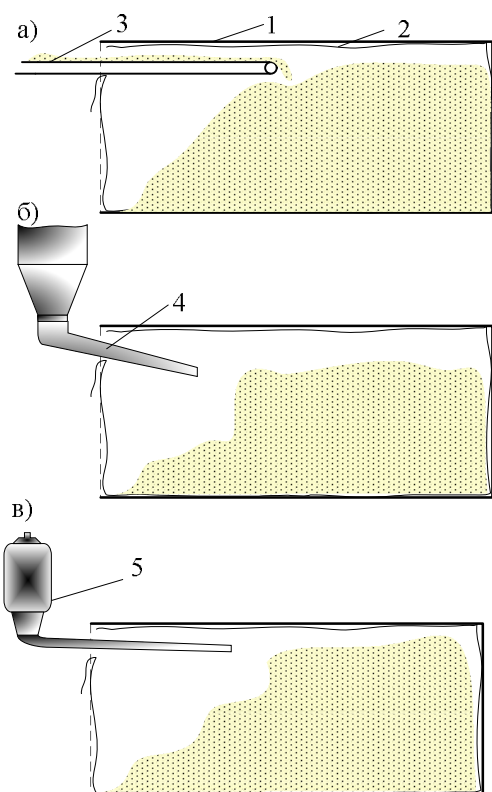


Рис. 3. Способы горизонтальной погрузки насыпных грузов, перевозимых россыпью:

а - с помощью конвейера; б - с помощью отпусковой трубы; в - с помощью пневматического устройства:

1 – универсальный контейнер;  
2 – контейнерный вкладыш; 3 – конвейер;  
4 – отпусковая труба; 5 – пневматическое устройство

Погрузка насыпного груза может производиться различными способами, которые можно поделить на горизонтальную и вертикальную погрузку [2-4, 10, 13, 18, 24]. Горизонтальная погрузка производится заполнением грузового пространства контейнера насыпным грузом, поступающим по конвейеру (рис. 3, а), отпусковой трубе (рис. 3, б) или пневматическому устройству (рис. 3, в).

Недостаток рассмотренной технологии заключается в том, что при горизонтальной погрузке не удаётся заполнить контейнер полностью. Однако, в любом случае, данный способ эффективнее, чем перевозка в затаренном виде.

Вертикальная погрузка (рис. 4), в свою очередь, осуществляется с помощью контейнероопрокидывателя, который имеет возможность переводить контейнер в вертикальное положение. Время загрузки обычно занимает 20...25 мин, при этой технологии вместимость контейнера максимальна.

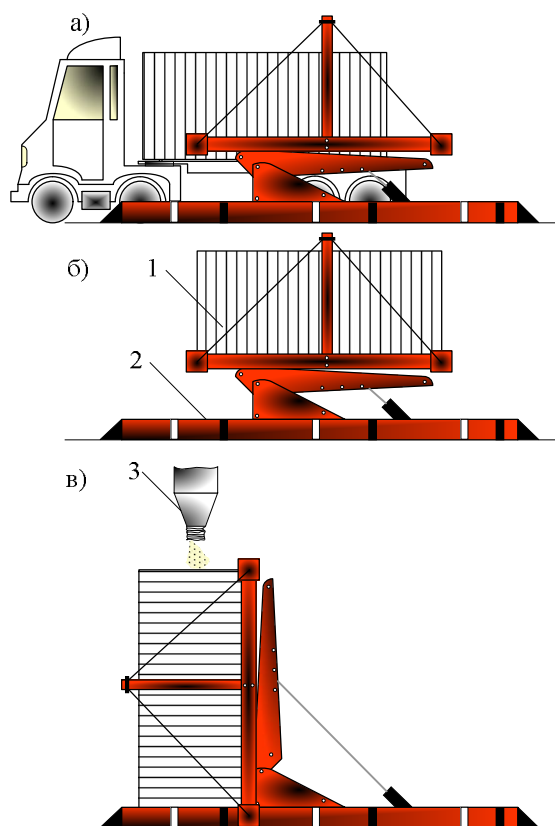


Рис. 4. Вертикальная погрузка насыпных грузов, перевозимых россыпью:

1 – универсальный контейнер;  
2 – контейнероопрокидыватель;  
3 – питатель бункера

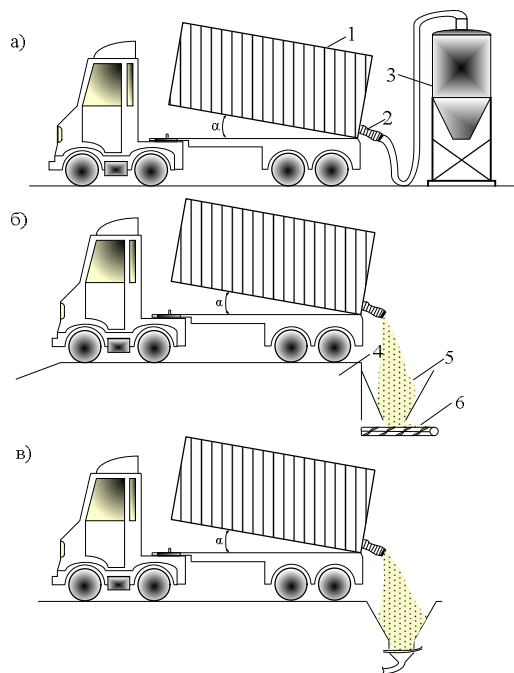


Рис. 5. Разгрузка насыпных грузов перевозимых россыпью: а - с помощью силоса; б - с помощью грузовой ramпы; в - с помощью приёмочного бункера:  
 1 –универсальны контейнер;  
 2 – выгрузочный рукав контейнерного вкладыша; 3 – силос; 4 – грузовая ramпа; 5 – приёмный бункер; 6 – конвейер

При выгрузке контейнер устанавливается под наклоном (угол наклона должен составлять 30...45°), насыпной груз засасывается под действием вакуума (рис. 5, а). Возможны и другие способы выгрузки: под действием силы тяжести насыпной груз выгружается самотёком (рис. 5, б, в).

#### Обсуждение результатов.

Выбор условия перевозки насыпных грузов россыпью с экономической точки зрения достоверно может быть подтвержден (или опровергнут) расчетами экономических показателей. В связи с этим, стоимость перевозок насыпных грузов принималась по Тарифному руководству №1 (Прейскуранту 10-01, часть 2) с коэффициентом индексации 3,401 как это было установлено с 10.12.2015 г. по тарифной схеме 130 – плата за перевозку грузов в собственных (арендованных) универсальных контейнерах. Результаты расчетов стоимости 1 т перевозок показаны в табл. 1 с учетом коэффициента заполнения, равного 0,9, и объёма контейнера 33,2 м<sup>3</sup>. В расчётах принимались зерновые грузы, так как именно эти грузы на сегодняшний день из-за дефицита специализированных вагонов требуют изменения в структуре цепи поставок.

Таблица 1

Плата за перевозку грузов в собственных (арендованных) универсальных контейнерах (за одну тонну)

Наименования груза	Условия перевозок	Объёмная масса (средняя расчётная величина, т/м <sup>3</sup> )	Расстояние перевозок, км				
			1000	1250	1500	1750	2000
гречиха	россыпью	0,65	1628,6	1705,4	1764,2	1781,3	1834,5
	в таре	0,60	1764,3	1847,5	1911,2	1929,8	1987,3
кукуруза	россыпью	0,73	1450,1	1518,5	1570,9	1586,1	1633,4
	в таре	0,67	1580,0	1654,4	1711,6	1728,1	1779,7
овес	россыпью	0,45	2352,4	2463,3	2548,3	2573,0	2649,8
	в таре	0,40	2646,5	2771,2	2866,9	2894,6	2981,0
пшеница	россыпью	0,78	1357,2	1421,1	1470,2	1484,4	1528,7
	в таре	0,75	1411,5	1478,0	1529,0	1543,8	1589,9
рис	россыпью	0,75	1411,5	1478,0	1529,0	1543,8	1589,9
	в таре	0,70	1512,3	1583,5	1638,2	1654,1	1703,4
рожь	россыпью	0,73	1450,1	1518,5	1570,9	1586,1	1633,4
	в таре	0,70	1512,3	1583,5	1638,2	1654,1	1703,4
ячмень	россыпью	0,68	1556,8	1630,1	1686,4	1702,7	1753,5
	в таре	0,62	1707,4	1787,9	1849,6	1867,5	1923,2

Из данных, представленных в табл. 1, видно, что во всех случаях при доставке россыпью стоимость 1 тонны насыпного груза

дешевле по сравнению с перевозками в таре. Это наглядно показано и на графиках на рис. 6, построенных на основании данных табл. 1.

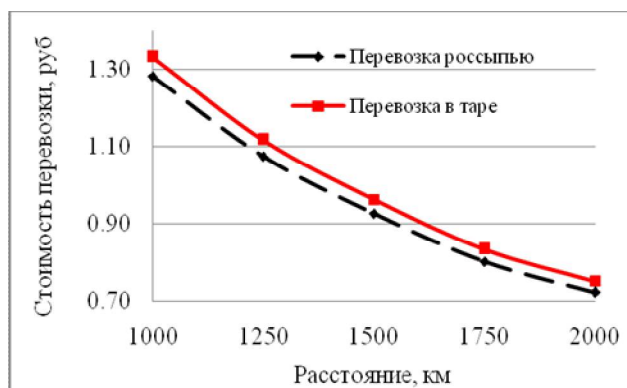


Рис. 6. Стоимости перевозки пшеницы на 1 т-км

### Заключение.

Перевозка насыпных грузов в универсальных контейнерах с применением специализированного вкладыша позволяет отправителю и перевозчику не зависеть от специализированных вагонов, а также имеет ряд

### Список литературы

1. Барсук, И.В. Стандартизация тары и алгоритм укладки посылок в контейнер при кратной высоте посылок / И.В. Барсук // Т-СОММ: Телекоммуникация и транспорт. – 2013. – Вып. 10. – С. 14-16.
2. Гагарский, Э.А. Зарубежный и отечественный опыт перевозок наливных, насыпных и навалочных грузов в универсальных контейнерах на принципах логистики / Э.А. Гагарский, С.А. Кириченко // Транспорт: наука, техника, управление. – 2009. – № 12. – С. 26-29.
3. Гагарский, Э.А. Развитие контейнерных перевозок лома / Э.А. Гагарский, С.А. Кириченко, А.С. Кириченко // Бюллетень транспортной информации. – 2009. – № 2 (164). – С. 18-21.
4. Гагарский, Э.А. Развитие перевозок насыпных грузов и навалочных грузов в универсальных контейнерах / Э.А. Гагарский, С.А. Кириченко, А.С. Кириченко // Бюллетень транспортной информации. – 2010. – № 4 (178). – С. 14-18.
5. Илесалиев, Д.И. Анализ влияния транспортной тары на условия перевозок / Д.И. Илесалиев // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2017. – № 1 (10). – С. 9-13.
6. Илесалиев, Д.И. Анализ существующих

преимуществ по сравнению с общепринятыми доставками:

- возможность использования схемы «от двери до двери»;
- нет необходимости в специализированных складских помещениях;
- минимизация естественной убыли;
- высокая производительность погрузочно-разгрузочных работ;
- снижение затрат на железнодорожный тариф;
- гарантированность сроков поставки и др.

В заключении можно сказать, что доставка насыпных грузов россыпью позволяет рационально использовать вместимость универсального контейнера. Также отсутствие излишней перегрузки делает данный способ привлекательным для перевозчиков.

### References

1. Barsuk I.V. Standardization of packaging and the algorithm for packing packages into a container at a multiple parcel height. *T-COMM: Telekommunikaciya i transport*, 2013, Vol. 10, pp. 14-16. (In Russian)
2. Gagarskij E.A., Kirichenko S.A. Foreign and domestic experience in the transportation of bulk, bulk and bulk cargo in universal containers on the principles of logistics. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie*, 2009, No. 12, pp. 26-29. (In Russian)
3. Gagarskij E.A., Kirichenko S.A., Kirichenko A.S. Development of container transportation of scrap. *Byulleten transportnoj informatsii*, 2009, No. 2 (164), pp. 18-21. (In Russian)
4. Gagarskij E.A., Kirichenko S.A., Kirichenko A.S. Development of transportation of bulk cargo and bulk cargo in universal containers. *Byulleten transportnoj informatsii*, 2010, No. 4 (178), pp. 14-18. (In Russian)
5. Ilesaliev D.I. Analysis of the impact of shipping containers on the conditions of carriage. *Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona*, 2017, No. 1 (10), pp. 9-13. (In Russian)
6. Ilesaliev D.I., Korovyakovskij E.K. The analysis of existing methods of package cargoes overloading on railway transportation. *Sovremennye problemy transportnogo kom-*

щих методов перегрузки тарно-штучных грузов на железнодорожном транспорте / Д.И. Илесалиев, Е.К. Коровяковский // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2015. – № 1 (6). – С. 38-42.

7. Илесалиев, Д.И. Перевозка экспортно-импортных грузов в Республике Узбекистан / Д.И. Илесалиев, Е.К. Коровяковский, О.Б. Маликов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2014. – № 3 (39). – С. 11-17.

8. Илесалиев, Д.И. Рациональное использование грузоподъёмности и вместимости крытых вагонов при перевозке тарно-упаковочных грузов / Д.И. Илесалиев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2012. – № 2. – С. 232-238.

9. Илесалиев, Д.И. Увеличение массы партии грузов за счёт рационального выбора транспортной тары / Д.И. Илесалиев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2018. – № 1. – С. 97-105.

10. Кириченко, С.А. Мультимодальные контейнерные перевозки зерна / С.А. Кириченко, Н.Ю. Лахметкина // Мир транспорта. – 2015. – Т. 13. – № 1 (56). – С. 116-125.

11. Коровяковский, Е.К. Взаимодействие транспортных систем и применение комплексного подхода к решению основных проблем смешанных перевозок / Е.К. Коровяковский, А.М. Симушков // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2012. – № 4 (34). – С. 5-10.

12. Коровяковский, Е.К. К исследованию вопроса выбора параметров транспортных пакетов при перевозке плодово-овощной продукции / Е.К. Коровяковский, Д.И. Илесалиев // Современные проблемы транспортного комплекса России. – 2016. – Т. 7. – № 1 (9). – С. 4-12.

13. Курилов, Е.Г. К вопросу о перегрузке грузов на приграничных станциях с разной шириной колеи / Е.Г. Курилов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2017. № 1. – С. 107-111.

14. Маликов, О.Б. Анализ способов доставки грузов железнодорожным транспортом / О.Б. Маликов, И.Ю. Согрин // Извес-

† *pleksa Rossii*, 2015, No. 1 (6), pp. 38-42. (In Russian)

† 7. Ilesaliev D.I., Korovyakovskij E.K., Malikov O.B. Transportation of export-import cargoes in the Republic of Uzbekistan. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya*, 2014, Vol. 3, No. 39, pp. 11-17. (In Russian)

† 8. Ilesaliev D.I. Rational use of loadability and capacity of covered wagons in transportation packaging cargo. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, No. 1, pp. 232-238. (In Russian)

† 9. Ilesaliev D.I. Increasing the mass of the cargo party for the account of a rational choice of the transportation tara. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, No. 1, pp. 97-105. (In Russian)

† 10. Kirichenko S.A., Lakhmetkina N.Yu. Multimodal container transportation of grain. *Mir transporta*, 2015, Vol. 1, No. 56, pp. 38-42. (In Russian)

† 11. Korovyakovskij E.K., Simushkov A.M. Interaction of transport systems and application of an integrated approach to solving the main problems of multimodal transport. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya*, 2012, Vol. 4, No. 34, pp. 5-10. (In Russian)

† 12. Korovyakovskij E.K., Ilesaliev D.I. The study on selecting the parameters of the transport packs with fruit products shipping. *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii*, 2016, Vol. 1, No. 9, pp. 4-12. (In Russian)

† 13. Kurilov E.G. Concerning the issue of cargo transshipment at border stations with different track gauges. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, No. 1, pp. 107-111. (In Russian)

† 14. Malikov O.B., Sogrin I.Yu. Analysis of methods of delivery of goods by rail. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya*, 2014, Vol. 2, No. 39, pp. 53-58. (In Russian)

† 15. Malikov O.B., Korovyakovskij E.K., Ilesaliev D.I. Logistics of package shipments of piece cargo. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya*, 2014, Vol. 4, No. 41, pp. 51-57. (In Russian)

† 16. Malikov O.B. Development of package



тия Петербургского университета путей сообщения. – 2014. – № 2 (39). – С. 53-58.

15. Маликов, О.Б. Логистика пакетных перевозок штучных грузов / О.Б. Маликов, Е.К. Коровяковский, Д. И. Илесалиев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2014. – № 4 (41). – С. 51-57.

16. Маликов, О.Б. Развитие пакетных перевозок на поддонах / О.Б. Маликов // Технические науки: теория и практика. Сборник материалов международной научной конференции. – М.: Международный центр научно-исследовательских проектов, 26-28 июня, 2014. – С. 79-86.

17. Островский, А.М. Факторы, влияющие на выбор способа перевозки груза / А.М. Островский, Е.М. Бондаренко, Е.В. Бондаренко // Новая наука: от идеи к результату. – 2016. – Вып. 11-2. – С. 134-137.

18. Роменкова, В.А. Транспортировка зерна в контейнерах / В.А. Роменкова, Н.С. Ломкина // Современные наукоёмкие технологии. – 2014. – № 5 (1). – С. 148-149.

19. Сухова, И.А. Пакетирование как фактор повышения качества транспортировки скоропортящихся грузов / И.А. Сухова, Д.А. Красникова // Научная мысль. – 2015. – № 2. – С. 39-41.

20. Тиверовский, В.И. Инновации в логистике за рубежом / В.И. Тиверовский // Вестник транспорта. – 2011. – № 10. – С. 33-38.

21. Фирсова, С.Ю. Снижение транспортных затрат за счёт выбора оптимального типа поддона при перевозке строительных грузов / С.Ю. Фирсова, А.В. Куликова // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2013. – Т. 6. – № 10 (113). – С. 86-88.

22. Фирсова, С.Ю. Технология выбора оптимального типа подвижного состава при перевозке плодово-овощной продукции от мест сбора на перерабатывающее предприятия / С.Ю. Фирсова, А.В. Куликов, Б.С. Советбеков // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2014. – Т. 14. – № 12. – С. 199-201.

