

УДК: 625.7/8.05:658.51

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.34

EDN: VGFWCY



Функциональная адаптация комплектов дорожно-строительных машин при производстве работ по строительству транспортных сооружений

В.А. Борисов¹, Н.А. Ергошин¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
город Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация: Рациональный выбор комплектов дорожно-строительных машин обеспечивает эффективность выполнения дорожно-строительных работ. При строительстве линейно-протяженных объектов условия выполнения работ (климатические, гидрогеологические и др.) на участках меняются. В связи с этим возникает необходимость корректировки состава комплектов машин, но традиционные методы формирования комплектов дорожно-строительных машин не позволяют реагировать на изменение внешних факторов без значительных дополнительных затрат. Использование методов функциональной адаптации комплектов машин требует исключения из их состава одних и включения других машин, что связано со значительными затратами. Существующие методы обоснования комплектов дорожно-строительных машин позволяют сформировать состав комплектов для строго определенных условий производства работ (характерных для конкретного места строительства), но не применимы для обоснования комплектов дорожно-строительных машин, приспособленных к возможному множеству условий выполнения работ при минимизации затрат на такое применение. *Целью исследования* является разработка метода функциональной адаптации комплектов дорожно-строительных машин для выполнения работ с требуемым качеством в установленные сроки при оптимизации затрат на формирование, переформирование и эксплуатацию этих комплектов. *Задачи исследования:* обоснование способа моделирования условий производства дорожно-строительных работ (природно-климатических, грунтово-гидрогеологических и др.); разработка метода обоснования состава машин для однородных групп условий производства работ (объемы финансирования, технологические ресурсы, номенклатура и объемы дорожных работ и др.); разработка алгоритма выбора адаптивного комплекта дорожно-строительных машин с учетом выполнения превентивных мероприятий по его приспособлению к меняющимся условиям производства работ. *Результаты.* Разработан метод функциональной адаптации комплектов машин при производстве работ по строительству автомобильных дорог, основанный на применении моделей математического программирования, статистического моделирования для имитации условий выполнения работ и экономической неопределенности их ресурсного обеспечения, теории игр для выбора адаптивных вариантов в условиях неопределенности. *Выводы.* Метод может использоваться в проектных, дорожно-строительных, дорожно-эксплуатационных организациях для обоснования и выбора комплектов техники и технологического оборудования, поиска превентивных мер по адаптации сформированных комплектов дорожно-строительных машин к меняющимся условиям производства работ и их материально-технического обеспечения, управления рисками перерасхода финансовых средств на переформирование комплектов дорожно-строительных машин.

Ключевые слова: дорожно-строительные машины, дорожно-строительные работы, адаптация, оптимизация, математическое программирование, комплекты.

Для цитирования: Борисов В.А., Ергошин Н.А. Функциональная адаптация комплектов дорожно-строительных машин при производстве работ по строительству транспортных сооружений // Известия КГАСУ, 2026, № 1 (75), с. 416-427, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.34, EDN: VGFWCY

Functional adaptation of road construction machinery sets for the construction of transport facilities

V.A. Borisov ¹, N.A. Ermoshin ¹

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation

Abstract: Problem Statement. The rational selection of road construction machinery sets is crucial for the efficient execution of road construction works. During the construction of linear extended projects, such as highways, working conditions (climatic, hydrogeological, etc.) vary significantly across different sections. In this regard, there is a need to adjust the composition of machinery sets, but traditional methods of forming sets of road construction machines do not allow one to respond to changes in external factors without significant additional costs. Functional adaptation measures often involve replacing or reconfiguring equipment, which incurs substantial costs. Existing methods for determining road construction machinery sets compositions are designed for fixed, predetermined working conditions and are inadequate for justifying sets that are adaptable to a range of potential scenarios while minimizing adaptation costs.