23. Хамедов, О.О. О влиянии параметров транспортной тары на технологию и способ перевозки / О.О. Хамедов, Д.И. Илесалиев // Логистика – евразийский мост:

transportations on pallets. *Texnicheskie nauki: teoriya i praktika. Sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*. Moscow, Mezhdunarodnyy tsentr nauchno-issledovatel'skikh proektov, 26-28 iyunya, 2017, pp. 79-86. (In Russian)

17. Ostrovskij A.M., Bondarenko E.M., Bondarenko E.V. Factors influencing the choice of the way of transportation of cargo. *Novaya nauka: ot idei k rezultatu*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 134-137. (In Russian)

18. Romenkova V.A., Lomakina N.S. Grain transportation in containers. *Sovremennye naukoymkie tekhnologii*, 2014, Vol. 5, No. 1, pp. 148-149. (In Russian)

19. Sukhova I.A., Krasnikova D.A. Packaging as a factor in improving the quality of transportation of perishable goods. *Nauchnaya mysl*, 2015, No. 2, pp. 39-41. (In Russian)

20. Tiverovskij V.I. Innovations in logistics abroad. *Vestnik transporta*, 2011, No. 10, pp. 33-38. (In Russian)

21. Firsova S.Yu., Kulikova A.V. Reduction of transportation costs due to the selection of the optimum type of pallet for the transport of construction materials. *Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost i transport*, 2013, Vol. 10, No. 113, pp. 86-88. (In Russian)

22. Firsova S.Yu., Kulikov A.V., Sovetbekov B.S. Technology of choosing the optimal type of rolling stock for transportation of fruit and vegetable products from harvesting sites to a processing plant. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiyskogo slavyanskogo universiteta*, 2014, Vol. 14, No. 12, pp. 199-201. (In Russian)

23. Hamedov O.O., Ilesaliev D.I. On the influence of the parameters of the transport packaging on the technology and mode of transportation. *Logistika – evrazijskij most: materialy 12 Mezhdunarod. nauch.-prakt. konf. (18-20 maya 2017 g., Krasnoyarsk)*, Part 2. Krasnoyarsk, 2017, pp. 325-351. (In Russian)

24. Lindsay B.A. Ward Attachments' Container Tipper an Award-worthy New Product. *New Zealand construction News*, 2006, No. 6, pp. 16-18.

мат-лы 12-й Международ. науч.-практ. †  
конф., (18-20 мая 2017 г., Красноярск) / †  
Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Ч.2. – Красно- †  
ярск, 2017. – С. 325-351. †

24. Lindsay, B.A. Ward Attachments' Con- †  
tainer Tipper an Award-worthy New Product / †  
/New Zealand construction News. – 2006. - № †  
6. – P. 16-18. †



УДК 691.33

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СТРУКТУРНО-ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МАКРОСТРУКТУРЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

### THEORETICAL ASPECTS OF STRUCTURAL AND SIMULATION MODELING OF THE MACROSTRUCTURE OF COMPOSITE BUILDING MATERIALS

Адилходжаев А.И., Махаматалиев И.М., Шаумаров С.С.  
Adilhodzhaev A.I., Mahamataliev I.M., Shaumarov S.S.

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (Ташкент, Узбекистан)  
Tashkent institute of railway engineers (Tashkent, Uzbekistan)

**Аннотация.** В настоящее время описание совместной работы разнородных по свойствам фаз многокомпонентных высококачественных бетонов в рамках структурно-имитационного моделирования цементных композитов является весьма актуальной задачей строительного материаловедения. В контексте решения вышеуказанных задач в данной статье приводятся теоретические аспекты структурно-имитационного моделирования на примере разработанной программы «Бетон-технология», позволяющей прогнозировать прочностные свойства многокомпонентного высококачественного бетона на макроструктурном уровне.

**Ключевые слова:** структурно-имитационное моделирование, композиционные строительные материалы, высококачественный бетон, композит, макроструктура, прочность.

**Дата принятия к публикации:** 15.07.2018  
**Дата публикации:** 25.09.2018

#### Сведения об авторах:

**Адилходжаев Анвар Ишанович** – доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта; [anvar\\_1950@mail.ru](mailto:anvar_1950@mail.ru)

**Махаматалиев Иркин Муминович** - кандидат технических наук, профессор кафедры “Строительство зданий и промышленных сооружений” Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта; [erkinmah@mail.com](mailto:erkinmah@mail.com)

**Шаумаров Саид Санатович** – кандидат технических наук, доцент кафедры “Строительство зданий и промышленных сооружений” Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта; [shoumarovss@gmail.com](mailto:shoumarovss@gmail.com)

#### Введение.

Несмотря на определенные достижения в производстве бетонов различного назначения и имеющийся значительный опыт их производства в Узбекистане и за рубежом

**Abstract.** At the present time, the description of the joint work of multi-component, high-quality concretes in the framework of the structural and simulation modeling of cement composites is a very topical task of building materials science. In the context of the solution of the above problems, theoretical aspects of structural and simulation modeling are presented on the example of the developed program "Concrete-technology", which allows to predict the strength properties of multi-component high-quality concrete at the macro structural level.

**Keywords:** structural simulation simulation, composite building materials, high-quality concrete, composite, macrostructure, strength.

**Date of acceptance for publication:** 15.07.2018  
**Date of publication:** 25.09.2018

#### Authors' information:

**Anvar I. Adilkhodjaev** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for scientific work at Tashkent Institute of Railway Transport Engineers (Uzbekistan); [anvar\\_1950@mail.ru](mailto:anvar_1950@mail.ru)

**Irkin M. Mahamataliev** - Candidate of Technical Sciences, Professor of Department "Construction of buildings and industrial structures" at Tashkent Institute of Railway Transport Engineers (Uzbekistan); [erkinmah@mail.com](mailto:erkinmah@mail.com)

**Said S. Shaumarov** - Ph.D. (Eng.), Associate Professor of Department “Construction buildings and structures” at Tashkent Institute of Railway Engineers (Uzbekistan); [shoumarovss@gmail.com](mailto:shoumarovss@gmail.com)

внедрение инновационных технологий в производство сборного и монолитного бетона и железобетона идёт очень медленно. В особенности это касается высококачественных и многокомпонентных бетонов, обеспечиваю-



щих ресурсо- и энергосбережение как в процессе их производства, так и в период эксплуатации. Решение таких сложных задач связано, с одной стороны, с изысканием и расширением сырьевой базы материалов, имеющей свои особенности, оптимизацией составов, разработкой механизмов регулирования вопросов смесеобразования в увязке с технологическими режимами производства, а также с всесторонними исследованиями характера протекания структурных изменений на уровне микро- и макроструктуры и установлении взаимосвязи с физико-механическими и эксплуатационными показателями разрабатываемых материалов, с другой стороны.

Установление корреляционных зависимостей между параметрами формирующейся структуры и свойствами многокомпонентных (5-6-ти, а иногда и более составляющих) бетонов, технологических переделов получения материала с наперёд заданным комплексом свойств является весьма сложной задачей, для решения которой необходимо привлечение нетрадиционных методик, позволяющих охватить весь спектр задач: проектирование состава, исследования закономерностей и характера структурообразования, технологии приготовления, прогнозирования физико-механических и эксплуатационных показателей создаваемого материала. Попытки поиска научно обоснованного решения вышеуказанных задач с использованием неординарных методик привело к разработке и созданию полиструктурной теории композиционных строительных материалов [1, 2].

Полиструктурная теория композиционных строительных материалов как единая система научных представлений о закономерностях структурообразования, технологии и свойствах композиционных материалов строительного назначения получила заслуженное признание в научном мире.

Главная отличительная особенность полиструктурной теории состоит в том, что принцип полиструктурности выступает не только как классификационный фактор или методологический прием для объяснения механизма формирования структуры и свойств материала, но и как ключ к направленному исследо-

ванию возникающих между компонентами химических реакций с целью формирования требуемых физико-технических показателей материала, разработке рациональной технологии изготовления. В рамках полиструктурной теории композиционных строительных материалов впервые четко определены основные структурообразующие факторы для каждого структурного уровня и получены количественные зависимости свойств композитов от этих факторов [2].

Вопросы разработки строительного композита согласно основных постулатов полиструктурной теории композиционных строительных материалов рассматриваются сквозь призму последовательных этапов: физико-химические взаимодействия и превращения протекающие в формирующейся среде с учетом индивидуальных особенностей компонентов, их влияний на ход течения процессов формирования структуры, оптимизации технологических операций изготовления и т.д.

Такая многогранная задача, решение которой направлено на получение «идеального» композита с наперёд заданным комплексом свойств путем обработки большего массива переменных факторов, не может быть реализована обычным тривиальным подходом.

Анализ материалов исследований [3-6], проведенных к настоящему времени, показал, что реализация такой масштабной работы может быть выполнена путем моделирования структуры разрабатываемого композита. Полученные имитационные и виртуальные модели послужат основой для оптимизации физико-механических и технологических параметров проектируемого материала с учетом индивидуальных особенностей исходных компонентов и их объемной концентрации, а использование математического аппарата и современных компьютерных программных комплексов в полной мере обеспечит решение оптимизационных задач путем варьирования большого числа переменных факторов [7, 8].

Моделирование позволяет получить представление о внутренних процессах, протекающих при формировании структуры, установить механизм влияния отдельных элементов на ход течения возникающих взаи-

модействий и объяснить особенности формирования структуры в целом, получить виртуальную картину формирующейся структуры композита [9-14]. В результате появляется возможность производить ранжирование и описание влияния различных внешних и внутренних факторов для формирования требуемых физико-механических, физико-технических и специальных свойств проектируемого материала.

### Структурно-имитационное моделирование макроструктуры многокомпонентного высококачественного бетона.

В контексте вышеуказанных теоретических положений была разработана программа «Бетон-технология», позволяющая прогнозировать прочностные свойства тяжёлого многокомпонентного высококачественного бетона на макроструктурном уровне. Общий вид моделируемого объекта исследования приведен на рис. 1.

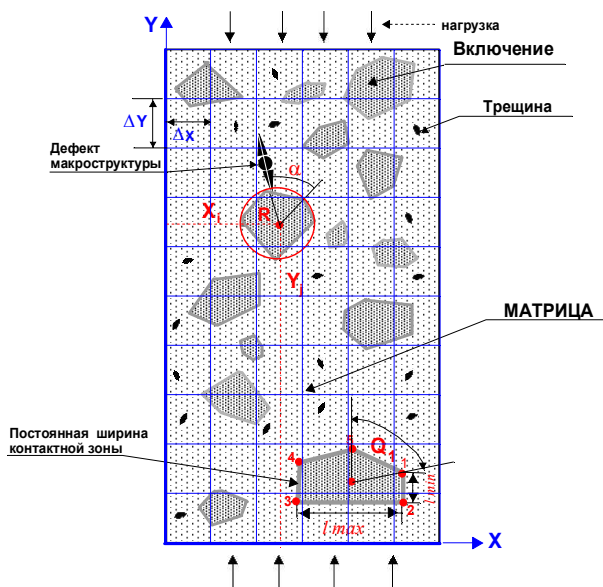


Рис. 1. Моделируемый объект и его структурные компоненты

Как видно из рис. 1, в структуре исследуемого композита различают следующие элементы:

- крупный заполнитель;
- мелкий заполнитель;
- цементный камень;
- воздушные поры;
- различные дефекты.

При моделировании макроструктура бетона условно принята состоящей из двух блоков: крупного заполнителя и цементно-

При моделировании макроструктура бетона условно принята состоящей из двух блоков: крупного заполнителя и цементно-песчаного раствора, а начальные дефекты макроструктуры бетона и его компонентов - с коллинеарными трещинами (рис. 2).

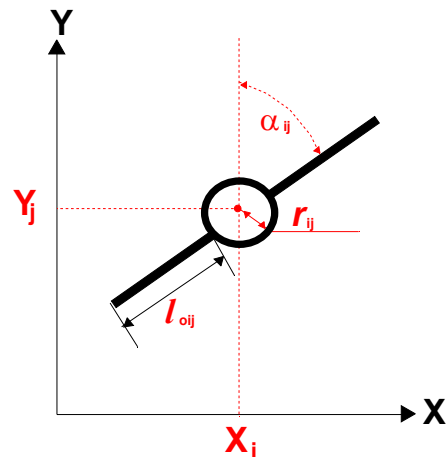


Рис. 2. Геометрические параметры начальных дефектов структуры объекта

При создании модели учитывались следующие геометрические параметры начальных дефектов макроструктуры:

- $r_{ij} = const$  – радиус поры с координатами  $X_i, Y_j$ ;
- $l_{oij}$  – начальная длина трещины, численно равная  $0,184r$ ;
- $\alpha_{ij}$  – ориентация трещины относительно вектора нагрузки (случайная величина, подчиняющаяся закону произвольного распределения в интервале от  $0 \dots 2\pi$ );
- $X_i, Y_j$  - координаты начальных дефектов макроструктуры, являющиеся независимыми случайными величинами, распределенными по равномерному закону по площади пластины (моделируемого образца);
- $N$  – количество начальных дефектов в поле образца ( $N_{min} = 30$ ).

Включения (зерна крупного заполнителя) моделировались выпуклыми многогранниками (рис. 3.) со следующими геометрическими параметрами:

- $R_{ij} = const$  – радиус описанной вокруг многоугольника окружности;

- $n_{ij}$  – число вершин многоугольника ( $n \leq 6$ );
- $\Theta_k^m$  – ориентация  $k$ -ой вершины многоугольника  $M$ -го включения относительно вектора нагрузки (случайная величина, распределенная по равномерному закону на интервале  $0 \dots 2\pi$ );
- $X_i^M, Y_j^M$  – координаты центра описанной окружности  $M$ -го включения;
- $\varphi$  – концентрация включений;
- $K_\phi$  – коэффициент формы включения.

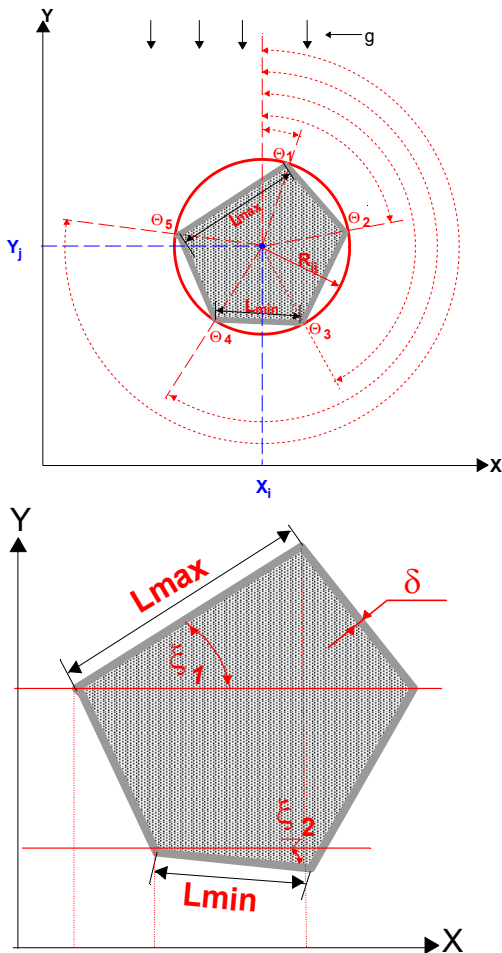


Рис.3. Общий вид включений в моделируемом объекте

Концентрация включений  $\varphi$  определяется по формуле

$$\varphi = \frac{\sum_{m=1}^M S_m^B}{S_{об}}, \quad (1)$$

где  $S_m^B$  – площадь  $M$ -го включения;  $S_{об}$  – площадь образца.

Коэффициент формы  $K_\phi$  определяется по формуле

$$K_\phi = \frac{L'_{\max}}{L'_{\min}} = \frac{L_{\max} \cos \xi_1}{L_{\min} \cos \xi_2},$$

где  $L_{\max}, L_{\min}$  – максимальная и минимальная стороны многоугольника включения.

В модели учитывались следующие физические параметры включений:

- $E_g$  – модуль упругости;
- $\mu_g$  – коэффициент Пуассона;
- $K_{Ic}^B$  – коэффициент интенсивности напряжений при нормальном разрыве;
- $K_{Ic}^P$  – коэффициент интенсивности напряжений при плоском сдвиге.

Контактная зона включения (сторона многоугольника включения с заданной шириной  $\delta$ ) является либо постоянной, либо случайной величиной, распределенной по произвольному закону.

Физические параметры включений:

- $K_{Ic}^k$  – критический коэффициент интенсивности напряжений при нормальном разрыве;
- $K_{Ic}^k$  – критический коэффициент интенсивности напряжений при плоском сдвиге принимались прямо пропорциональными аналогичному параметру матрицы:

$$K_{Ic}^k = \Delta_M K_{Ic}^M; \quad (2)$$

$$\Delta_M = \frac{MKT^K}{MKT^M}, \quad (3)$$

где  $MKT^K, MKT^M$  – микротвердость контактной зоны и матрицы соответственно (являются постоянными величинами).

В разработанной модели определяющим источником, вызывающим деформацию матрицы и компонентов бетона, является внешняя нагрузка  $g$ .

При этом объектом анализа деформационных свойств бетона в модели являются:

- слияние изолированных дефектов и их развитие на границе с включениями;
- образование и развитие зигзаг-трещин, возникающих при огибании трещинами включений.

При моделировании на начальном этапе развития трещин (рис.4.) величина внешней нагрузки  $g^*$ , вызывающей развитие двух трещин изолированного начального дефекта макроструктуры, определяется по формуле (индекс  $i$  принимает значения из области матрицы, либо значение из области контактной зоны, либо значение из области включения):

$$q^* = \frac{\sqrt{\pi} V_i K_{Ic_i} \sqrt{a_1 + a_2}}{\varphi(a_{1,2})}. \quad (4)$$

Концентрация включений  $\varphi$  для вершины  $a_2$  (рис.4) составляет:

$$\varphi(a_2) = \int_{-a_1}^{-r} \left( \frac{r^2}{2\xi^2} - \frac{3r^4}{2\xi^4} \right) \sqrt{\frac{a_1 - \xi}{a_2 + \xi}} d\xi \times \int_r^{a_2} \left( \frac{r^2}{2\xi^2} - \frac{3r^4}{2\xi^4} \right) \sqrt{\frac{a_1 - \xi}{a_2 + \xi}} d\xi. \quad (5)$$

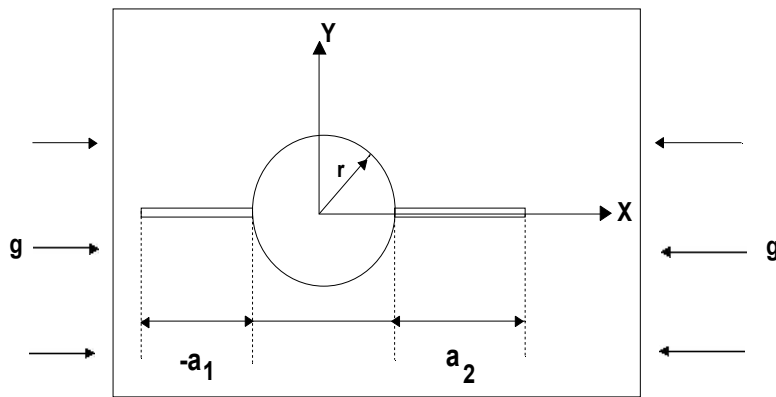


Рис. 4. Начальный дефект макроструктуры бетона и его компонентов

Условие слияния начальных дефектов с различными диаметрами определяется выражением

$$\Psi_1 = \frac{a_i + a_{i-1,i+1}}{2c - (r_i + r_{i-1,i+1})} \geq 0,46. \quad (6)$$

Величина нагрузки, вызывающей развитие  $N$  ( $N > 2$ ) слившихся начальных дефектов макроструктуры бетона или его компонентов (рис.5) описывается уравнением:

- для вершины трещины  $a_N$

$$q_{a_N}^* = \frac{\sqrt{\pi} V_i K_{Ic_i} V_i \sqrt{a_1 + a_N}}{\varphi(a_N)}; \quad (7)$$

- для вершины трещины  $a_1$

$$q_{a_1}^* = \frac{\sqrt{\pi} V_i K_{Ic_i} V_i \sqrt{a_1 + a_N}}{\varphi(a_1)}. \quad (8)$$