Research Objective. The aim of this study is to develop a method for the functional adaptation of road construction machinery sets. This method ensures work is completed to the required quality standards and within deadlines, while optimizing the costs associated with the formation, reconfiguration, and operation of these sets. To achieve this goal, the following tasks are addressed: justifying the approach for modeling road construction working conditions (natural and climatic, soil and hydrogeological, etc.); developing a method to determine optimal road construction machinery sets compositions for homogeneous groups of operational conditions (funding volumes, technological resources, range and volume of road works, etc.); and creating an algorithm for selecting an adaptive road construction machinery sets, considering preemptive measures for its adjustment to changing site conditions.

Results. A method for the functional adaptation of road construction machinery sets during transportation facility construction has been developed. The method is based on the application of mathematical programming models to justify road construction machinery (RCM) sets composition, statistical modeling to simulate working conditions and the economic uncertainty of resource provision, and game theory for selecting adaptive RCM sets options under uncertainty.

Conclusions. The proposed method can be utilized by design, construction, maintenance, and other transportation-related organizations to justify and select (purchase, lease) machinery and equipment sets. It aids in identifying preemptive measures for adapting RCMs to changing site conditions and their logistical support, as well as in managing the financial risks associated with cost overruns from machinery set reconfiguration.

Keywords: road construction machinery, road construction works, adaptation, optimization, mathematical programming, sets.

For citation: Borisov V.A., Ermoshin N.A. Functional adaptation of road construction machinery sets for the construction of transport facilities // News of KSUAE, 2026, № 1 (75), p. 416-427, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.34, EDN: VGFWCY

1. Введение

Транспортная инфраструктура играет важную роль в развитии социально-экономических систем на федеральном и региональном уровнях, а также в удовлетворении транспортных потребностей экономических субъектов и населения. Она является стратегически значимым компонентом, который обеспечивает эффективную транспортную связь и перемещение людей, продукции производственно-технического назначения, товаров и услуг. Развитая сеть транспортных коммуникаций способствует росту торговли и инвестиций, а также обеспечивает мобильность населения и социальную связность территорий, агломераций, населенных пунктов [1,2]. Поэтому развитие всех компонентов транспортной системы является одной из приоритетных целей

государственной политики. Это подтверждается принятием федеральных законов, указов Президента России, постановлений и решений Правительства¹ [3,4]. В данных документах уделяется большое внимание вопросам развития и повышения уровня транспортно-эксплуатационного состояния сети автомобильных дорог².

Дорожное строительство – это сложный процесс, эффективность которого зависит от множества факторов, влияющих на выбор техники, технологий и методов работы. Например, разнообразие климатических зон в стране вызывает необходимость применения различных технологий и материалов (; различные типы грунта (глинистый, песчаный, крупнообломочные) требуют специфических методов строительства и выбора соответствующей техники ; строительство в условиях холмистой или горной местности невозможно без применения соответствующих технологий, комплектов дорожно-строительных машин и оборудования .

Исследованиями проблем механизации и автоматизации работ по строительству, реконструкции и, их конструкций и элементов в разные годы занимались различные ученые [5,6]. В работах глубоко исследованы теоретические основы и методология комплексной механизации строительного производства. Исследование В.Б. Пермякова посвящено оптимизации комплектов машин для строительства автомобильных дорог, а работа Fu J., Jenelius E. рассматривает задачи оптимального выбора парка техники для земляных работ [6,7].

Существуют разные подходы и методы обоснования состава комплектов дорожно-строительных машин (по производительности ведущей машины , на основе установления технологической связи между машинами, по показателям эффективности комплекта машин и др.)[8]. Однако имеющиеся подходы и способы их математической формализации не учитывают возможные изменения условий выполнения работ на линейно-протяженных объектах, к которым относятся строящиеся или реконструируемые участки автомобильных дорог. Это приводит к увеличению затрат, связанных не только с эксплуатацией техники, но и к их увеличению в связи с необходимостью замены одних машин на другие. Дополнительные затраты также могут возникать из-за снижения производительности машин в новых условиях эксплуатации [9].

Рассмотренные обстоятельства требуют разработки методов научного обоснования комплектов дорожно-строительных машин (КДСМ) и их адаптации к меняющимся условиям строительства линейно-протяженных объектов [9,10].