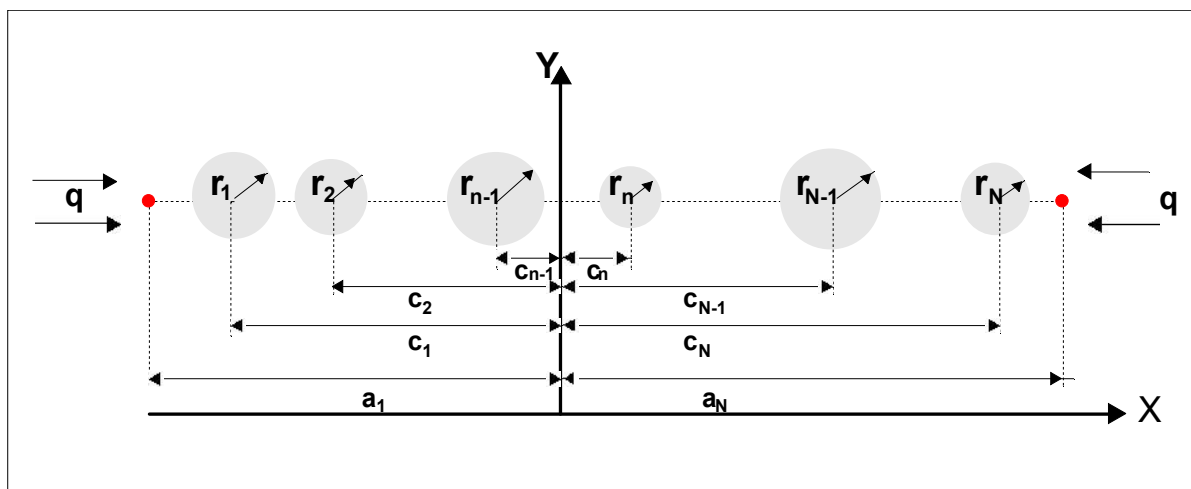


Рис. 5. Геометрические параметры начальных дефектов макроструктуры бетона и его компонентов в процессе слияния



Нагрузка  $q_{a_N}^*$ , способствующая развитию зигзаг-трещины, вычисляется по формулам:

- для вершины трещины  $a_N$

$$q_{a_N}^* = \frac{\sqrt{\pi} K_{Ici} V_i \sqrt{a_1 + a_N}}{\varphi(a_N, b_M)}, \quad (9)$$

- для вершины трещины  $a_1$

$$q_{a_1}^* = \frac{\sqrt{\pi} K_{Iic} V_i \sqrt{a_1 + a_N}}{\varphi(a_1, b_M)}, \quad (10)$$

где

$$\varphi(a_N, b_M) = \varphi(a_N) + \frac{K_{Iic}}{K_{Iic}} \sum_{m=1}^M A_m(\alpha, f, z) \sqrt{\frac{a_N - b_m}{a_N + b_m}}; \quad (11)$$

$$\varphi(a_1, b_M) = \varphi(a_1) + \left( \frac{K_{Iic}}{K_{Iic}} \right) \sum_{m=1}^M A_m(\alpha, f, z) \sqrt{\frac{a_1 - b_m}{a_N + b_m}}. \quad (12)$$

Развитие трещины на границе с включением моделируется следующим образом: при выходе трещины на грань включения (контактную зону) с ростом нагрузки  $g$  трещина будет развиваться прямолинейно (через включение) или тормозиться им.

Условие развитие трещины на границе с включением определяется параметром  $\eta$  на основании неравенств:

- трещина огибает включение:  $-\eta \leq I$ ;
- прямолинейное развитие трещины ( $K_I > K_{Ici}$ ):  $-\eta > I$ ;
- остановка трещины контактной зоной включения ( $K_I \leq K_{Ici}$ ):

при выходе трещины из включения в матрицу

$$\eta = 1,15 \frac{K_{Iic}^K}{K_{Ic}^M}; \quad (13)$$

при выходе трещины из матрицы во включение

$$\eta = 1,15 \frac{K_{Iic}^K}{K_{Ic}^B}. \quad (14)$$

Прямолинейное развитие трещины через включение (матрицу) наблюдается, если

$$K_I > K_{Ici}, \quad i = 1, 2, 3.$$

Трещина останавливается на границе с включением, если

$$K_I \leq K_{Ici}, \quad i = 1, 2, 3,$$

где  $K_{Ici}$  - принимается в зависимости от местоположения вершины трещины ( $i \sim B$  – во

включении;  $i \sim M$  – в матрице;  $i \sim K$  – в контактной зоне).

Ккоэффициент интенсивности нормальных разрывающих напряжений у вершины трещины  $K_I$  вычисляется по следующим формулам:

- для вершины трещины  $a_1$

$$K_I = \frac{q \varphi(a_1, b_M)}{V_i \sqrt{\pi(a_1 + a_N)}}; \quad (15)$$

- для вершины трещины  $a_N$

$$K_I = \frac{q \varphi(a_N, b_M)}{V_i \sqrt{\pi(a_1 + a_N)}}. \quad (16)$$

В разработанной структурно-имитационной модели процесса разрушения бетона и его компонентов на уровне макроструктуры формирующиеся взаимодействия между структурными элементами в процессе твердения бетона производятся по вышеуказанным формулам. В качестве дополнительного также принято условие, что трещина развивается параллельно приложенной нагрузке и ее рост прекращается при выходе на другую трещину.

Разработанная модель процесса разрушения цементного бетона и программное обеспечение «Бетон-технология» позволяют проследить эволюцию формирования деструктивных процессов, прогнозировать прочностные свойства тяжёлого бетона на макроструктурном уровне и получать виртуальное изображение динамики распределения напряжений в бетонном образце в процессе увеличения внешней нагрузки  $g$  вплоть до завершающего момента разрушения образца включительно (рис. 6).

#### Заключение.

Графическая визуализация результатов численного моделирования прочности цементного бетона с использованием программного комплекса «Бетон-технология» соответствует существующим представлениям о процессе разрушения цементных композиций и позволяет заключить, что предложенный метод структурно-имитационного моделирования процессов разрушения бетона при одноосном сжатии пригоден для теоретической оценки прочности рассматриваемой системы.

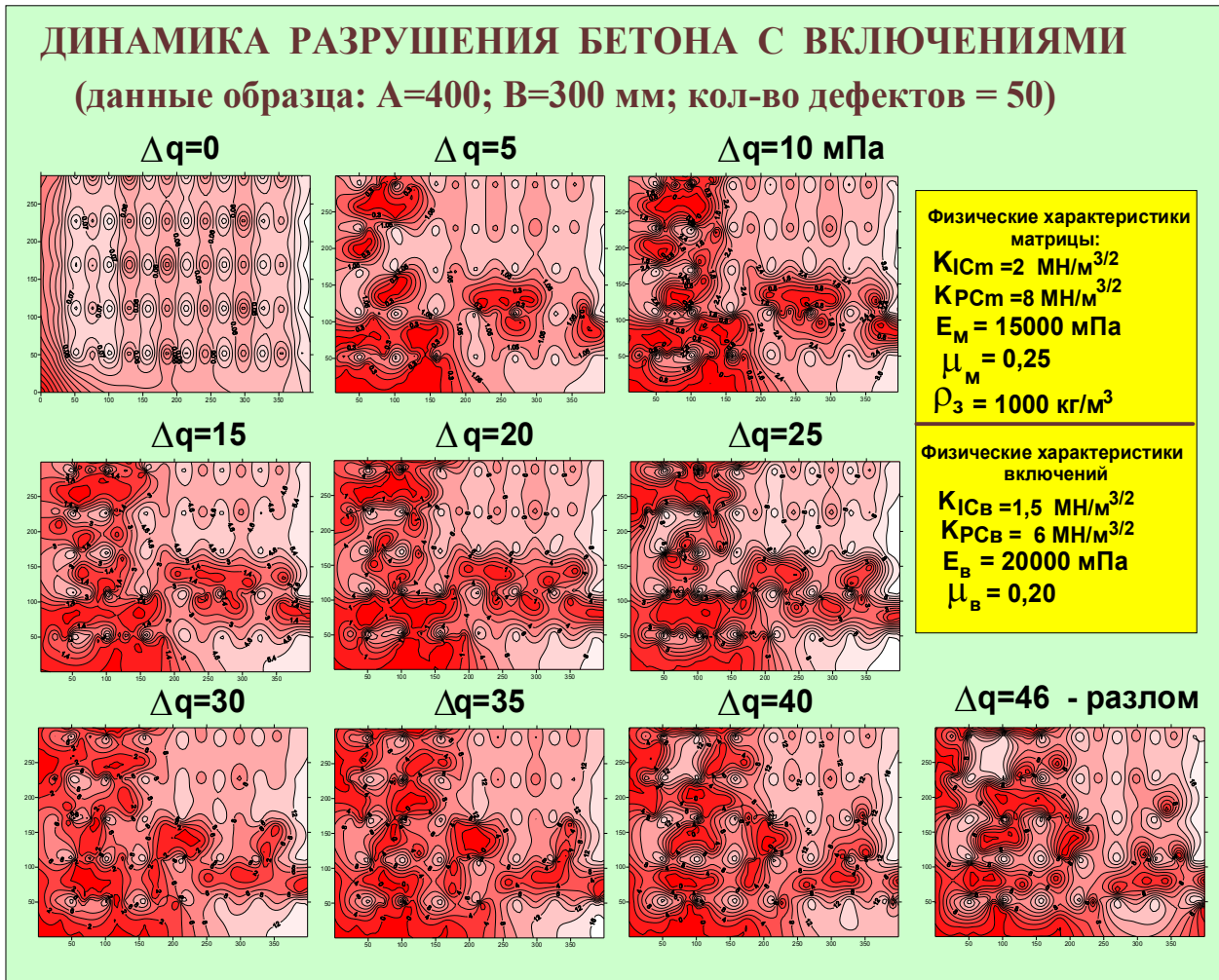


Рис. 6. Графическая визуализация результатов численного моделирования прочности цементного бетона с использованием программного комплекса «Бетон-технология»

### Список литературы

1. Соломатов, В.И. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов / В.И. Соломатов. - Ташкент: Фан, 1991. - 345 с.
2. Соломатов, В.И. Развитие полиструктурной теории композиционных строительных материалов / В.И. Соломатов // Изв. вузов. Строительство. - 1985. - № 8. - С.58-64.
3. Баженов, Ю.М. Достижения, проблемы и направления развития теории и практики строительного материаловедения / Ю.М. Баженов // Материалы X Академических чтений РААСН. Пенза, Казань, 2006. - С. 3-7.
4. Баженов, Ю.М. Основные подходы к компьютерному моделированию строительных композитов / Ю.М. Баженов // Строительные материалы. - 2006. - №7. - С. 2-4.

### References

1. Solomatov V.I. Polystructural theory of composite building materials. Tashkent, Fan, 1991. 345 p. (In Russian)
2. Solomatov V.I. Development of the polystructural theory of composite building materials. *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo*, 1985, No.8, pp. 58-64. (In Russian)
3. Bazhenov Yu.M. Achievements, problems and directions of development of theory and practice of building materials science. *“Materialy X Akademicheskikh chteniy RAASN [Materials of X academic readings of RAASN]”*. Penza, Kazan, 2006, pp. 3-7. (In Russian)
4. Bazhenov Yu.M. Main approaches to computer modeling of building composites. *Stroitelnye materialy*, 2006, No.7, pp. 2-4. (In Russian)

5. Чермашенцев, В.М. Теоретические аспекты компьютерного моделирования эффективных композиционных материалов / В.М. Чермашенцев // Изв. вузов. Строительство. - 2002. - №3. - С. 33-40.
6. Харитонов, А.М. Исследование свойств цементных систем методом структурно-имитационного моделирования / А.М. Харитонов // Строительные материалы. - 2008. - №9. - С. 81-83.
7. Adilkhodjaev, A.I. About nature of interphase interactions of basalt aggregate and polycarboxylate super plasticizer with cement in multi-component concrete / A.I. Adilkhodjaev, I.M. Mahamataliev, V.M. Tsoy // "IBAUSIL" - "19 Internationale Baustofftagung". - Weimar: 2015. - P. 1211-1219.
8. Адилходжаев, А.И. Вопросы управления качеством при проектировании составов многокомпонентных высококачественных бетонов с минеральными наполнителями / А.И. Адилходжаев, И.М. Махаматалиев, В.М. Цой // Вестник ТашГТУ. - 2016. - №1. - С. 252-260.
9. Воробьев, В.А. Основные задачи компьютерного моделирования строительных композитов / В.А. Воробьев // Строительные материалы. - 2006. - №7. - С. 19-21.
10. Воробьев, В.А. Применение физико-математических методов в исследованиях свойств бетона / В.А. Воробьев. - М.: Высшая школа, 1977. - 345 с.
11. Shaumarov, S.S. On the issue of increasing energetic efficiency of buildings in railway transport / S.S. Shaumarov // VIII International Conference "Transport Problems - 2016". - Katowice, 2016. - P. 522-532.
12. Shaumarov, S.S. On peculiarities of formation of the thermal mode in operating panel buildings / S.S. Shaumarov, A.I. Adilhodzhayev, F.F. Karimova // International conference «Science and practice: a new level of integration in the modern world». - London, 2018. P. 365-368.
13. Shaumarov, S.S. On the method of estimation of thermal protective properties of external walls of operating residential buildings / S.S. Shaumarov, A.I. Adilhodzhayev, S.I. Kandakharov // International conference «Student science: research works». Part II. - San Francisco, 2018. P. 103-106.
14. Adylhodzhayev A.I., Shaumarov S.S. The issue of thermal renovation of infrastructure of railway transport is evaluated. X International Scientific Conference "Transport
5. Chermashentsev V.M. Theoretical aspects of computer simulation of effective composite materials. *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo*, 2002, No.3, pp. 33-40. (In Russian)
6. Kharitonov A.M. Investigation of the properties of cement systems by the method of structural-simulation simulation. *Stroitelnye materialy*, 2008, No. 9, pp.81-83. (In Russian)
7. Adilkhodjaev A.I., Makhamataliev I.M., Tsoy V.M. About nature of interphase interactions of basalt aggregate and polycarboxylate super plasticizer with cement in multi-component concrete. "IBAUSIL" 19 Internationale Baustofftagung, Weimar, Bundesrepublik Deutschland, 2015, pp.1211-1219.
8. Adilkhodjaev A.I., Mahamataliev I.M., Tsoy V.M. Questions of quality management in the design of multi-component high-quality concretes with mineral fillers. *Vestnik TashGTU*, 2016, No.1, pp. 252-260. (In Russian)
9. Vorobyev V.A. The main tasks of computer modeling of building composites. *Stroitelnye materialy*, 2006, No.7, pp. 19-21. (In Russian)
10. Vorobiev V.A. Application of physical and mathematical methods in studies of concrete properties. Moscow, Vysshaya Shkola, 1977. 345 p. (In Russian)
11. Shaumarov S.S. On the issue of increasing energetic efficiency of buildings in railway transport. VIII International Conference "Transport Problems - 2016". Katowice, Poland, pp. 522-532.
12. Shaumarov S.S., Adilhodzhayev A.I., Karimova F.F. On peculiarities of formation of the thermal mode in operating panel buildings. International conference «Science and practice: a new level of integration in the modern world». London, 2018, pp. 365-368.
13. Shaumarov S.S., Adilhodzhayev A.I., Kandakharov S.I. On the method of estimation of thermal protective properties of external walls of operating residential buildings. International conference «Student science: research works». Part II. San Francisco, California, USA, 2018, pp. 103-106.
14. Adylhodzhayev A.I., Shaumarov S.S. The issue of thermal renovation of infrastructure of railway transport is evaluated. X International Scientific Conference "Transport

- cisco, 2018. - P. 103-106. †
14. Adylhodzayev, A.I. The issue of thermal †  
renovation of infrastructure of railway trans- †  
port is evaluated / A.I. Adylhodzayev, S.S. †  
Shaumarov // X International Scientific Con- †  
ference "Transport Problems - 2018". - Ka- †  
towice, 2018. - P. 13-18. †
- † *Problems - 2018*". Katowice, Poland, 2018, †  
pp. 13-18. †



УДК 528.94 (470.345)

МАТЕМАТИКО-КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ  
ЗАСТРОЙКИ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

MATHEMATICAL-CARTOGRAPHIC MODELING OF DENSITY OF BUILDING  
OF URBAN ENVIRONMENT

Макарова К.П., Левина Ю.С., Зарубин О.А., Климов А.Е.  
Makarova K.P., Levina Yu.S., Zarubin O.A., Klimov A.E.

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва  
(Саранск, Россия)

National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)

**Аннотация.** Статья посвящена проблемам математико-картографического моделирования плотности застройки городской среды как важнейшего показателя, используемого в градостроительной практике. Исследование проводилось на примере территории Пролетарского района г.о. Саранск. Моделирование выполнено в ArcGIS 10.0 на основе созданных электронных слоев и пространственных баз данных. В качестве статистических данных использовались характеристика жилого фонда административного района. Картографической основой послужили карта функциональных зон Генерального плана г. о. Саранск и геоизображения сервиса Яндекс.Карты (программа SAS.Planet). В результате реализации этапов математико-картографического моделирования спроектирована карта плотности застройки Пролетарского района г.о. Саранск. Проведено экспериментальное исследование, направленное на выбор оптимального размера ячейки для регулярной сетки при построении картографической модели. В ходе анализа полученных результатов выявлено, что плотность застройки изучаемой территории соответствует нормативным показателям.

**Ключевые слова:** математико-картографическое моделирование, геоинформационная система, плотность застройки, карта, ArcGIS v. 10.0.

**Дата принятия к публикации:** 24.08.2018  
**Дата публикации:** 25.09.2018

**Сведения об авторах:**

**Макарова Кристина Павловна** – бакалавр 4-го года обучения направления подготовки «Картография и геоинформатика» Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва, [makarova\\_kristina15@mail.ru](mailto:makarova_kristina15@mail.ru).

**Левина Юлия Сергеевна** – магистрант кафедры землеустройства и ландшафтного планирования Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва, [julia.levina2015@yandex.ru](mailto:julia.levina2015@yandex.ru).

**Abstract.** The article is devoted to the problems of mathematical-cartographic modeling of the density of building as the most important indicator of urban planning. The research was conducted on the example of the territory of Proletarsky area of the city district of Saransk. Modeling is performed in the ArcGIS 10.0 based on the created electronic layers and spatial databases. Characteristics of the housing stock of Proletarsky area of the city district of Saransk was used as a statistical data. The map of the functional zones of the General Plan of the city district of Saransk and the geoimage from the Yandex.Maps service (the SAS.Planet program) served as the initial map data. The projection of Gauss Kruger, coordinate system SK-42 was used for the projected maps. The density map of the Proletarsky area of the city district of Saransk was obtained as a result of the implementation of the stages of mathematical and cartographic modeling. An experimental research was conducted on the choice of the most optimal cell size for a regular grid when constructing a cartographic model. The compliance of the density of the building of the Proletarsky area with normative indicators was revealed by the authors.

**Keywords:** mathematical-cartographic modeling, geoinformation system, building density, map, ArcGIS v. 10.0.

**Date of acceptance for publication:** 24.08.2018  
**Date of publication:** 25.09.2018

**Authors' information:**

**Kristina P. Makarova** – bachelor of the 4th year of training of the direction of training "Cartography and Geoinformatics" at the National Research Mordovia State University, [makarova\\_kristina15@mail.ru](mailto:makarova_kristina15@mail.ru).