Таким образом, целью статьи является создание метода функциональной адаптации комплектов дорожно-строительных машин, гарантирующего выполнение работ с регламентированным качеством и в установленные сроки. Это достигается за счет оптимизации состава комплектов при меняющихся условиях строительства, учитывающей минимизацию расходов на реализацию мероприятий, корректирующих состав КДСМ на строящейся дороге. Для достижения указанной цели требуется обосновать способ моделирования условий выполняемых работ (природно-климатических, грунтово-гидрогеологических и др.), метод формирования комплектов дорожно-строительных машин для этих условий выполняемых работ, алгоритм выбора адаптивных комплектов дорожно-строительных машин, основанный на принципах превентивного планирования и адаптации .

Суть предлагаемого подхода к подбору техники, необходимой для выполнения дорожно-строительных работ, заключается в том, что сформированные КДСМ должны сохранять требуемые показатели эффективности и работоспособность даже при

¹ О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года: Указ Президента Российской Федерации от 07 мая 2024 г. № 309. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/408892634/>.

Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/403056321/>

² Об утверждении требований к программам комплексного развития транспортной инфраструктуры поселений, муниципальных округов, городских округов (с изменениями и дополнениями) : Постановление Правительства Российской Федерации от 25 декабря 2015 г. – URL: <https://base.garant.ru/71296074/>

отклонении реальных условий эксплуатации от проектных [10,11]. Ключевой особенностью предлагаемого подхода является способность комплексов дорожно-строительных машин качественно и в заданные сроки производить дорожно-строительные работы при изменении внешних факторов (условий функционирования, природно-климатические и др., условия функционирования) с учетом ранее принятых организационно-технических решений.

Для успешной реализации подхода необходимо четкое определение концептуальных основ, разработка общей схемы взаимодействия машин, применение принципов, обеспечивающих функциональную адаптацию машинокомплектов, необходимых при строительстве линейно-протяженных объектов [12-14].

Функциональная адаптация предусматривает комплекс организационно-технических мероприятий по корректировке состава комплексов дорожно-строительной техники для выполнения дорожных работ при отклонении условий их производства от проектных (геологические характеристики, природно-климатические факторы, ресурсное обеспечение), а также в случае изменения условий строительства линейно-протяженного объекта на всей его длине. Организационно-технические мероприятия направлены на повышение качества строительства и сокращение затрат на переформирование комплексов дорожно-строительной техники.

2. Материалы и методы

Ввиду большой сложности, решение задачи научного обоснования КДСМ для меняющихся условий, структуры и объемов работ, вызывает необходимость комплексного применения методов математического и имитационного моделирования, а также моделей принятия решений в условиях неопределенности и эвристических процедур [14,15].

В соответствии с тем, что процесс строительства направлен на выполнение требуемых (заданных) объемов работ в установленные сроки, а взаимосвязи между ними, производительностью машин и затратами можно считать линейными, то формирование комплекта предлагается представить в виде модели линейного программирования. Целью оптимизации КДСМ может быть либо минимизация затрат, либо максимизация производительности с имеющимися ограничениями по возможностям строительной организации и исходя из условий строительства (времени, количеству доступных машин, имеющимся ресурсам).

Математическая основа подхода заключается в объединении методов стохастического моделирования для оперативной корректировки решений оптимизационных задач при недетерминированных исходных данных, а также алгоритмов распознавания образов и теории игр, для принятия решений при неопределенности условий [16].

Математическая постановка задачи по формированию КДСМ состоит в решении системы уравнений (1-4). При этом в качестве целевой функции рассматривается минимизация суммы произведений затрат на единицу техники на количество таких единиц в составе комплекта дорожно-строительных машин. Затратами являются затраты на приобретение (аренду), эксплуатацию и замену одних машин на другие в составе комплектов [16]. Математическая модель решаемой задачи может быть представлена в следующем виде:

$$\min \sum_{m=1}^K Z_{ij}^m y_{ij}^m; \quad (1)$$

$$\sum_{m=1}^K B^m y_{ij}^m = c; \quad (2)$$

$$C^m y_{ij}^m = c^m; \quad (3)$$

$$y_{ij}^m \geq 0. \quad (4)$$

где Z_{ij}^m – затраты, связанные с применением машины типа j для работы i в m -ой группе условий;

y_{ij}^m – искомые параметры (необходимое количество машин j -го типа для выполнения работ i -го вида в m -ой группе условий);
 i – вид дорожно-строительных работ;
 j – тип дорожно-строительной машины (марка, модель);
 m – условия выполнения работ;
 $B^m = \|b_{ij}^m\|$ – матрица, характеризующая общие ограничения для m -ой группы условий (структура и состав работ, сроки выполнения работ, ресурсы и др.);
 c – вектор общих ограничений (сроки производства работ, бюджет, объемы работ);
 $C^m = \|c_{ij}^m\|, i = 1, \dots, l_m, j = 1, \dots, h_m$ – матрица, характеризующая частные ограничения (объемы выполняемых дорожно-строительных работ, природно-климатические, грунтово-геологические, экономические условия и пр.);
 c^m – вектор ограничений для m -ой группы условий производства работ;
 l – общее количество видов работ;
 h – общее количество типов машин.

Реализация предлагаемого метода функциональной адаптации комплектов дорожно-строительных машин при производстве работ по строительству транспортных сооружений предусматривает применение детерминированных моделей линейной оптимизации при формировании КДСМ, имитационного моделирования для имитации условий выполнения работ и влияния экономических факторов на ресурсное обеспечение строительства, теории принятия решений в условиях неопределенности (теории игр) для выбора адаптивных вариантов КДСМ. Метод включает следующие этапы.

1 этап. Построение репрезентативной выборки входных параметров модели (1-4), характеризующей K комбинаций условий производства дорожно-строительных работ.

Моделирование условий осуществляется посредством метода Монте-Карло. Требуемая точность моделирования достигается путем итеративной вариации компонентов вектора ограничений (B^m) и коэффициентов целевой функции (Z^m) модели (1-4), характеризующих совокупные издержки на формирование состава комплектов и эксплуатацию машин при выполнении дорожно-строительных работ в рамках рассматриваемой линейной модели математического программирования.

2 этап. Определение оптимального состава комплекта дорожно-строительных машин для каждого из рассматриваемых сценариев условий работы.

Оптимальный состав комплекта дорожно-строительных машин определяется последовательным решением прямой и двойственной задач линейного программирования с использованием алгоритмов ускоренного корректирования базиса, обеспечивающего оптимальность решения.

Первоначально при помощи приведенной модели (1-4) комплектуется исходный вариант КДСМ для средних значений исходных данных. Затем полученный комплект корректируется для всех возможных групп (вариантов) условий выполнения дорожно-строительных работ. Оптимальный состав КДСМ по критерию минимальной стоимости, определяется с помощью симплекс-метода, основанного на математическом алгоритме для решения задач линейного программирования.

3 этап. Выбор превентивных мероприятий по функциональной адаптации предварительно сформированных оптимальных КДСМ для прогнозируемых вариаций условий выполнения дорожных работ.

С этой целью, как и на втором этапе, используется алгоритм двойственного решения задачи линейного программирования. Свойство двойственности задач линейного программирования позволяет найти оптимальное решение прежнего базиса при изменении ограничений модели (в нашем случае условия выполнения работ).

4 этап. Выбор адаптивного варианта состава КДСМ в условиях неопределенности условий производства работ.

В контексте неопределенности условий производства работ, приоритет отдается решению (варианту КДСМ), обеспечивающему минимальные затраты на приспособление к условиям, отличающимся от тех, для которых был первоначально сформирован КДСМ (элементы диагональной матрицы, таблица 1). Так как каждый вариант характеризуется множеством возможных значений этих затрат (в соответствии с количеством групп

условий), для принятия окончательного решения требуется применение критериев принятия решений в условиях неопределенности. При экономической стабильности в качестве наилучшего выбирается вариант КДСМ с минимумом математического ожидания затрат на адаптацию. В ситуации экономической неопределенности (высокая инфляция, низкая надежность ресурсного обеспечения, контрактные риски и др.) возможно применение для принятия решений теории игр. Для подобных условий окончательный выбор КДСМ может осуществляться с применением теории игр.