**Yulia S. Levina** – undergraduate student of the Department of Land Management and Landscape Planning at the National Research Mordovia State University, [julia.levina2015@yandex.ru](mailto:julia.levina2015@yandex.ru).



**Зарубин Олег Александрович** – преподаватель кафедры землеустройства и ландшафтного планирования Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва, [oleg-zarubin@list.ru](mailto:oleg-zarubin@list.ru).  
ORCID: 0000-0002-3410-1139

**Климов Александр Евгеньевич** – магистрант кафедры землеустройства и ландшафтного планирования Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва, [alex\\_klim1995@mail.ru](mailto:alex_klim1995@mail.ru).

**Oleg A. Zarubin** – lecturer of the Department of Land Management and Landscape Planning at the National Research Mordovia State University, [oleg-zarubin@list.ru](mailto:oleg-zarubin@list.ru). ORCID: 0000-0002-3410-1139

**Alexander E. Klimov** – undergraduate student of the Department of Land Management and Landscape Planning at the National Research Mordovia State University, [alex\\_klim1995@mail.ru](mailto:alex_klim1995@mail.ru).

Современные тенденции устойчивого эколого-социально-экономического территориального планирования на региональном и локальном уровнях ориентированы на комплексный учет природных, экономических, социальных, исторических и иных факторов развития территории [1]. Особое значение исследования в данной области приобретают для городов, являющихся многофункциональными центрами и выполняющими политические, промышленные, деловые, культурные, спортивные и туристские функции. Задача изучения пространственной организации городской территории актуальна и для Саранска, характеризующегося расширением городских функций в связи с проведением матчей Чемпионата мира по футболу FIFA 2018™, развитием системы общественных пространств, высокими темпами жилищного строительства.

В качестве одного из важнейших градостроительных параметров городской территории является плотность застройки. Согласно СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений» (актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89) [6] данный параметр может определяться двумя показателями:

- коэффициентом застройки (отношение площади под зданиями и сооружениями к площади участка (квартала));

- коэффициентом плотности застройки (отношение площади всех этажей зданий и сооружений к площади участка (квартала)).

Динамичные изменения планировочной структуры, следовательно, и плотности застройки, ставят задачи оперативного моделирования и пространственного анализа городской среды для принятия верных управленческих решений. В географии и смежных нау-

ках решение данной задачи основывается на применении геоинформационных (ГИС) технологий, позволяющих накапливать, хранить, анализировать и интерпретировать большие объемы пространственно-распределенной информации. Математико-картографическое моделирование на основе ГИС-технологий основывается на сочетании математических и картографических моделей для создания прикладных карт и их применении для решения практико-ориентированных задач. Сочетание математических и картографических моделей может выражаться как в простых формах, так и в виде сложного многостадийного процесса. Последний строится из элементарных моделей-звеньев. Схематично такая модель выражается следующим образом: данные + математическая модель = результат моделирования [4].

Обработка методики математико-картографического моделирования плотности застройки производилась для Пролетарского района г.о. Саранск. Выбор объекта исследования связан, с одной стороны, со сложившейся планировочной структурой и многофункциональным характером городской среды, с другой стороны, – с высокой численностью населения и значительным потенциалом территории для дальнейшего промышленного и гражданского строительства.

Пролетарский район расположен в северо-западной части городского округа. Район создавался на основе разработанного в 1960 году институтом «Гипрогор» проекта планировки и застройки Саранска. В настоящее время численность населения района (95 372 тыс. чел. [5]) соответствует проектной. В соответствии с Генеральным планом г.о. Саранск в структуре территории района с учетом исторически сложившихся особенностей

выделяются жилые (северо-западная часть), рекреационные (юго-западная часть) и производственные (восточная часть) функцио-

нальные зоны. Дисперсно в планировочной структуре района расположены общественно-деловые зоны (рис. 1).

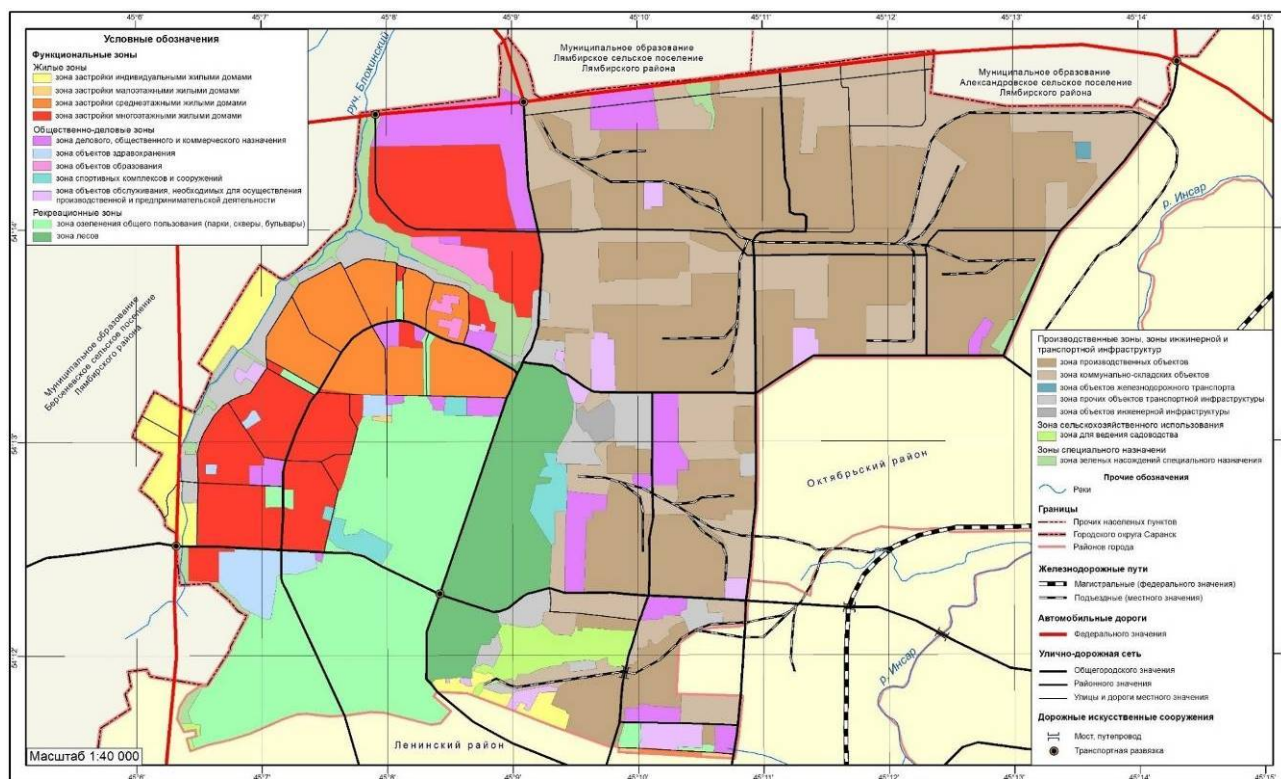


Рис. 1. Карта функциональных зон на территории Пролетарского района г.о. Саранск (по данным Генерального плана г.о. Саранск [3])

В исследовании в качестве статистических данных использована характеристика жилого фонда Пролетарского района г.о. Саранск, предоставленная администрацией района. Исходными картографическими данными послужили карта функциональных зон Генерального плана г.о. Саранск и геоизображения, полученные с сервиса Яндекс.Карты в программе SAS.Planet. Для создания электронной версии карт был выбран программный продукт ГИС ArcGIS версия 10.0. Для проектируемых карт использовалась проекция Гаусса-Крюгера, система координат – СК-42.

С учетом опыта математико-картографического моделирования территории г.о. Саранск [2] было решено работу в среде ГИС ArcGIS версия 10.0 проводить в несколько этапов (рис. 2).

На первом этапе для создания карты плотности застройки на территории Пролетарского района г.о. Саранск в ГИС ArcGIS

была создана регулярная сетка 200 × 200 м.

Пространственное наложение слоев производилось с использованием функциональных возможностей ГИС ArcGIS 10.0 с помощью модуля «Геообработка» (Geo-Processing), который позволяет выполнять разбиение и соединение объектов по ячейкам регулярной сетки. Через функцию «Калькулятор» была рассчитана площадь полученных объектов. Далее, значение в каждой ячейке сети делилось на площадь одной ячейки (40 000 м<sup>2</sup>), затем показатели были умножены на 100 %. В результате была рассчитана плотность застройки на 10 000 м<sup>2</sup> (или на 1 га). Далее полученные значения присваивались центральной точке каждой ячейки сети. Таким образом, была получена регулярная сеть точек со значениями плотности застройки (рис. 3).

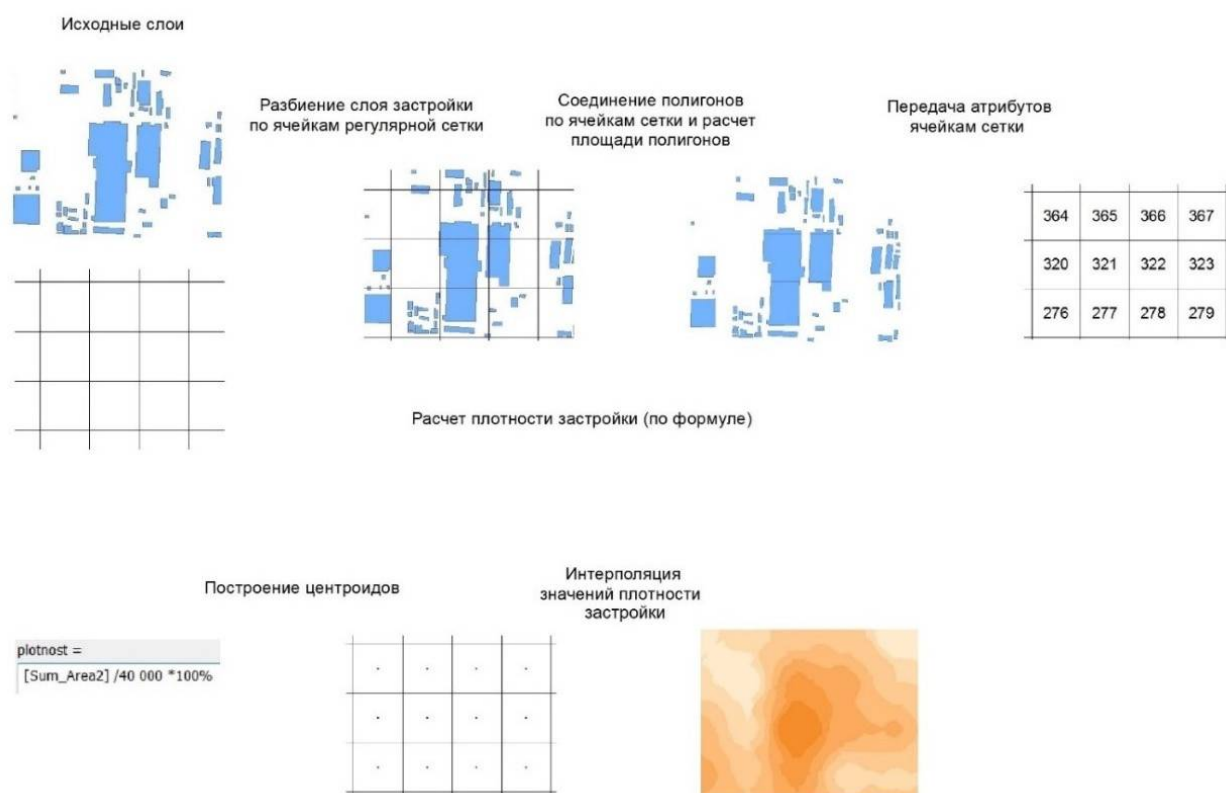


Рис. 2. Основные этапы обработки данных при создании карт плотности застройки

Используя метод пространственной интерполяции ОВР была построена поверхность распределения плотности застройки. Значение каждого пиксела полученного растра соответствует плотности застройки в процентах в каждой конкретной точке, что соответствует площади застройки в гектарах (число строений на 1 га, %).

При построении картографической модели было проведено экспериментальное исследование, направленное на выбор наиболее оптимального размера ячейки регулярной сетки. На рис. 4 представлено сравнение поверхностей, построенных с использованием разных размеров ячейки. Исследования показали, что от этого параметра зависит детальность изображения плотности застройки результирующей поверхности. Меньший размер ячейки отображает более локальные изменения («ядра»), но он может оказаться настолько мал, что большинство ячеек сетки будет иметь нулевое значение. Использование большого шага ведет к более обобщенному отображению явления, отдельные зоны застройки объединяются в единое целое. Все

это может усложнить дальнейший анализ распределения плотности застройки, поэтому в качестве наиболее оптимального варианта, была выбрана регулярная сетка с размером ячейки  $200 \times 200$  м, представленная на рис. 4, в.

На рис. 5 представлена полученная карта плотности застройки Пролетарского района г.о. Саранск. Шкала для карты плотности застройки была выбрана на основе гистограммы распределения частот.

Наибольшая плотность застройки (более 40 %) наблюдается на участках производственных зон. В западной части района, где преобладают жилые функциональные зоны, плотность застройки варьирует от 10 % до 40 %. Ближе к центру района и между кварталами на северо-востоке района наблюдается минимальный процент плотности застройки.

Соответствие полученных в результате математико-картографического моделирования данных нормативным показателям плотности застройки, установленным СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских по-



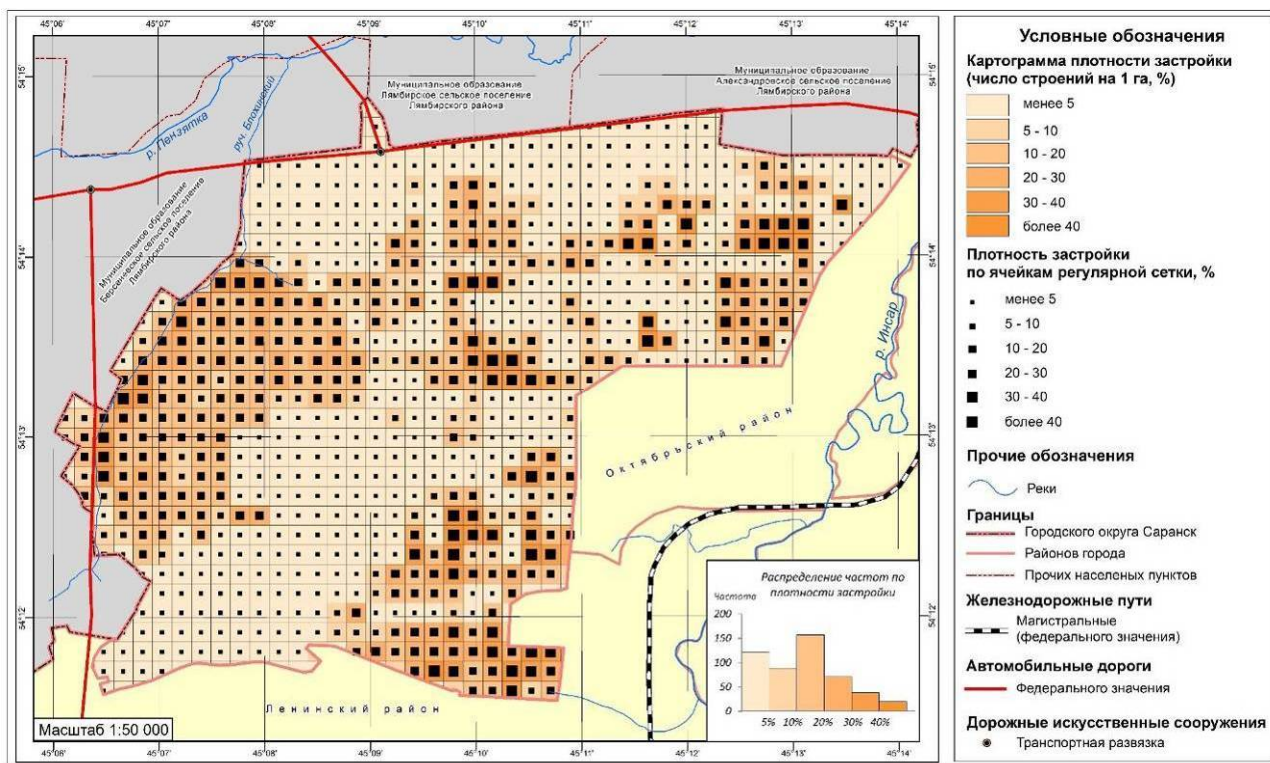


Рис. 3. Картограмма плотности застройки Пролетарского района г.о. Саранск

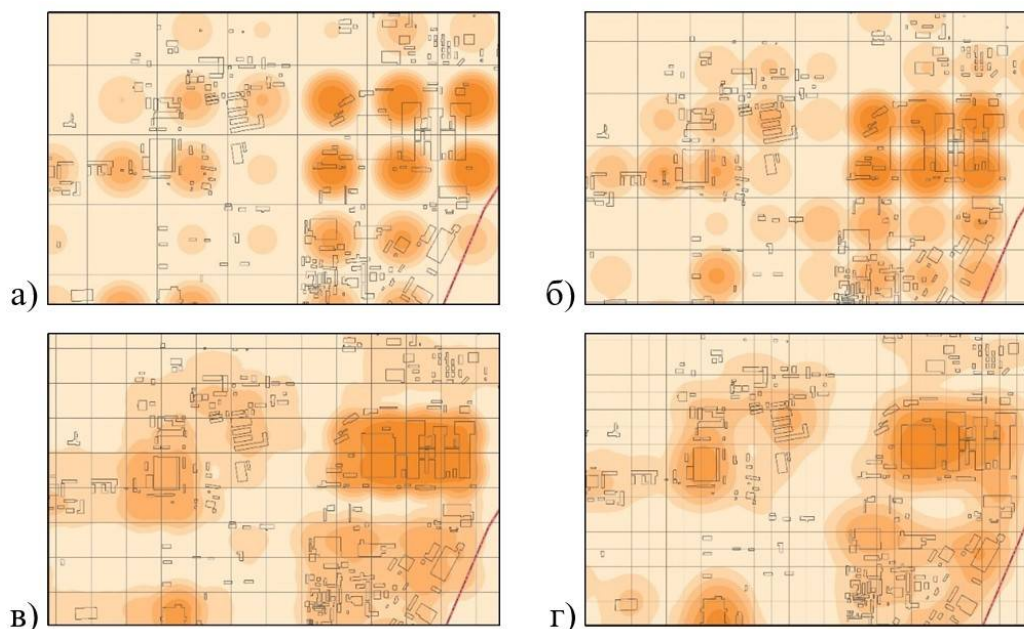


Рис. 4. Сравнение результатов обработки слоя застройки с использованием сетки с разным размером ячейки: а -  $400 \times 400$  м; б -  $300 \times 300$  м; в -  $200 \times 200$  м; г -  $100 \times 100$  м

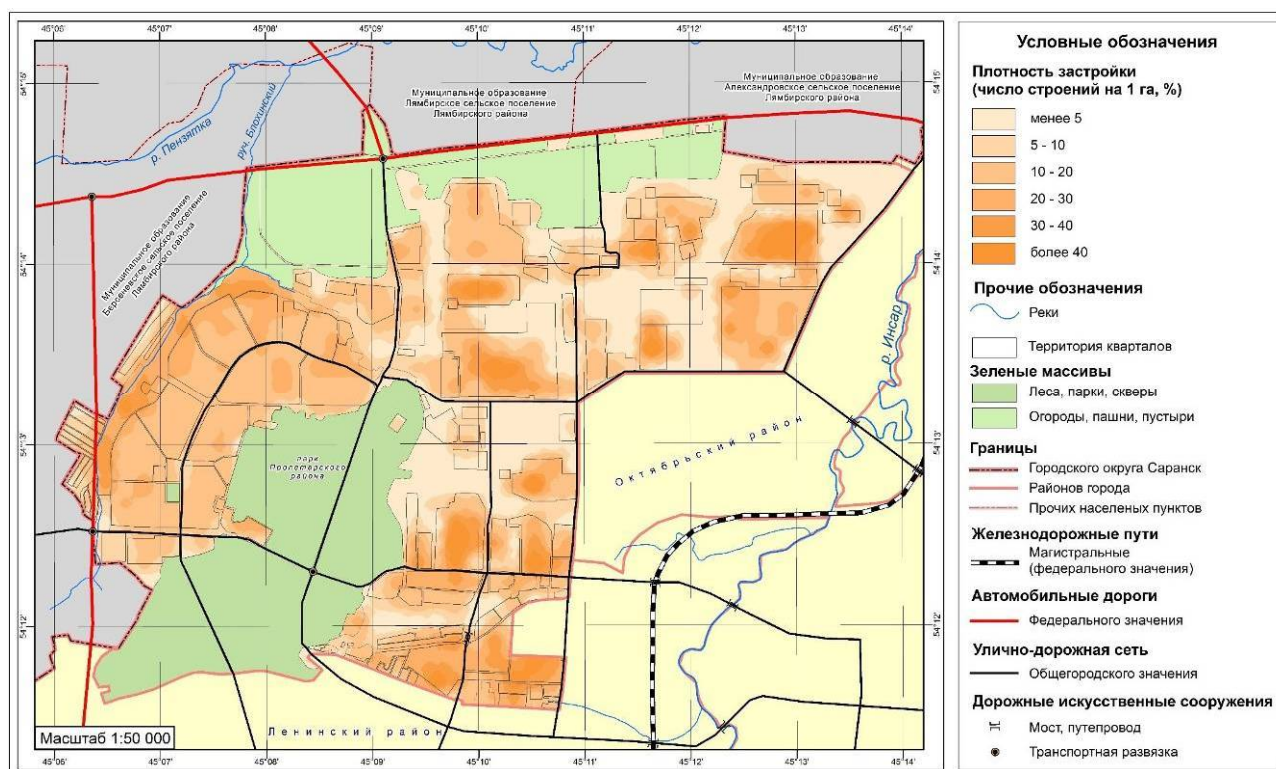


Рис. 5. Плотность застройки Пролетарского района г.о. Саранск

селений» (актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89) [6], производился на основании анализа коэффициента застройки. Наибольшую актуальность данное исследование имеет для густонаселенных жилых зон, так как характер застройки является важнейшим условием формирования комфортной среды обитания.