В рассматриваемой модели теории игр первый участник располагает P оптимальными вариантами КДСМ, а второй – оперирует K возможными сценариями условий производства работ. Элементы платежной матрицы (затраты на адаптацию) отражают потенциальный экономический ущерб для организации при различных вариациях сочетаний стратегий первого и второго игроков. Наилучшее решение представляет собой тот вариант КДСМ, у которого возможные экономические потери при наихудших условиях производства работ являются минимальными.

3. Результаты и обсуждение

1 этап. Полученная выборка исходных данных K «группируется» в заданное количество P (где $P \ll K$) групп. Каждая группа соответствует схожим условиям производства дорожно-строительных работ (функционирования КДСМ). Это необходимо для сокращения количества вариантов КДСМ.

Группировка выполняется на основе расчета тесноты связи между количественными характеристиками условий работ ($\tilde{C}_m$ и $\tilde{C}_m$) в соответствии с установленными классификационными признаками (вид и объемы работ, технологическая взаимозависимость, территориальная близость, время выполнения и др.). Показателем тесноты связи между условиями является евклидова метрика (e_{mm}) между их векторами в n -мерном пространстве (n – размерность вектора C):

$$e_{mm} = \sum_{i=1}^n p_i^2 (\tilde{C}_{mi} - \tilde{C}_m)^2, \quad (5)$$

где $\tilde{C}_{mi}$ и $\tilde{C}_m$ – количественные значения i -го показателя, характеризующего условия выполнения работ дорожно-строительными машинами, соответственно, в m -ой и m -ой имитации события, означающего наступление условия с i -м значением его показателя;

p_i – коэффициент нормирования i -го показателя одного из множества условий (элемента вектора $C \in B^m$), который применяется для перевода абсолютных значений характеристик условий в относительные величины).

Способ кластеризации условий работы комплектов дорожно-строительных машин реализуется на основе следующего принципа. В качестве начальных центров кластеров (центроидов) произвольно назначаются P комбинаций, выделяемых из полного спектра возможных условий. Затем по зависимости (5) рассчитывается матрица попарных расстояний e_{mm} между количественными значениями показателей смоделированных условий и центрами групп:

$$E^P = \|e_{mm}\|. \quad (6)$$

Матрица E^P характеризует евклидово расстояние между назначенными центрами групп и отдельными условиями выполнения работ. Далее осуществляется последовательный перебор из $(K - P)$ сочетаний и для каждого сочетания вычисляются расстояния до P первоначальных центров. В случае, если это расстояния меньше минимального расстояния между исходными центрами, сочетание добавляется к ближайшему из них. Если же оно больше, то два ближайших исходных центра объединяются, а полученное сочетание становится новым центром. Итогом перебора данных из всех сочетаний является разбиение множества условий K на P однородных групп.

2 этап.

После выполнения расчетов формируется таблица 1. В этой таблице $m_1, m_2, \dots, m_n$ соответствуют группам условий производства работ, а $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ варианты КДСМ, рассчитанные в соответствии с целевой функцией (1) и ограничениями (2-4). Каждый из

вариантов Y_{nm} соответствует количеству машин j -го типа для выполнения работ i -го вида в m -ой группе условий в составе КДСМ. Коэффициенты Z_{nm} характеризуют затраты, связанные с включением в состав КДСМ машины типа j для выполнения i -ой работы в m -ой группе условий.