Так, северо-западная часть Пролетарского района, представленная жилым микрорайоном «Светотехстрой», соответствует градостроительному нормативу коэффициента застройки многоэтажными жилыми домами в 0,4 [6]. Для большинства кварталов данный показатель не превышает 0,1, максимальное значение (0,13) отмечено в квартале, ограни-

ченном улицей Веселовского, Лямбирским шоссе, проспектом 60-летия Октября и бульваром Веденяпиных.

Таким образом, математико-картографическое моделирование плотности застройки городской среды позволило сделать выводы о соответствии сложившейся планировочной структуры территории Пролетарского района г.о. Саранск нормативным показателям в части жилых зон. В связи с динамичным характером развития городского округа целесообразно аналогичные исследования провести для других районов с целью выработки рекомендаций по градостроительному освоению незастроенных территорий.

### Список литературы

1. Геоинформационная поддержка процесса организации гармоничного взаимодействия природных, социальных и производственных систем региона / С.М. Вдовин, С.А. Ямашкин, М.М. Радованович, А.А. Ямашкин, О.А. Зарубин // Теория и практика гармонизации взаимодействия природных, социальных и производственных систем региона: материалы Междунар. науч.-

### References

1. Vdovin S.M., Yamashkin S.A., Radovanovic M.M., Yamashkin A.A., Zarubin O.A. Geoinformation support of organization of harmonious interaction of natural, social and production systems of the region. *Sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Teoriya i praktika garmonizatsii vzaimodeystviya prirodnykh, sotsialnykh i proizvodstvennykh sistem regiona"* [Proceed-



практ. конф., 12-13 окт. 2017 г., г. Саранск: в 2 ч. / редкол.: С.М. Вдовин [и др.]. – Саранск, 2017. – Т. 1. – С. 50–58.

2. Долгачева, Т.А. Оценка комфортности проживания населения в городе: на примере г. Саранска: дис. ... канд. геогр. наук / Т.А. Долгачева. – Калуга, 2006. – 174 с.

3. Об утверждении Генерального плана городского округа Саранск: решение Совета депутатов городского округа Саранск от 23 апреля 2014 г. № 333: принято Советом депутатов городского округа Саранск // Информационный бюллетень Совета депутатов и Администрации г.о. Саранск. – 2014. – 25 апр. (№ 8).

4. Основы геоинформатики: в 2 кн. / Е.Г. Капралов, А.В. Кошкарёв, В.С. Тикунов [и др.]; под ред В. С. Тикунова. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – Кн.1. – 352 с.

5. Оценка численности постоянного населения на 1 января 2017 г. [Электронный ресурс]: Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Республике Мордовия. – Режим доступа: [http://mrd.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat\\_ts/mrd/ru/statistics/population/](http://mrd.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/mrd/ru/statistics/population/).

6. СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений (актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89). – Введ. 2017-07-01. – М.: Минстрой России, 2011. – 94 с.

ings of the International Scientific and Practical Conference, part 1]. Saransk, 2017, pp. 50-58. (In Russian)

2. Dolgacheva T.A. Assessment of the comfort of living in the city: the example of Saransk. Diss. Cand. Sci. (Geography). Kaluga. 2006. 174 p. (In Russian)

3. On the approval of the General Plan of the city district of Saransk: the decision of the Council of Deputies of the city district of Saransk of April 23, 2014, No. 333: adopted by the Council of Deputies of the city district of Saransk // Information Bulletin of the Council of Deputies and the Administration of the city district of Saransk. – 2014. – 25 April. (№ 8) (In Russian)

4. Kapralov E.G., Koshkarev A.V., Tikunov V.S., Zavarzin A.V., Lurie I.K., Rylsky I.A., Trofimov A.M., Fleis M.E., Yarovoy V.B. *Osnovy geoinformatiki: v 2 kn.* [Fundamentals of geoinformatics: a textbook for high schools: in 2 books]. Moscow, Publishing center "Academy", 2004. 352 p. (In Russian)

5. Ocenka chislennosti postoyannogo naseleniya na 1 yanvary 2017 g. Estimate of the number of permanent residents as of January 1, 2017). Available at: [http://mrd.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat\\_ts/mrd/ru/statistics/population/](http://mrd.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/mrd/ru/statistics/population/). (In Russian)

6. Set of rules 42.13330.2016. Town planning. Planning and development of urban and rural settlements (updated version of SNiP 2.07.01-89). Enter 2017-07-01. Moscow, Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, 2011. 94 p. (In Russian)

УДК (UDC) 691.32

STUDY ON COMPRESSIVE STRENGTH OF PLASTIC WASTE BITUMINOUS  
CONCRETE FOR ROAD CONSTRUCTION

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ БИТУМИНОЗНОГО БЕТОНА  
С ДОБАВКАМИ ПЛАСТМАССОВЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ДОРОЖНОГО  
СТРОИТЕЛЬСТВА

Anurag V. Tiwari<sup>1</sup>, Dr. Y R M Rao<sup>2</sup>  
Тивари А.В.<sup>1</sup>, Рао Дж.Р.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> - Sipna College of Engineering and Technology (Amravati (M.S), India)

<sup>2</sup> - Dr. Pauls Engineering College (Villupuram Dist (T.N), India)

**Аннотация.** Промышленность производства пластмассовых изделий за последние два десятилетия претерпела много важных изменений в результате более широкого использования пластмасс в различных отраслях экономики. Одним из наиболее используемых пластмассовых изделий являются тонкие полиэтиленовые пакеты, используемые для упаковки. Утилизация отходов полиэтиленовых пакетов в больших количествах представляет собой реальную экологическую проблему. Таким образом, переработка отходов в полезные продукты рассматривается как один из наиболее распространенных решений этой проблемы, поэтому исследования в области новых и инновационных видов использования отходов постоянно расширяются. В данной работе изучается прочность на сжатие битуминозного бетона с добавками пластиковых отходов для дорожного строительства. Пластиковые отходы добавлялись в битуминозный бетон в различном процентном соотношении и готовились образцы Маршалла. Эти образцы были испытаны на прочность при сжатии при 25°C и 60°C. Прочность образца на сжатие значительно возрастает - до 8%, 6% и 12% для сухого процесса, мокрого процесса и комбинированного процесса соответственно для отходов пластмасс типа ПЭНД и ПЭВД.

**Ключевые слова:** дорожное строительство, битуминозный бетон, пластиковые отходы, прочность на сжатие.

**Дата принятия к публикации:** 24.08.2018  
**Дата публикации:** 25.09.2018

**Сведения об авторах:**

**Тивари, Анураг Вирендра** – доцент кафедры «Гражданское строительство» Колледжа техники и технологии Sipna (г. Амравати, штат Махараштра, Индия), [anuragearth@gmail.com](mailto:anuragearth@gmail.com).

**Рао Дж.Р.М.** – директор Инженерного колледжа д-ра Паулса (г. Виллупурам, штат Тамилнад, Индия), [dryrmrao@rediffmail.com](mailto:dryrmrao@rediffmail.com).

**Abstract.** Plastics industry have many major developments in the last two decades resulted from the increased utilization of plastics in various sectors. One of the most common used plastics is the thin plastic bags which used usually for packaging. However the disposal of the waste plastic bags in large quantities constitutes a real environmental problem. Hence, recycling waste into useful products is considered one of the most sustainable solutions to this crisis so that research into new and innovative uses of waste materials is continuously advancing. This paper studies the Compressive Strength of Plastic Waste Bituminous Concrete for Road Construction. The plastic waste was added to the bituminous concrete in increasing percentage and Marshall Samples were prepared. These samples were tested for compressive strength at 25°C and 60°C i.e unconditioned and conditioned samples. It is observed that the compressive strength of sample significantly increases up to 8%, 6% and 12% for dry process, wet process and combined process respectively for LDPE and HDPE type of waste plastic.

**Keywords:** road construction, bituminous concrete, plastic waste, compressive strength

**Date of acceptance for publication:** 24.08.2018  
**Date of publication:** 25.09.2018

**Authors' information:**

**Anurag V. Tiwari** - Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sipna College of Engineering and Technology, Amravati (M.S), India, [anuragearth@gmail.com](mailto:anuragearth@gmail.com).

**Dr. Y R M Rao** - Principal, Dr. Pauls Engineering College, Villupuram Dist (T.N), India, [dryrmrao@rediffmail.com](mailto:dryrmrao@rediffmail.com).



## 1. Introduction.

In the recent years rapid industrialization and large scale infrastructural development in India, has resulted in huge scarcity of construction materials and tremendous increase in the generation of waste products. Disposal of the waste products is a big challenge for the environmental engineers. Plastic waste is the most unwanted land waste all over the World. Some of these materials are non-biodegradable and often leads to waste disposal crisis and environmental pollution [1]. Use of this non-biodegradable (according to recent studies, plastics can stay as long as 4500 years on Earth) product is growing rapidly, and the problem is what to do with plastic-waste [2]. Scientists and engineers are constantly searching on different methods to improve the performance of asphalt pavements. Considerable research has been carried out to determine the suitability of plastic waste modifier in construction of bituminous mixes [3].

## 2. Literature Review.

Dr. Hamed M. Jassim and et.al (2014) studied optimum use of plastic waste to enhance the marshall properties and moisture resistance of hot mix asphalt. The plastic waste derived from the different types and sizes of bottles can be utilized to modify the asphalt mixture performance if added to aggregate with a specific (size, thickness and content). On the basis of experimental results, it was concluded that adding plastic waste with fine particles size, thin thickness and at 15% by weight of total aggregate resulted in improving the Marshall stability and resistance to water damage, as well as they can contribute to relieve some of the environmental problems caused by classical plastic waste disposal means. The use of recycled plastic, in the manufacturing of hot asphalt mixture indicated to reduced permanent deformation in the form of rutting and reduced low-temperature cracking of the pavement surfacing. The field tests withstood the stress and proved that plastic wastes used after proper processing as an additive would enhance the life of the roads and also solve environmental problems.

Faris M. J. Najjar (2014) studied the effect of using dust on HMA properties. This paper presents a laboratory investigation about the effects of crushed boulders dust compared to ref-

erence filler (limestone dust) on some properties of HMA mixture. The experimental work in this study provides a comparison among two filler types here we used dust of crushed boulders, and Limestone as fillers. Marshall Specimens are used to determine the Index of retained strength, compressive strength, stability, plastic flow, and indirect tensile strength. These specimens are prepared in accordance with the requirements of ASTM D-1559 (Specimen dimensions, D=100.16, H=63.5 mm). The Hot Mixes Asphalt (HMA) has been prepared with equivalent design criteria. The use of crushed boulder dust over limestone dust gives more marshall stiffness value, increases the resistance to moisture damage by 135% than that of lime stone dust mix. Crushed dust gives highest compressive test than the mixture of crushed dust and limestone dust and has higher indirect tensile stiffening values and is more beneficial economically and easy to produce and handle.

Bulgis and et.al. (2017) studied effect of Bunt Granular Asphalt (BGA) on compressive stress-strain behavior of asphalt emulsion mixture. The purpose of this study is to replace the petroleum bitumen with local materials such as natural rock asphalt. BGA used has a relatively uniform grain size with a maximum size of 1.18 mm. Utilization of bitumen emulsion in production of cold mix asphalt mixture is an effective technology for decreasing the energy consumption. Test results revealed that utilizing 2.5% BGA in asphalt emulsion mixture gives improved compressive strength. Furthermore, mixture with BGA has less crack number as compared with the mixture without BGA. Hence, extracted bitumen of BGA can be combined with petroleum bitumen within cold asphalt mixture to create higher binding capacity as compared to cold asphalt mixture without BGA.

Bindu and et.al (2015) studied Influence of natural fibres on the compressive strength of Stone Matrix Asphalt mixtures. This paper focuses on the influence of additives like coir, sisal, banana fibres (natural fibres), on the compressive strength of SMA mixtures. Compressive strength tests are conducted to study the resistance to crushing to withstand the stresses due to traffic loads. SMA is a gap graded bituminous mixture containing a high proportion of

coarse aggregates of sizes 20mm, 10mm and stone dust and filler with relatively less medium sized aggregates. Additives enhance the resistance to moisture susceptibility of the mixture. Presence of additives strengthen the bonding between the aggregates provided by the binder and thereby enhancing the stone to stone contact which will result in increasing the resistance to crushing. This gives rise to a stiffer and tougher mix with considerable improvement in compressive strength.

Firdus Chairuddin and et.al (2016) studied the Compressive Strength of Permeable Asphalt Pavement Using Domato Stone (Quartzite Dolomite) and Buton Natural Asphalt (BNA) Blend.

Buton Natural Asphalt (BNA) blend is a type of modification asphalt which is made of 75% Petroleum asphalt 60/70 and 25% rock asphalt Buton Natural extraction. The unconfined compressive test result of porous asphalt containing domato stone showed that the mixture with 4% BNA has compressive strength value 2.4 MPa. This work is a part of various extensive investigation projects on the development of liquid Asbuton as bituminous asphalt binder and the suitability of domato stone as coarse aggregate in the permeable asphalt production. The results of porosity test, permeability test, stability test, flow test, indirect tensile test and material loss test (Cantabro test) showed the bonding strength between BNA blend and domato stones can be established and thus enhance the resistance of porous asphalt against raveling, rutting and shoving.

Agrawal H. S. and et.al (2017) studied the utilisation of plastic waste in flexible pavement design. Plastic which seems to be a cheaper and effective raw material on the other hand is very hazardous to the environment because of its non-degradable nature. Therefore it becomes essential to utilize waste effectively with technical innovations. Plastic can be utilized as a partial blending material in design of flexible pavement and also as a partial replacement in bitumen as well as coating over aggregate. Addition of plastic in bitumen improves the stability, strength, life and other desirable properties of bitumen utilization of waste plastic in the construction of pavement has shown better re-

sistance to water which reduces the stripping of bitumen from aggregate and also made investigations over the use of waste plastic in road construction as an effective way to reutilize the plastic waste. According to various tests conducted, plastic as a 10% replacement in bitumen can give better result in flexible pavement design. Addition of plastic shows increase in compressive strength, tensile strength and stability value which is useful to sustain large load

Mustafa Tuncan and et.al (2003) studied the use of waste materials in asphalt concrete mixtures. The use of industrial wastes as additives in asphalt mixtures is the key concept of this experiment. Industrial wastes such as plastic, rubber, fly ash, marble powder and petroleum contaminated soil (PCS) were used as filler materials to prepare asphalt concrete mixtures. They are incorporated in asphalt mixtures to enhance the properties and performance of asphalt concrete pavements. Addition of crumb rubber to hot-mix asphalt concrete was observed to improve rheological properties of the asphalt such as viscosity, softening point, penetration, temperature susceptibility, strength and durability. Pavements made of rubber and plastic modified asphalt concrete have better skid resistance, less cracking and a longer pavement life in comparison to conventional asphalt pavements.

Abdul Gaus and et.al (2015) studied the compressive strength of asphalt concrete binder course mixture using buton granular asphalt (BGA). This study aims to evaluate the compressive stress-strain relationship of asphalt concrete mixtures using Buton granular asphalt (BGA) as partial replacement for petroleum asphalt in asphalt concrete bearing course (AC-BC) mixture production. Buton granular asphalt (BGA) is produced by crushing the natural rock asphalt to the maximum size of 1.16 mm which is homogenized. Asphalt concrete bearing course (AC-BC) is designed for a layer that can bear the traffic load. BGA alone is not enough for the purpose of mixing to have proper asphalt mixture therefore BGA have to be used with petroleum bitumen. The application of BGA as partially replaced petroleum asphalt in the (AC-BC) mixture improved the compressive strength and elastic modulus in comparison to (AC-BC) mixture without BGA.



A.V. Tiwari et. al (2017) stated that waste plastic is accumulated all over the world causing serious environmental problems. They study the addition of plastic waste in bituminous concrete using dry process of mixing for road construction. The study evaluates the addition of shredded waste plastic in the bituminous concrete which results in significant increase in the stability value and Marshall Properties of mix. The study reveals that the use of waste plastic in bituminous concrete is safe and sustainable for road construction. The experiment was conducted into two phases. The first phase consists of calculating the optimum value of the bitumen and second phase consists of optimizing the quantity of plastic waste used to replace the bitumen. Dry process was used to prepare Marshall Samples. In this process the coarse aggregates and fine aggregate and fly ash were heated to 170°C. The shredded plastic waste retaining on 2.36 mm sieve is added in proportion by weight to the hot aggregate. The waste plastic LDPE, PVC and HDPE was added varying from 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10% and 12% by the weight of bitumen. This plastic gets coated over the aggregate uniformly. Immediately the hot Bitumen at 160°C is added to the mixture. After proper mixing the mix was placed in the compaction mould and compacted with 75 blows on both face to get Marshall Samples. The stability and flow were obtained by testing the sample on the digital Marshall frame and the average values for Bulk specific Gravity, AV, VMA and VFB were calculated and graphs were plotted. The values obtained stability values are corrected after applying the correction for thickness of the sample. From the study it can be concluded that addition of plastic improves the Marshall properties of the mix. The Addition of 8% of the LDPE and HDPE plastic waste improves the stability value of the bituminous mix which results is the increase in the toughness of the mix. The roads can withstand heavy traffic and shows better service life.