Таблица 1

Результаты определения состава комплекта дорожно-строительных машин для каждой из рассматриваемых групп условий производства работ

Условия функц. Варианты компл.	Сочетания исходных данных			
	m_1	m_2	...	m_n
Y_1	$\sum Z_{11} Y_{11}$			
Y_2		$\sum Z_{22} Y_{22}$		
...			...	
Y_n				$\sum Z_{nm} Y_{nm}$

Таблица 1 является диагональной матрицей. Это означает что оптимальным и допустимым КДСМ является только для тех условий, под которые он формируется. Для функциональной адаптации вариантов КДСМ и выбора лучшего из них, необходимо поставить все комплекты в сопоставимые условия. Иными словами, необходимо адаптировать каждый комплект машин ко всем возможным условиям функционирования ($m_1, m_2, \dots, m_n$) и, тем самым, снизить влияние неопределённости.

При этом для минимизации вероятности срыва строительных работ из-за неправильного подбора состава КДСМ при неопределенности условий производства работ возможно применение трех вариантов действий:

- 1) корректировка состава КДСМ к изменению структуры (перечня) работ, цен на закупку (аренду), эксплуатацию и условий финансирования;
- 2) корректировка состава КДСМ к меняющимся условиям выполнения работ;
- 3) корректировка состава КДСМ к изменению условий финансирования, цен и производства работ.

Для реализации первого варианта необходимо сформировать новый состав КДСМ. Это обусловлено изменением структуры затрат (коэффициентов целевой функции модели 1-4) случайным сочетанием $\tilde{Z}$ ($\tilde{Z}_n \subset \tilde{C}_n$). При этом данная ситуация может быть смоделирована следующим образом.

В составе случайного вектора $\tilde{C}_n$ произвольно выбирается вектор $\tilde{Z}_n$, элементы которого являются коэффициентами при базисных переменных $Y = \{y_{ij}\}$. Полученные значения соответствуют ранее найденному оптимальному составу КДСМ. Данный вариант применяется для корректировки комплекта путем определения количества машин каждого вида на основе двойственных переменных задачи (1-4) в соответствии с выражением:

$$\tilde{F}_n = \tilde{Z}_n L, \quad (7)$$

где L – обратная матрица предыдущего решения задачи (1-4).

Необходимо отметить, что при этом исходный вариант комплекта дорожно-строительных машин все еще является допустимым. Однако утрачивается его оптимальность для производства дорожных работ. Оптимальный состав КДСМ по критерию минимальной стоимости ($\tilde{Z}_n^k$), определяется с помощью симплекс-метода, и данный алгоритм применяется ко всем P вариациям сочетаний коэффициентов целевой функции (1).

Адаптация КДСМ по второму варианту действий, который предусматривает корректировку состава комплекта машин к меняющимся условиям выполнения работ, осуществляется с учетом того, что задача выбора КДСМ для новых условий по модели (1-4) отличается лишь значениям компонентов вектора ($C \in B^m$). При этом прежний

комплект дорожно-строительных машин по затратам Z_n является оптимальным ($Y_n = LC_n$), но может оказаться неприемлемым по ограничениям [17].

Благодаря этому двойственный симплекс-метод дает возможность определить оптимальный состав комплекта дорожных машин при выполнении работ в новых условиях строительства без полного перерасчета (минуя этап поиска начального допустимого базиса). Данный подход обеспечивает сокращение времени вычисления на 70-75%.

Третий вариант действий предусматривает формирование комплектов, адаптированных к изменениям условий финансирования, цен и производства работ. Условия характеризуются одновременной вариацией параметров целевой функции и ограничений в рамках модели (1-4). Процесс моделирования предполагает решение двухуровневых оптимизационных задач с применением специально разработанных вычислительных процедур. При изменении условий финансирования моделирование предполагает итерационное варьирование коэффициентов целевой функции, второй – корректировку вектора ограничений. Результаты моделирования предоставляют возможность определения оптимального состава комплектов машин и характеристики его экономической эффективности.

3 этап.

По итогам расчетов диагональная матрица (таблица 1), полученная на втором этапе выбора адаптивного варианта КДСМ, дополняется результатами расчетов с учетом выбора мероприятий адаптации каждого (диагонального) варианта к каждой группе условий выполнения работ. В результате определяются показатели общих затрат на формирование, эксплуатацию и адаптацию каждого из возможных вариантов КДСМ. Полученные затраты являются основными показателями для выбора окончательного решения.

4 этап.

Для нахождения оптимального решения игровой модели используется эквивалентная постановка задачи линейного программирования:

$$\max \left\{ \begin{array}{l} \sum x_n \leq 1 \\ \sum \gamma_r^n x_n \geq 0 \end{array} \right\}, \quad (8)$$

где x_n – доля использования варианта КДСМ в итоговом решении;

γ_r^n – значение платежной матрицы, показывающее негативные последствия выбора n -го варианта комплекта машин при m -ом сочетании условий производства работ;

$x_n \geq 0$ – ограничение на не отрицательность искомых переменных (доля не может быть отрицательной).

После решения игровой задачи вариант комплекта дорожно-строительных машин перестает быть оптимальным, хотя и остается допустимым. Для достижения минимума затрат $\tilde{Z}_n$ на формирование, эксплуатацию и адаптацию комплекта дорожно-строительных машин используется алгоритм симплекс метода. Результатом вычислений является получение состава КДСМ, гарантирующего выполнение работ при меняющихся внешних факторах, он вычисляется как:

$$Y_{r, \text{опт.}} = \sum_{r=1}^P \varphi_r Y_r, \quad (9)$$

где φ_r – коэффициенты двойственной задачи, определяющие степень влияния каждого варианта на итоговую стратегию.

Принципиальным отличием полученного решения является адаптивность КДСМ с сохранением его оптимальности в широком спектре условий производства работ.

Предложенный метод функциональной адаптации комплектов дорожно-строительных машин при производстве работ по строительству транспортных сооружений имеет существенное отличие от традиционных способов формирования КДСМ. Например, в работе [18] оптимальный выбор парка машин для земляных работ решается с применением статической модели для фиксированных условий производства работ, без учета изменения комплектов дорожно-строительных машин и затрат на их переформирование. Предложенный метод позволяет спрогнозировать возможные изменения состава комплектов и обосновать мероприятия по их адаптации к меняющимся условиям производства работ. Данный аспект особенно важен в условиях нестабильного

финансирования строительства объектов транспортной инфраструктуры. Возможность заранее учитывать изменения в составе комплектов дорожно-строительных машин при расчетах состава комплектов, позволяет оптимально использовать ресурсы, минимизируя непредвиденные затраты на переформирование или адаптацию КДСМ уже в процессе строительства.

Пермяков В. В., Саликов Р. Ф. [19] модернизировали модель оптимизации дорожных комплектов, но без кластеризации условий производства работ и превентивных мер – их метод требует полной перестройки КДСМ при изменениях условий работ, что увеличивает финансовые затраты.

По сравнению с имеющимися, разработанный метод учитывает стохастический характер условий формирования комплектов и эксплуатации дорожно-строительных машин, технологической взаимосвязи дорожно-строительных работ при возведении дорожных конструкций; отличается комплексным применением методов имитационного моделирования, кластерного анализа, линейного программирования и теории игр; позволяет осуществлять формирование комплектов машин совместно с выбором технологии производства дорожно-строительных работ; обеспечивает возможность оптимизации затрат на формирование, функционирование и адаптацию комплектов машин с учетом ограничений на необходимость выполнения требуемых объемов работ в установленные сроки и с заданным качеством.

4. Заключение

1. Разработан способ моделирования условий производства дорожно-строительных работ, отражающий стохастические природно-климатические, грунтово-гидрогеологические и ресурсные факторы линейно-протяженных объектов. Использование метода Монте-Карло, с применением кластеризации, в несколько раз сокращает количество возможных сценариев производства работ, объединяя их в однородные группы. В отличие от статических подходов, разработанный способ учитывает изменчивость условий производства дорожно-строительных работ, повышая точность прогнозирования адаптации комплектов дорожно-строительных машин.