According to A.V Tiwari et. al (2017) the major portion of highway in India is flexible. Recent research suggests that these plastic materials can be used in road construction as a binding material. Polyethylene is extensively used plastic material, and it has been found to be one

of the most effective polymer additives in road construction. From the investigation on utility of plastic waste as an additive for bituminous concrete using wet process of mixing it can be concluded that addition of plastic improves the Marshall properties of the mix. The Addition of 6% of the LDPE and HDPE plastic waste improves the stability value of the bituminous mix which results is the increase in the toughness of the mix. The roads can withstand heavy traffic and shows better service life. Due to addition of plastic waste the flow value increases resulting the improvement in the workability. Addition of plastic waste results in decrease in the air voids which reduces the bleeding of bitumen. The volumetric and Marshall properties of the mix show the acceptable trends and could satisfy the specified limits.

### **3. Materials and Methods.**

Various materials used in the present study are bitumen, aggregate (fine and coarse), filler, and shredded plastic waste. The bitumen used for present study is of 60/70 penetration grade and is obtained from BPCL, Nagpur and PWD, Amravati. Coarse aggregates, fine aggregates and fly ash were collected from local producer of crushed aggregates. The plastic waste was segregated from the municipal waste and shredded at the local plastic waste recycling plant at MIDC, Amravati. Table 1 and Table 2 shows the physical properties of the aggregates and bitumen respectively.

Sieve analysis test was used to determine the aggregate sizes. Through this sieve test, the proportion of coarse aggregates, fines aggregate and filler was determined and ensuring the aggregate were well blended within the gradation limit as specified in MORTH shown in Table 3.

The experiment was conducted using three different processes of mixing waste plastic into bituminous concrete viz. Dry process, wet process and combined process. In Dry process the coarse aggregates and fine aggregate and fly ash were heated to 170°C. The shredded plastic waste retaining on 2.36 mm sieve is added in proportion by weight to the hot aggregate. The waste plastic LDPE, PVC and HDPE was added varying from 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10% and 12% by the weight of bitumen. This plastic gets coated over the aggregate uniformly. Immedia-



Table 1

Physical Properties of Coarse Aggregates

Sr. no	Parameter	No. of tests Performed	Test Result	Specification Requirement	Standard
1	Impact value	3	22.40%	Max 30%	IS : 2386 (Part IV) - 1963
2	Abrasion value	3	28.10%	Max 40%	IS : 2386 (Part IV) – 1963
3	Crushing value	3	24.30%	Max 30%	IS : 2386 (Part IV) – 1963
4	Combined Elongation index and Flakiness index	3	17.20%	Max 30%	IS : 2386 (Part I) – 1963
5	Specific gravity	6	20 mm: 2.830 kg/m <sup>3</sup> 10 mm: 2.792 kg/m <sup>3</sup>	-	IS : 2386 (Part IV) – 1963
6	Water Absorption	3	0.1%	Max 2%	IS: 2386 (Part III)-1963

Table 2

Physical Properties of Bitumen

Sr. no	Parameter	Test Result	Specification Requirement	Standard
1	Penetration	68	65-90	IS : 1203-1978
2	Softening point	53°C	40-60°C	IS : 1205-1978
3	Specific Gravity	1.01 kg/m <sup>3</sup>	Min 0.99 kg/m <sup>3</sup>	IS : 1202:1978
4	Ductility	87 mm	Min 75 mm	IS : 1208-1978

Table 3

Gradation of Aggregates

Sieve Size (mm)	Percentage Passing of Aggregates					MORTH Specification limit	
	20mm	10mm	Stone Dust	Filler	Com-bined	Maximum	Minimum
37.5	100	100	100	100	100		100
26.5	100	100	100	100	100	100	90
19	62	100	100	100	89	95	71
13.2	18	96	100	100	74	80	56
4.75	0	54	92	100	52	54	38
2.36	0	14	76	100	33	42	28
0.3	0	5	23	100	14	21	7
0.075	0	2	7	92	7	8	2
Proportion Percentage	30	35	30	5	100		

tely the hot Bitumen at 160°C is added to the mixture. Similarly in wet process the coarse aggregates and fine aggregate and fly ash were heated to 170°C. The shredded plastic waste retaining on 2.36 mm sieve is added in proportion by weight to the hot bitumen which was immediately added to the mixture at 160°C. In case of combined process certain percentage of waste plastic LDPE, PVC and HDPE was added varying from 6%, 8%, and 10% using dry proc-

ess and 4%, 6% and 8% using wet process to prepare sample of combined process. After proper mixing the mix was placed in the compaction mould and compacted with 75 blows on both face to get Marshall Samples. Three samples were prepared for each proportion and average was calculated. During the experiment PVC type of plastic waste was also used but while spreading the shredded PVC plastic on heated aggregate some gases were coming out

of the mix and hence PVC plastic was not used for further experiment. Test specimens were

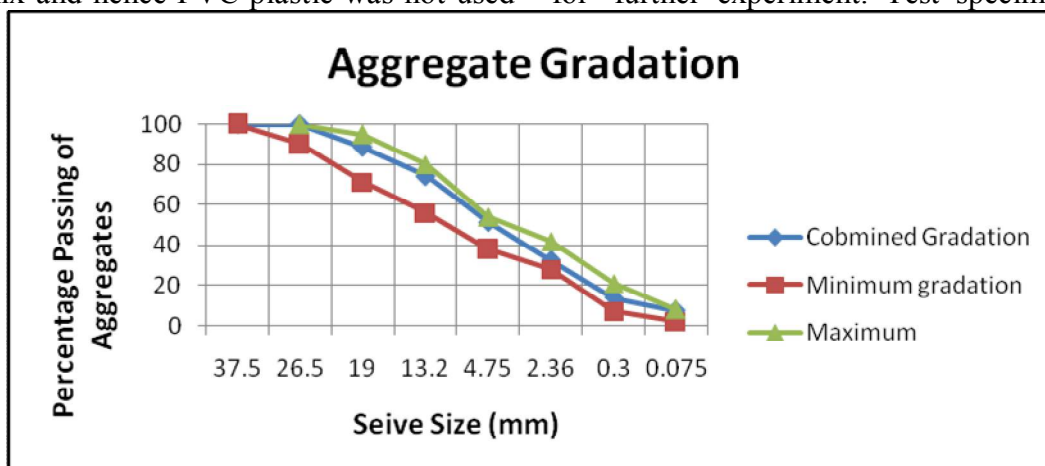


Fig 1. Aggregate Gradation

subjected to axial compression at a uniform vertical deformation rate of 3.2 mm/min. The compressive strength is determined by dividing the maximum vertical load obtained during deformation at the rate specified by the original cross sectional area of the test specimen (ASTM D 1074–09):

$$\text{Compressive Strength} = \text{Peak Load} / \text{Area.}$$

The compressive strength is reported as the average of three specimens in each case. In order to know the temperature effect on the compressive strength of mixtures, the tests was carried out at two different temperatures 25°C and 60°C. In order to investigate the effect of water on the compressive strength of mixtures with different additives, the index of retained strength is determined. This value is an indicator of their resistance to moisture susceptibility. The test was conducted at a temperature of 25°C i.e unconditioned and the load at which the specimen fails is taken as the dry strength of the bituminous mix. Conditioned specimens are prepared by placing the samples in a water bath maintained at 60°C for 24 hours and after that keeping the samples at 25°C for two hours. These conditioned specimens are then tested for their strength. The ratio of the compressive strength of the water conditioned specimens to that of dry specimens are taken as the index of retained strength. The indices of retained strength for different mixtures with different type and varying percentage of additives are determined.

#### 4. Results.

The variation of the compressive strength with increasing percentage of additive content for the two different temperatures, viz. 25°C and 60°C for each additive are shown in Table below. All stabilized mixtures shows higher compressive strength than the control mixture. This may be due to the increase in stiffness of the mix. Presence of plastic waste strengthens the bonding between the aggregates provided by the binder and thereby enhancing the stone to stone contact. This will result in increasing the resistance to crushing. It is also observed that the compressive strength decreases with the increase in temperature. But the percentage decrease in strength decreases with the increase in additive content up to a certain level.

It is observed that the compressive strength of sample significantly increases up to 8%, 6% and 12% for dry process, wet process and combined process respectively for LDPE and HDPE type of waste plastic.

Compressive strength values for unconditioned sample increased by 68.91%, 40.37% and 66.95% for the mix of 8%, 6% and 12% LDPE plastic using dry process, wet process and combined process respectively as compared to the compressive strength value of conventional mix. Compressive strength values for conditioned sample increased by 60.45%, 40.30% and 71.94% for the mix of 8%, 6% and 12% LDPE plastic using dry process, wet process and com-

combined process respectively as compared to the compressive strength value of conventional mix.

Similarly Compressive strength values for unconditioned sample increased by 69.79%, 40.71% and 64.12% for the mix of 8%, 6% and 12% HDPE plastic using dry process, wet process and combined process respectively as compared to the Compressive strength value of

conventional mix. Compressive strength values for conditioned sample increased by 60.34%, 39.98% and 70.31% for the mix of 8%, 6% and 12% HDPE plastic using dry process, wet process and combined process respectively as compared to the Compressive strength value of conventional mix.

Table 4

Results for Dry and Wet Process

Plastic waste content %	Plastic Waste	Dry Process				Wet Process			
		Peak load (KN)		Maximum Compressive strength (N/mm <sup>2</sup> )		Peak load (KN)		Maximum Compressive strength (N/mm <sup>2</sup> )	
		25°C	60°C	25°C	60°C	25°C	60°C	25°C	60°C
0		34.10	30.77	4.2082	3.7968	34.10	30.77	4.2082	3.7968
2	LDPE	42.33	38.30	5.2243	4.7265	34.00	30.30	4.1959	3.7393
4	LDPE	43.63	41.10	5.3847	5.0721	38.37	35.97	4.7347	4.4386
6	LDPE	48.00	46.10	5.9236	5.6891	<b>47.87</b>	<b>43.17</b>	<b>5.9071</b>	<b>5.3271</b>
<b>8</b>	<b>LDPE</b>	<b>57.60</b>	<b>49.37</b>	<b>7.1083</b>	<b>6.0922</b>	46.27	42.63	5.7097	5.2613
10	LDPE	52.50	47.67	6.4789	5.8824	43.73	39.53	5.3970	4.8787
12	LDPE	48.30	45.47	5.9606	5.6109	38.33	34.50	4.7306	4.2576
2	HDPE	43.93	40.77	5.4217	5.0309	34.37	33.07	4.2411	4.0807
4	HDPE	44.33	40.90	5.4711	5.0474	38.83	35.77	4.7923	4.4139
6	HDPE	48.53	46.23	5.9894	5.7056	<b>47.80</b>	<b>43.07</b>	<b>5.8989</b>	<b>5.3148</b>
<b>8</b>	<b>HDPE</b>	<b>57.90</b>	<b>49.33</b>	<b>7.1453</b>	<b>6.0881</b>	43.43	42.90	5.3600	5.2942
10	HDPE	52.77	48.67	6.5118	6.0059	43.20	38.60	5.3312	4.7635
12	HDPE	48.17	44.57	5.9441	5.4999	38.60	34.17	4.7635	4.2164

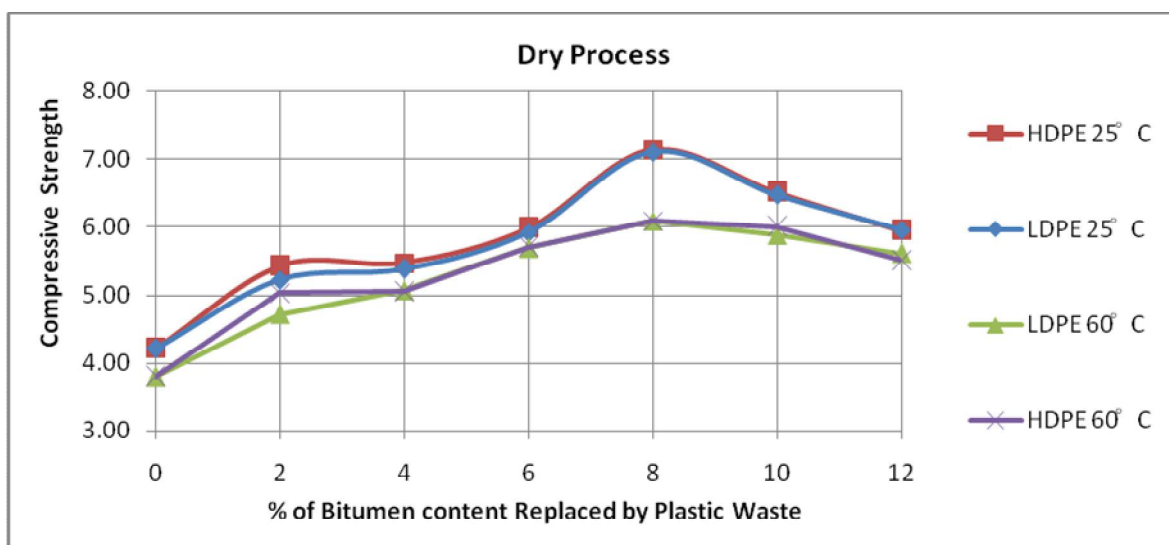


Fig 2. Graph for Dry Process

Table 5

Results for Combined Process

Combined Process						
			Peak load (kN)		Maximum Compressive strength (N/mm <sup>2</sup> )	
Type of Plastic Waste	Dry Process	Wet Process	25°C	60°C	25°C	60°C
	0		34.10	30.77	4.2082	3.7968
LDPE	6	4	40.20	34.77	4.9610	4.2905
LDPE	6	6	47.77	43.67	5.8948	5.3888
LDPE	<b>8</b>	<b>4</b>	<b>56.93</b>	<b>52.90</b>	<b>7.0260</b>	<b>6.5283</b>
LDPE	8	6	53.97	51.83	6.6599	6.3966
LDPE	8	8	50.83	47.67	6.2732	5.8824
LDPE	10	6	47.13	45.43	5.8166	5.6068
LDPE	10	8	47.13	44.10	5.8166	5.4423
HDPE	6	4	41.97	41.03	5.1790	5.0638
HDPE	6	6	47.97	43.90	5.9195	5.4176
<b>HDPE</b>	<b>8</b>	<b>4</b>	<b>55.97</b>	<b>52.40</b>	<b>6.9067</b>	<b>6.4666</b>
HDPE	8	6	53.57	51.20	6.6105	6.3185
HDPE	8	8	51.27	46.63	6.3267	5.7549
HDPE	10	6	49.03	45.40	6.0511	5.6027
HDPE	10	8	47.40	44.37	5.8495	5.4752

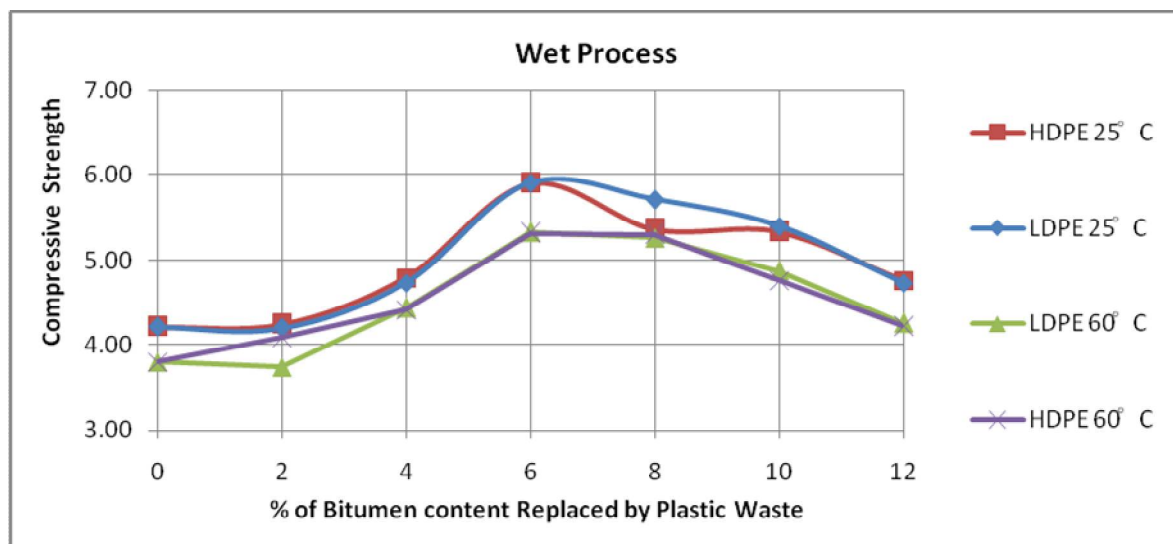


Fig 3. Graph for Wet Process

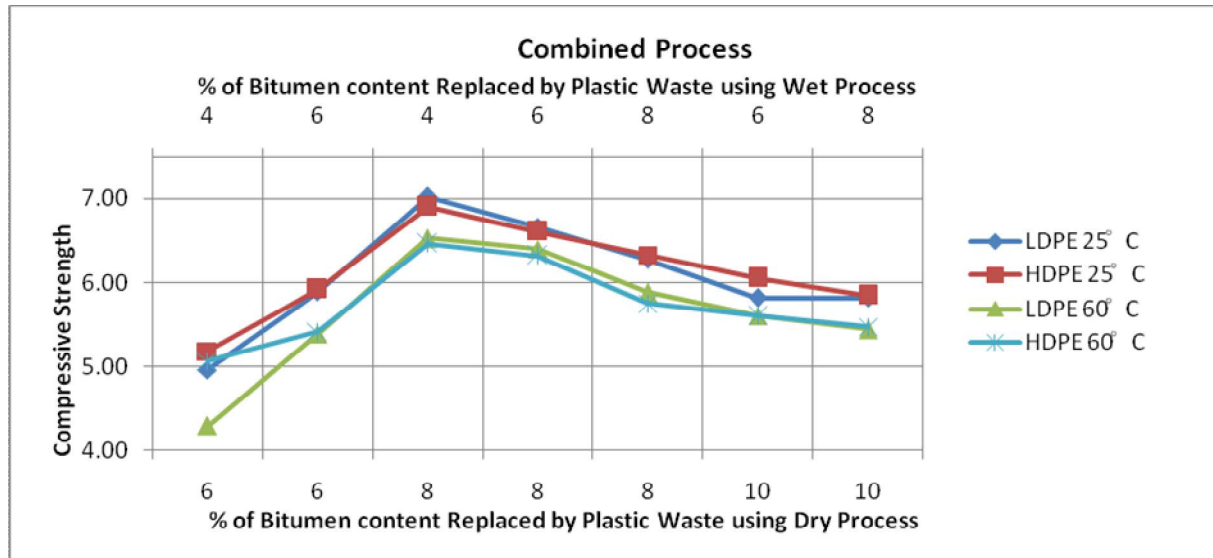


Fig 4. Graph for Combined Process

## 5. Conclusion

- On addition of plastic waste into the mix increase in the compressive strength of bituminous concrete was observed help to increase the load carrying capacity of road pavement.
- The plastic increases the melting point of bitumen hence the bonding between plastic and bitumen increase the overall compressive strength of pavement.
- The heavy loaded vehicles passing through the road due to use of plastic the resistance to crushing dose not effects the roads pavements.
- Due to use of waste plastic the environmental pollution is reduce.

## References

1. Gupta Dr. Y.P., Shailendra Tiwari, Pandey J.K. Utilisation of Plastic Waste in Construction of Bituminous Roads. *NBM & CW*, 2010, March, p. 92.
2. Bale Amol S. Potential reuse of plastic waste in road construction: a review. *International Journal of Advances in Engineering & Technology (IJAET)*, 2011, No. 2, pp. 233-236.
3. Bindu C.S., Beena K.S. Waste plastic as a stabilizing additive in Stone Mastic Asphalt. *International Journal of Engineering and Technology*, 2010, 2.6, pp.379-387.
4. Jassim Hamed M., Omar T. Mahmood, Sheelan A. Ahmed. Optimum use of plastic waste to enhance the Marshall properties and moisture resistance of hot mix asphalt. *International Journal Engineering. Trends and Technology*, 2014, No. 7, pp. 18-25.
5. Najjar Faris MJ. The Effect of Using Dust of Crushed Boulders on Hma Properties. *Kirkuk University Journal for Scientific Studies*, 2014, 9.1, pp. 46-58.
6. Tjaronge M.W., Adisasmitta S.A., Hustim M. Effect of Buton Granular Asphalt (BGA) on compressive stress-strain behavior of asphalt emulsion mixture. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, Vol. 271, No. 1.
7. Bindu C.S., Beena K.S. *Influence of additives on the characteristics of stone matrix asphalt* (Doctoral dissertation, Cochin University of Science and Technology). 2012.
8. Agrawal H.S., Dr. Borkar R.P. Utilization of plastic waste in construction of pavement. *International Journal of Innovative Research in Science and Engineering*, 2017, No.3, Issue 03.
9. Tuncan Mustafa, Ahmet Tuncan, Altan Cetin. The use of waste materials in asphalt concrete mixtures. *Waste Management & Research*, 2003, 21.2, pp. 83-92.
10. Gaus Abdul, et al. Compressive strength of asphalt concrete binder course (AC-BC) mixture using buton granular asphalt (BGA). *Procedia Engineering*, 2015, 125, pp. 657-662.
11. Tiwari Anurag V., Rao Y.R.M. Study of Plastic Waste Bituminous Concrete Using Dry



Process of Mixing for Road Construction. *Transport & Logistics*, 2017, pp. 17-43.

12. Tiwari Anurag V., Rao Y.R.M. Investigation on Utility of Plastic Waste as an Additive for Bituminous Concrete Using Wet Process of Mixing. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2017, 6 (72), pp. 83-92.

13. IS 2386 (Part I) - 1963 Indian Standard. Methods of Test For Aggregates for Concrete - Part I Particle Size And Shape.

14. IS 2386-3 - 1963 Methods Of Test For Aggregates For Concrete - Part III Specific Gravity, Density, Voids, Absorption And Bulking.

15. IS 2386 (Part IV) - 1963 Indian Standard. Methods of Test for Aggregates for Concrete. Part IV Mechanical Properties.

16. IS 1203: 1978 Methods of testing tar and bituminous material - Determination of penetration.

17. IS 1205: 1978 Methods for testing tar and bituminous materials - Determination of Softening point.

18. IS 1202: 1978 Methods of testing tar and bituminous materials - Determination of specific gravity.

19. IS 1208: 1978 Methods of testing tar and bituminous material - Determination of ductility.

20. ASTM D 6931 (2007), Indirect Tensile (IDT) Strength for Bituminous Mixtures, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

УДК 692.232

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ  
ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НАРУЖНОГО ОГРАЖДЕНИЯ ЗДАНИЙ  
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

MODELING OF THE PROCESS OF FORMATION OF THE TEMPERATURE FIELD OF  
THE OUTER FENCE OF THE BUILDINGS IN RAILWAY TRANSPORT

Шаумаров С.С.  
Shaumarov S.S.

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (Ташкент, Узбекистан)  
Tashkent institute of railway engineers (Tashkent, Uzbekistan)

**Аннотация.** Рассмотрен вопрос повышения энергоэффективности объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта. Изучены особенности процесса формирования температурного поля на поверхности ограждения зданий железнодорожного транспорта. Получено математическое выражение температурного поля на поверхности ограждающих конструкций зданий как функции их износа. Предложен метод оценки степени снижения теплозащитных свойств наружных стен по характеру температурных полей на внутренней поверхности ограждающих конструкций зданий на железнодорожном транспорте.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, железнодорожный транспорт, температурный режим, микроклимат помещений, математическая модель, температурные поля, теплопроводность.

**Дата принятия к публикации:** 25.06.2018  
**Дата публикации:** 25.09.2018

**Сведения об авторе:**

**Шаумаров Саид Санатович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство зданий и промышленных сооружений» Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта (Узбекистан), [shoumarovss@gmail.com](mailto:shoumarovss@gmail.com)

**Введение.**

На балансе железнодорожной компании «Ўзбекистон темир йўллари» находится значительное количество зданий гражданского и промышленного назначения, расходы энергии которых на создание благоприятного микроклимата помещений существенно превышают нормативные показатели, и, следовательно, снижают эффективность работы отрасли в целом [14, 15]. Решение данной проблемы является достаточно сложным. С одной стороны, необходима реальная оценка ситуации, выявление действительных источ-

**Abstract.** Observed the question of energy efficiency of objects in rail transport infrastructure. Learned the distribution of processes of formation of the temperature field on the surface of the enclosure. Obtained the mathematical expression of the temperature field on the surface of the building envelope as a function of their wear. Suggested a method for evaluating the degree of reduction of heat-shielding properties of external walls of the nature of the temperature fields on the inner surface of the building envelope on the railways.

**Keywords:** energy efficiency, railway transport, temperature, indoor climate, mathematical model, temperature field, thermal conductivity.

**Date of acceptance for publication:** 25.06.2018  
**Date of publication:** 25.09.2018

**Author' information:**

**Said S. Shaumarov** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor of Department “Construction buildings and structures” at Tashkent institute of railway engineers (Uzbekistan), [shoumarovss@gmail.com](mailto:shoumarovss@gmail.com).

ников потерь тепла и его неэффективного расходования. С другой – требуются обоснованное принятие решений по повышению энергоэффективности объектов и разработка целесообразных экономически выгодных энергосберегающих мероприятий. Не стоит забывать и о том, что эти мероприятия необходимо грамотно осуществить технологически и в дальнейшем правильно эксплуатировать [4-5].

Тому, что существующая проблема не находит быстрого разрешения, есть много причин. Это и недостаточная заинтересован-



ность со стороны руководства железнодорожной компании, и желание на местах полностью скопировать мировой опыт решения отдельных задач (пусть даже и очень эффективный), не проведя сравнительного анализа схожести климатических, экономических и прочих условий страны-разработчика и внедряющего региона [11-13].

Для научной обоснованности принятия энергосберегающих решений необходимо строительство пилотных объектов, детальное исследование всех происходящих в них теплофизических процессов, экологическая оценка микроклимата помещений, исследование долговечности и безопасности применяемых материалов. Однако не следует забывать и о том, что проектирование зданий только по методу «проб и ошибок» будет являться «тормозом» для развития строительной науки и проектного дела, не позволит выявить оптимальные энергосберегающие и, одновременно, экологические решения [2, 10, 17].

Проведя ряд обследований наружных стен эксплуатируемых зданий железнодорожного транспорта, нами было установлено наличие многочисленных дефектов в ограждающих конструкциях – от мелких сколов до нарушений сплошности материала ограждений (трещин). Такого рода дефекты снижают теплозащитные свойства наружных стен, а, следовательно, ухудшают параметры внутренней среды помещений и требуют повышенного расхода тепла на поддержание благоприятного микроклимата [6, 7, 16].

#### **Моделирование формирования температурного поля на поверхности ограждения с фильтруемой трещиной.**

Для осуществления мониторинга технического состояния эксплуатируемых зданий, с точки зрения их соответствия современным требованиям тепловой защиты, в первую очередь необходим анализ формирования температурного поля наружных ограждающих конструкций, имеющих существенные нарушения сплошности структуры материала – сквозные трещины. Исследование данного процесса в натуральных условиях сопряжено со значительными трудностями в обеспечении «чистоты» проводимого экспери-

мента (изменение интенсивности облучения поверхностей солнечными лучами, суточный ход температуры, изменение направления и скорости ветра и т.п.). В связи с этим, для всестороннего изучения динамики температурного поля ограждения со сквозными трещинами целесообразно использовать математическое моделирование данного физического процесса.

Разработке этой математической модели и результатам выполненных на ее основе исследований посвящена настоящая статья.

В первоначальных исследованиях с использованием метода математического моделирования [9] нами были установлены особенности распределения температуры воздуха в сквозной трещине. Это дало возможность перейти к рассмотрению вопроса формирования температурного поля на поверхности ограждения, имеющего сквозную фильтруемую трещину - щель. При решении были приняты следующие допущения:

- на границах рассматриваемой области поддерживается заданным образом распределение температуры, являющейся функцией времени;

- по материалам ограждения теплота передается кондуктивным переносом;

- охлаждение (нагревание) поверхностей щели осуществляется в результате теплообмена с воздухом щели, температура  $T_{TP}$  которого определяется по выведенному ранее уравнению [9];

- рассматривается двумерная задача в координатной системе  $XU$  с началом координат, помещенным на наружной стороне ограждения (рис.1).

Уравнение, описывающее рассматриваемую задачу, относится к уравнению конвективной диффузии. В соответствии с поставленными условиями запишем его в виде двумерной задачи:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

$$\tau > 0, \quad 0 \leq x \leq \delta, \quad 0 \leq y < \infty,$$

где  $T = T(x, y, \tau)$  – температура, как функция плоских координат  $x, y$  и времени  $\tau$ .

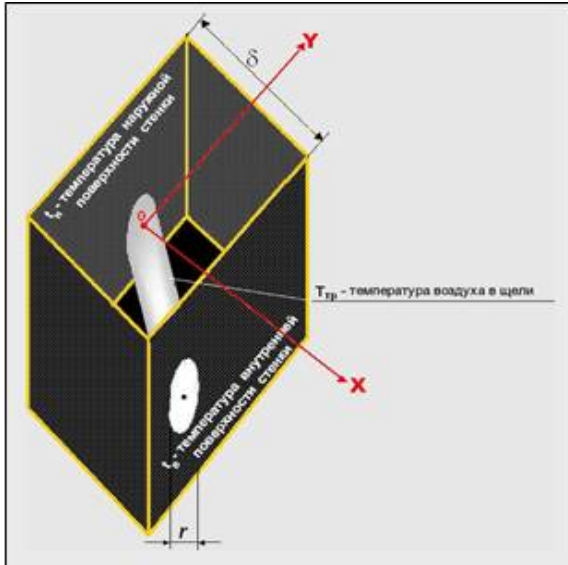


Рис.1. Схема сквозной щели, ее параметры и координатная привязка

По условию постановки задачи в начальный момент времени  $\tau_0$  распределение температуры задано известной функцией

$$T(x, y, 0) = t_n + \xi \Delta t = \Phi, \quad (2)$$

где  $\xi$  – безразмерный коэффициент термического сопротивления, равный отношению термического сопротивления слоя  $R$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ , к термическому сопротивлению ограждения  $R_0$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ;  $\Delta t = t_b - t_n$ ;  $t_b$  – температура внутреннего воздуха, К;  $t_n$  – температура наружного воздуха, К.

На основании перечисленных выше условий постановки задачи и в соответствии с тремя существующими возможными граничными условиями для диффузионных задач [3] запишем для уравнения (1) граничные условия первого рода в виде:

$$\begin{cases} y = 0 \rightarrow T = T_{\text{тр}}; \\ x = 0 \rightarrow T = t_n; \\ x = \delta \rightarrow T = t_b. \end{cases} \quad (3)$$

Для решения данного уравнения нами использован метод интегрального преобразования: Лапласа [3] - по временной координате, Фурье - по пространственной координате  $X$ .

Для замены независимой переменной  $x$  введем переменную  $z$ , определенную на промежутке  $[0, \pi]$ :

$$z = \frac{\pi x}{\delta}, \quad z = \overline{0, \pi}. \quad (4)$$

Прямое и обратное Фурье синус-преобразования записываются, соответственно, в виде [3]:

- прямое преобразование

$$F_s(n) = \int_0^{\pi} f(z) \sin(nz) dz, \quad (5)$$

- обратное преобразование

$$f(z) = \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sin(nz) F_s(n). \quad (6)$$

Запишем выражение (1) с учетом выражения (4):

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\pi}{\delta} \right)^2 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (7)$$

$$\tau > 0, \quad 0 \leq z \leq \pi, \quad 0 \leq y < \infty.$$

К выражению (7) применим прямое преобразование (5) и получим:

$$F_s \left[ \frac{\partial T}{\partial \tau} \right] = F_s \left[ a \left( \frac{\pi}{\delta} \right)^2 \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + F_s \left[ a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right]. \quad (8)$$

Раскроем уравнение (8), выполнив соответствующие подстановки со взятием интегралов:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_s}{\partial \tau} = & -n\kappa \cos(nz) \cdot T \Big|_{z=0}^{z=\pi} + n\kappa \sin(nz) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0}^{z=\pi} - \\ & - \int_0^{\pi} n^2 \cdot \kappa \sin(nz) \cdot T dz + a \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\kappa = a \left( \frac{\pi}{\delta} \right)^2$ .

С учетом граничных условий ( $z=0 \rightarrow T = t_n$  и  $z = \pi \rightarrow T = t_b$ ), подставив пределы интегрирования в (9), получим:

$$\frac{\partial T_s}{\partial \tau} = -n\kappa(t_b - t_n) - n^2 \kappa T_s + a \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2}. \quad (10)$$

Теперь к выражению (10) применим преобразование Лапласа, разрешив его относительно  $T_s$ . Предварительно обозначим выражение преобразования Лапласа символом "L" - обозначение прямого преобразования Лапласа, а символ "L<sup>-1</sup>" - обратного преобразования Лапласа. Тогда

$$L\left[\frac{\partial T}{\partial \tau}\right] = ST_L - T_0. \quad (11)$$

Выражение (11) следует читать так: «искомая производная равна произведению изображения  $T_L$  на оператор  $S$  минус значение функции в начальный момент времени  $\tau_0$ », т.е.  $T_0 = \Phi$ . Тогда

$$L\left[\frac{\partial T}{\partial \tau}\right] = L\left[-n\kappa(t_g - t_n) - n^2\kappa T + a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right] \quad (12)$$

и с учетом выражения (11) получим

$$\frac{d^2 T_L}{dy^2} = \left[\frac{S}{a} + \frac{\kappa n^2}{a}\right] T_L - \frac{\Phi}{a} + \frac{n\kappa}{a}(t_g - t_n). \quad (13)$$

Как можно видеть, преобразование Лапласа для оригинала функции  $T$  переводит дифференциальное уравнение в частных производных (10) в обыкновенное дифференциальное уравнение (13) для изображения  $T_L$ . Очевидно, что обыкновенное дифференциальное уравнение получено вследствие того, что изображение  $T_L$  уже не зависит от времени  $\tau$ . Задача значительно упростилась, ибо мы теперь сразу можем записать общее решение уравнения (13) для изображения  $T_L$ , полученное, например, в [3]:

$$T_L(y, S) - \frac{\Phi - n\kappa(t_g - t_n)}{S + n^2\kappa} = \mathfrak{R}_1 \exp\left[\sqrt{\frac{S + n^2\kappa}{a}} y\right] + \mathfrak{R}_2 \exp\left[-\sqrt{\frac{S + n^2\kappa}{a}} y\right]. \quad (14)$$

Выполним анализ полученного решения (14) на границах заданной области. Для этого применим преобразование Лапласа к граничным условиям:

$$L\left[\frac{\partial T(\infty, \tau)}{\partial y}\right] = 0, \quad T_L(\infty, S) = 0, \quad (15)$$

$$L[T(0, \tau)] = L[T_{\text{тр}}], \quad T_L(0, S) = \frac{T_{\text{тр}}}{S + n^2 \cdot \kappa}. \quad (16)$$

Из условия (15) следует, что  $\mathfrak{R}_1 = 0$ , так как в (14) член при  $\mathfrak{R}_1$  неограниченно возрастает при  $y \rightarrow \infty$ .

Для определения  $\mathfrak{R}_2$  воспользуемся условием (16):

$$\frac{T_{\text{тр}}}{S + n^2\kappa} - \frac{\Phi - n\kappa(t_g - t_n)}{S + n^2 \cdot \kappa} = \mathfrak{R}_2 \exp\left[-\sqrt{\frac{S + n^2\kappa}{a}} \cdot y\right],$$

но с учетом того, что при  $y \rightarrow \infty$  член

$$\exp\left[-\sqrt{\frac{S + n^2\kappa}{a}} \cdot y\right] = 1,$$

получим

$$\mathfrak{R}_2 = \frac{T_{\text{тр}}}{S + n^2\kappa} - \frac{\Phi - n\kappa(t_g - t_n)}{S + n^2\kappa}. \quad (17)$$

Следующий шаг – это переход от полученного для изображения решения (14) к оригиналу. Для этого воспользуемся таблицей изображений функций [3]:

$$L^{-1}\left\{\frac{1}{S + \kappa n^2}\right\} = \exp(-\kappa n^2 \tau) \quad (18)$$

и

$$L^{-1}\left\{\frac{1}{S + \kappa n^2} \exp\left(-\sqrt{\frac{S + n^2\kappa}{a}} y\right)\right\} = 1 - \operatorname{erf} \frac{y}{2\sqrt{a\tau}} = \operatorname{erfc} \frac{y}{2\sqrt{a\tau}}, \quad (19)$$

где  $\operatorname{erf}(Z)$  (в нашем случае  $Z = \frac{y}{\sqrt{a\tau}}$ ) – интеграл вероятностей [1]

$$\operatorname{erf}(Z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\xi^2} d\xi, \quad (20)$$

а функция  $\operatorname{erfc}(Z) = 1 - \operatorname{erf}(Z)$  – дополнительная к интегралу вероятностей [1]

$$\operatorname{erfc}(Z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^\infty e^{-\xi^2} d\xi. \quad (21)$$

Таким образом, решение уравнения (9) запишется в виде:

$$T_s = (\Phi - n\kappa(t_g - t_n)) \exp(-n^2\kappa\tau) + (T_{\text{тр}} - \Phi + n\kappa(t_g - t_n)) \operatorname{erfc} \frac{y}{2\sqrt{a\tau}}, \quad (22)$$

И, наконец, подставляя исходные (первоначальные) переменные, получаем окончательно решение задачи в виде:



$$T = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \left[ \frac{n\pi x}{\delta} \right] \cdot \left( \Phi - na \frac{\pi^2}{\delta^2} (t_g - t_n) \right) \times \exp(-n^2 \pi^2 \frac{ar}{\delta^2}) + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \left[ \frac{n\pi x}{\delta} \right] \cdot \left( T_{тр} - \Phi + na \frac{\pi^2}{\delta^2} (t_g - t_n) \right) \times \operatorname{erfc} \frac{y}{2\sqrt{a\tau}}. \quad (23)$$

На основании выполненных исследований нами был разработан методологический подход к проблеме термообновления наружных стен эксплуатируемых зданий [14], основанный на получении объективных данных об остаточных теплозащитных свойствах ограждений, а также предложена методика оценки степени снижения теплозащитных свойств стеновых панелей по характеру температурных полей на внутренней поверхности ограждающих конструкций. Итогом явилась разработанная система комплексного мониторинга технического состояния наружных ограждений [7], позволяющая планомерно и корректно осуществлять контроль за изменением теплотехнических свойств ограждающих конструкций и управление технической эксплуатацией объектов железнодорожного транспорта.

Для автоматизации указанных расчетов была разработана расчётная программа [8] на базе пакета «Microsoft Developer Studio» на универсальном языке программирования «Fortran for Scientists and Engineers», которая позволяет значительно упростить оценку остаточных теплозащитных свойств ограждающих конструкций зданий на железнодорожном транспорте.

#### Расчет температурных полей на внутренней поверхности ограждения с фильтруемой трещиной.

При помощи расчётной программы [8] был выполнен комплекс расчётов стеновых панелей с фильтруемой трещиной. В качестве исходных данных были приняты следующие интервалы варьирования толщин стеновых панелей, геометрических размеров трещин и климатических параметров:

- толщина стеновой панели  $\delta = (300...400)$  мм;
- ширина трещины  $r = (0,001...0,0032)$  мм, длина трещины  $L = (0,20...0,80)$  м, угол наклона  $\varphi = (0-90)^\circ$ ;
- температура наружного воздуха  $t_n = -(10-19)^\circ\text{C}$ , температура внутреннего воздуха  $t_B = +(18-22)^\circ\text{C}$ , скорость ветра  $v = (2...5)$  м/с.

Схема расположения исследуемых точек, в которых выполнялись расчеты, приведена на рис. 2.

На рис. 3 представлены полученные в результате расчетов температурные поля и поля воздушных течений на внутренних поверхностях стеновых панелей. При этом в качестве исходных данных были приняты:

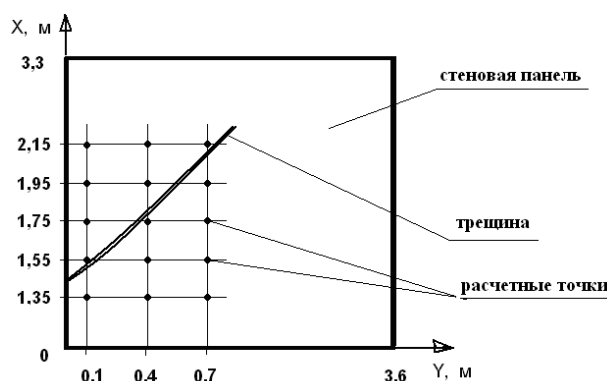


Рис.2. Расположение расчетных точек при определении температуры на внутренних поверхностях исследуемых панелей

- температура наружного воздуха  $t_n = -14^\circ\text{C}$ ;
- температура внутреннего воздуха  $t_B = +18^\circ\text{C}$ ;
- скорость ветра  $v = 4$  м/с.

Геометрические размеры фильтруемых трещин были приняты:

- для панели №1: ширина раскрытия трещины  $r = 0,0024$  м; длина трещины  $L = 0,63$  м; угол наклона трещины  $\varphi = 23^\circ$ ;
- для панели №2:  $r = 0,0027$  м;  $L = 0,86$  м;  $\varphi = 68^\circ$ ;
- для панели №3:  $r = 0,0031$  м;  $L = 0,58$  м;  $\varphi = 42^\circ$ .

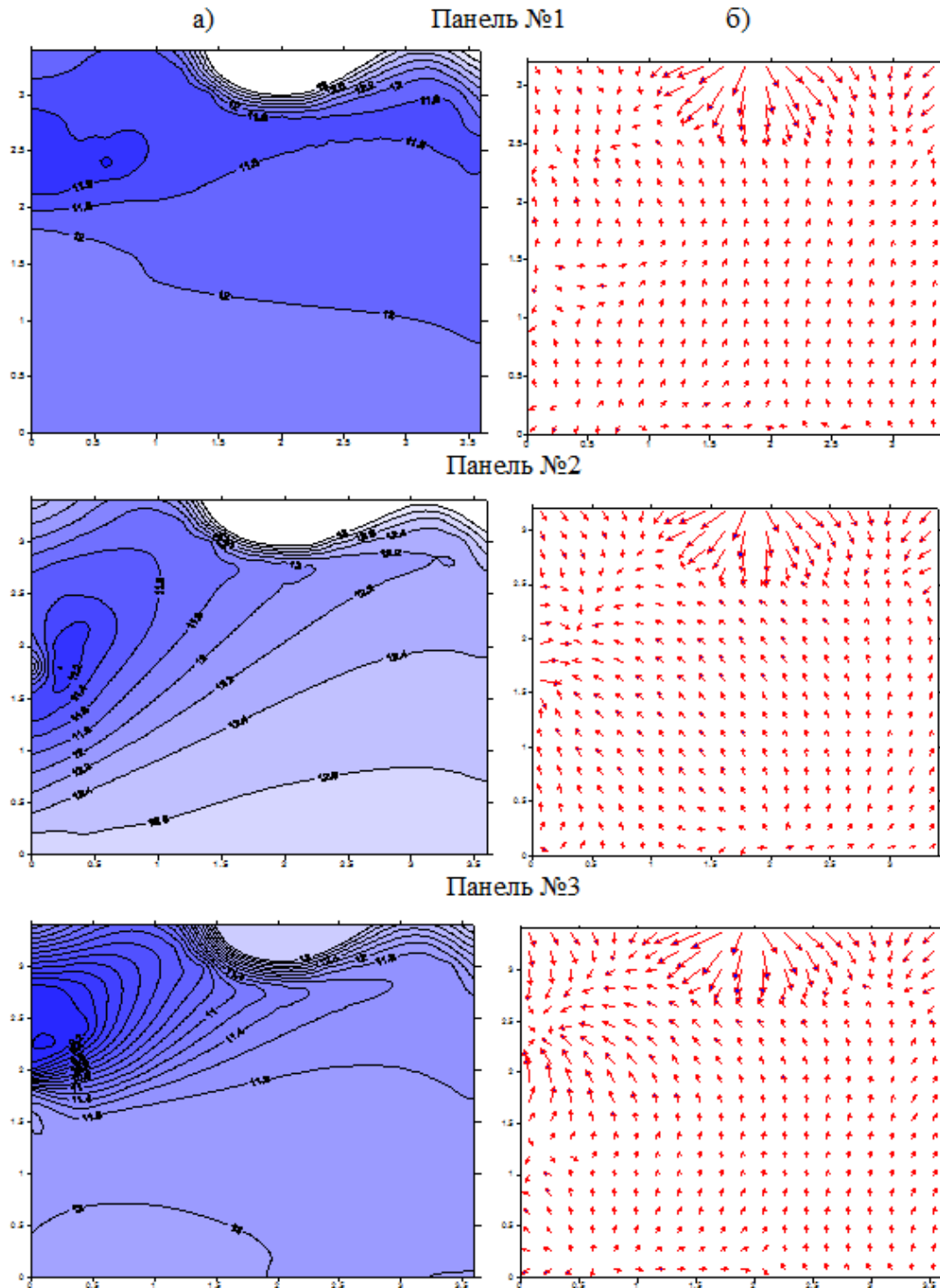


Рис.3. Температурные поля (а) и поля воздушных течений (б) для стеновых панелей с фильтруемой трещиной

Используя полученные в результате расчета температурные поля на внутренних поверхностях ограждений, можно определить:

а) зоны распространения пониженных температур на внутренней поверхности панели;

б) минимальную температуру на внутренней поверхности ограждения  $t_{в\ min}$ , °С;

в) величину максимального температурного перепада между температурой внутренней

него воздуха и внутренней поверхности ограждения  $\Delta t_{\max}$ , °C, по формуле (24):

$$\Delta t_{\max} = t_b - \tau_{b \min}; \quad (24)$$

г) фактическое сопротивление теплопередаче однослойной стеновой панели с фильтруемой трещиной  $R_{\phi}$ , (м<sup>2</sup> · °C)/Вт, по формуле (25):

$$R_{\phi} = \frac{t_e - t_n}{\alpha_b (t_e - t_{e \min})}, \quad (25)$$

где  $\alpha_b = 8,7$  Вт/(м<sup>2</sup> · °C) – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждения;  $\tau_{b \min}$  – минимальная температура на внутренней поверхности ограждения, принимаемая по температурному полю, °C.

По величине  $\Delta t_{\max}$  производят оценку соответствия теплозащитных свойств стеновой панели санитарно-гигиеническим и теплозащитным требованиям.

Снижение теплозащитных свойств панелей в % определяют как

$$\frac{R_0 - R_{\phi}}{R_0} \cdot 100\%,$$

где  $R_0$  – термическое сопротивление теплопередаче конструкции стеновой панели, (м<sup>2</sup> · °C)/Вт.

#### Заключение.

Анализ результатов расчета показал, что требования к температурному перепаду между температурой внутренней поверхности стеновой панели и температурой внутреннего воздуха не выполняются при следующих размерах трещины:

- если длина трещины  $L_{\text{тр}} = 80$  см, то при любой ширине ее раскрытия;
- если  $L_{\text{тр}} = 20$  см, то при ширине раскрытия  $r > 1,4$  мм;
- если  $L_{\text{тр}} = 10$  см, то при ширине раскрытия  $r > 1,6$  мм.

#### Список литературы

1. Абрамович, М. Справочник по специальным функциям / М. Абрамович, И. Стиган. - М.: Наука, 1979. - С. 120-129.
2. Табунщиков, Ю.А. Выученные и невыученные уроки энергосбережения / Ю.А. Табунщиков // Энергосбережение. - 2009. - №1. - С. 15-24.

Также было установлено, что чем толще стеновая панель, тем существеннее влияние трещины на снижение теплозащитных свойств ограждения. Так при толщине панели 300 мм и трещине длиной 0,2 м с шириной раскрытия 3,2 мм требуется увеличение толщины наружного утеплителя из минеральной ваты на 19%, а при этих же размерах трещины, но толщине стеновой панели 400 мм - на 34,3%, то есть влияние возрастает в 1,8 раза. При этом происходит снижение термического сопротивления несущего слоя керамзитобетонной панели в 1,3 раза [9].

Выполненные исследования показали, что наличие трещин с шириной раскрытия свыше 1 мм свидетельствуют о необходимости их учета при проектировании термообновления стеновых панелей зданий на железнодорожном транспорте, так как в противном случае рассчитанная толщина утеплителя для обеспечения III уровня теплозащиты может оказаться заниженной на 5...34% и более в зависимости от толщины ограждения и размера трещины.

Таким образом, при помощи полученных математических зависимостей и разработанной расчетной программы: «Расчет воздухопроницаемости и температурных полей ограждений с фильтруемой трещиной» для конкретного здания можно путем замера лишь геометрических размеров фильтруемых трещин выделить наружные стеновые панели с высокой степенью физического износа, имеющие наиболее низкие теплозащитные свойства и нуждающиеся при термообновлении зданий на железнодорожном транспорте в наиболее значительных утепляющих, а подчас, и в предварительных восстановительных мероприятиях.

#### References

1. Abramovich M., Stigan I. Guidebook on special functions. Moscow, Nauka, 1979, pp. 120-129. (In Russian)
2. Tabunshnikov Y.A. Learned and unlearned lessons of Energy Saving. *Energoberezhenie*, 2009, No.1, pp. 15-24. (In Russian)

3. Фарлоу, С. Уравнения с частными производными. Для научных работников и инженеров / С. Фарлоу. – М.: Мир, 1985. – 383 с.
4. Шаумаров, С.С. Перспективы дальнейшей эксплуатации панельных жилых зданий / С.С. Шаумаров, Е.В. Щипачева, Р.Х. Пирматов // Материалы 12-й Междунар. науч.-практ. конф. «Перспективы развития строительных технологий». - Днепропетровск, 2018. - С. 165-169.
5. Шаумаров, С.С. Комплексный подход к проблеме термообновления стен панельных зданий / С.С. Шаумаров, Ю.А. Щипачева // VII Междунар. науч.-практич. конф. «TRANS-MECH-ART-CHEM». – М.: МИИТ, 2010. - С. 239-241.
6. Шаумаров, С.С. Совершенствование тепловой защиты панельных стен эксплуатируемых жилых зданий: дис. ... канд. техн. наук. – Ташкент, 2011. – 184 с.
7. Шаумаров, С.С. Информационно-техническая диагностика технического состояния эксплуатируемых зданий / С.С. Шаумаров // II Междунар. науч.-практ. конф. «Экономика и право: становление, развитие, трансформация». - Ростов, 2017. - С. 204-208.
8. Авторское свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № DGU 03151. Расчёт воздухопроницаемости и температурных полей ограждений с фильтруемой трещиной // Щипачева Е.В., Шаумаров С.С. - 2016.
9. Щипачева, Е.В. Динамика температуры воздуха в сквозной трещине наружного ограждения здания / Е.В. Щипачева, С.С. Шаумаров // Ресурсосберегающие технологии в строительстве: Межвуз. сб. научн. тр. – Ташкент, 2009. С. 21-26.
10. Becker, R. Air permeability and thermal performance of concrete block wall specimen / R. Becker // Journal of Building Physics. - 2010. - № 34 (2). P. 164-177.
11. Borodinecs, A. Renovation need for apartment buildings in Latvia / A. Borodinecs; J. Zemitis, J. Sorokins // Civil and Environmental Engineering Reports. - 2011. - Vol. 22. - P. 81-91.
12. Cheng, Y. Thermal comfort models: A
3. Farlou S. Partial differential equations. Moscow, Mir, 1985. 383 p. (In Russian)
4. Shaumarov S.S. Prospects for further operation of panel residential buildings. *Materialy 12-oy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii «Perspektivy razvitiya stroitelnykh tekhnologiy* [Proceedings of the 12th Int. Scientific and Practical Conf. "Prospects for the Development of Construction Technologies"]. Dnepropetrovsk, 2018, pp. 165-169. (In Russian).
5. Shaumarov S.S. Complex approach to the problem of walls of panel buildings. *VII Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. «TRANS-MECH-ART-CHEM»* [VII Int. theoretical and practical Conf. «TRANS-MECH-ART-CHEM»]. Moscow, MIIT, 2010, pp. 239-241. (In Russian).
6. Shaumarov S.S. Improvement of thermal protection of panel walls of operated residential buildings. Diss. Cand. Sci. (Engineering). Tashkent. 2011. 184 p. (In Russian).
7. Shaumarov S.S. Information and technical diagnostics of technical condition of operated buildings. *II Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Ekonomika i pravo: stanovlenie, razvitie, transformaciya»* [II Int. Scientific and Practical Conf. "Economics and Law: formation, development, transformation"]. Rostov, 2017, pp. 204-208. (In Russian).
8. Shchipacheva E.V., Shaumarov S.S. Calculation of air permeability and temperature fields of fences with a filtered crack. The Certificate on official registration of the computer program No. DGU 03151. 2016. (In Russian).
9. Shchipacheva, E.V., Shaumarov S.S. The dynamics of air temperature through the crack of the building cladding. *Resursosberegayuzhie tekhnologii v stroitelstve: v Mezhvuzovskom sbornike nauchnykh trudov* ["Resource saving technologies in construction" collected volume of scientific papers]. 2009, pp. 21-26. (In Russian).
10. Becker R. Air permeability and thermal performance of concrete block wall specimen. *Journal of Building Physics*, 2010, №34 (2), pp. 164 -177.
11. Borodinecs A., Zemitis J., Sorokins J. Renovation need for apartment buildings in

review and numerical investigation / Y. Cheng, J. Nin, N. Gao // *Building and Environment*. - 2012. - Vol. 47. - P. 13-22.

13. Imbabi, M.S. Evaluation of thermal conductivity in air permeable concrete for dynamic breathing wall construction / M.S. Imbabi, J.M. Wong, F.P. Glasser // *Cement and Concrete Composites*. - 2007. - Vol. 29. - P. 647-655.

14. Shaumarov, S.S. On the issue of increasing energetic efficiency of buildings in railway transport / S.S. Shaumarov // VIII Int. Conf. "Transport Problems - 2016". Katowice, Poland. - P. 522-532.

15. Shaumarov, S.S. On peculiarities of formation of the thermal mode in operating panel buildings / S.S. Shaumarov, A.I. Adilhodzhayev, F.F. Karimova // Int. Conf. «Science and practice: a new level of integration in the modern world». - London, 2018. - P. 365-368.

16. Shaumarov, S.S. On the method of estimation of thermal protective properties of external walls of operating residential buildings / S.S. Shaumarov, A.I. Adilhodzhayev, S.I. Kandakharov // Int. Conf. «Student science: research works». San Francisco, California, USA. Part II. «B & M Publishing». - 1980. - P. 103-106.

17. Tenpieric, M. An analytical model for calculating thermal bridge effects in high performance building enclosure / M. Tenpieric, W. Van der Spoel, H. Cauberg // *Journal of Building Physics*. - 2008. - Vol. 31. - P. 361-387.

Latvia. *Civil And Environmental Engineering Reports*, 2011, Vol. 22, pp. 81-91.

12. Cheng Y., Nin J., Gao N. Thermal comfort models: A review and numerical investigation. *Building and Environment*, 2012, Vol. 47, pp. 13-22.

13. Imbabi M.S., Wong J.M., Glasser F.P. Evaluation of thermal conductivity in air permeable concrete for dynamic breathing wall construction. *Cement and Concrete Composites*, 2007, Vol. 29, pp. 647-655.

14. Shaumarov S.S. On the issue of increasing energetic efficiency of buildings in railway transport. *VIII International Conference "Transport Problems - 2016"*. Katowice, Poland, pp. 522-532.

15. Shaumarov S.S. On peculiarities of formation of the thermal mode in operating panel buildings. *International conference "Science and practice: a new level of integration in the modern world"*. London, 2018, pp. 365-368.

16. Shaumarov S.S. On the method of estimation of thermal protective properties of external walls of operating residential buildings. *International conference "Student science: research works"*. San Francisco, California, USA. Part II. «B & M Publishing», 2018, pp. 103-106.

17. Tenpieric M., Van der Spoel W., Cauberg H. An analytical model for calculating thermal bridge effects in high performance building enclosure. *Journal of Building Physics*, 2008, Vol. 31, pp. 361-387.



Сетевое издание  
**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК**  
Брянского государственного университета

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ /**  
**ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ / НАУКИ О ЗЕМЛЕ**

**Учредитель и издатель:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского».

**Свидетельство о регистрации средства массовой информации  
выдано Федеральной службой по надзору  
в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций  
Эл № ФС77-62798 от 18 августа 2015 г.**

**Главный редактор сетевого издания:**

доктор технических наук, профессор  
А.В. Лагереv

**Адрес учредителя:**

ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет  
имени академика И.Г. Петровского»  
241036, Россия, Брянск, ул. Бежицкая, д. 14

**Адрес редакции и издателя:**

РИО ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет  
имени академика И.Г. Петровского»  
241036, Россия, Брянск, ул. Бежицкая, д. 20

Дата размещения сетевого издания в сети Интернет  
на официальном сайте <http://www.ntv-brgu.ru> 25.09.2018 г.