2. Разработан метод определения оптимального состава дорожно-строительных машин для однородных групп условий. Модели линейного программирования формируют оптимальные комплекты дорожно-строительных машин для каждой группы условий функционирования, минимизируя затраты на формирование и эксплуатацию комплектов с учетом общих (сроки производства работ, объемы финансирования) и частных (объемы работ) ограничений. Разработанный метод обеспечивает корректировку состава комплекта дорожно-строительных машин при изменении внешних параметров без полной перестройки комплекта, сокращая время вычислений, но также обеспечивая требуемое качество работ.

3. Разработан алгоритм выбора адаптивного комплекта дорожно-строительных машин с учетом выполнения превентивных мероприятий по его приспособлению к меняющимся условиям производства работ. При помощи Теории игр оцениваются риски для каждого варианта комплекта дорожно-строительных машин при заданных сценариях. Алгоритм минимизирует финансовые риски, сохраняя оптимальность по всем необходимым параметрам.

Список литературы/References

1. Ермошин Н.А., Борисов В.А. Моделирование условий работы дорожно-строительных машин и технологического оборудования // Известия КГАСУ 2024, № 2(68), с. 147-158, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.13, EDN: NDANNY
Ermoshin N.A., Borisov V.A. Modeling of working conditions and selection of sets of road-building machines and processing equipment // News KSUAE, 2024, № 2(68), p. 147-158, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.13, EDN: NDANNY
2. Благодер Т.П., Олейник В.В. Внедрение экономически эффективных инновационных материалов и технологий в строительстве и эксплуатации автомобильных дорог // Экономическая политика и ресурсный потенциал региона:

- сборник научных статей VII Всероссийской научно-практической конференции. Брянск, 2024. С. 123–125.
- Blagoder T.P., Oleynik V.V. Implementation of cost-effective innovative materials and technologies in construction and operation of highways // *Economic Policy and Resource Potential of the Region: Collection of Scientific Papers of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference*. Bryansk, 2024. Pp. 123–125.
3. Домницкий А.А., Носенко В.В., Юшин А.С. Разработка методики выбора перегружателей асфальтобетонной смеси при строительстве автомобильных дорог // *Современные прикладные исследования: материалы девятой Всероссийской (национальной) научно-практической конференции*. В 2-х томах. Новочеркасск, 2025. С. 138–141.
- Domnitskiy A.A., Nosenko V.V., Yushin A.S. Development of a methodology for selecting asphalt concrete mix transfer devices in road construction // *Modern Applied Research: Proceedings of the Ninth All-Russian (National) Scientific and Practical Conference*. In 2 volumes. Novocherkassk, 2025. Pp. 138–141.
4. Волкова А.А., Тускаева З.Р. Методологические основы эффективного управления техническим потенциалом в строительстве. Вестник МГСУ №2 (113), 2018, с. 231-239.
- Volkova A.A., Tuskaeva Z.R. Methodological foundations of effective management of technical potential in construction. Vestnik MGSU, 2018, no. 2(113), pp. 231-239.
5. Чемодуров В.Т., Литвинова Э.В. Оптимизация и надежность строительных систем. Выпуск №2 (79), 2021, Pages 110-117.
- Chemodurov V.T., Litvinova E.V. Optimization and reliability of construction systems. 2021, no. 2(79), pp. 110-117.
6. Chen C., Shu M., Zhou S., Liu Z., Liu R. Wavelet-domain group-sparse denoising method for ECG signals // *Biomedical Signal Processing and Control*. 2023. Vol. 79. P. 104702. DOI: 10.1016/j.bspc.2023.104702.
7. Shehadeh A., Alshboul O., Tatari O., Alzubaidi M. A., Salama A. H. E.-S. Selection of heavy machinery for earthwork activities: A multi-objective optimization approach using a genetic algorithm // *Alexandria Engineering Journal*. 2022. Vol. 61, No. 10. Pp. 7903–7918
8. Максудов З.Т., Хусенова Г.Ю., Рустамов К.Ж. Разработка рационального комплекта машин на основе нормативной трудоемкости для строительства асфальтобетонного покрытия // В мире науки и открытий : сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса. – Пенза : Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2024. – С. 21-25. – УДК 625.05.02.
- Maksudov Z.T., Khusenova G.Yu., Rustamov K.Zh. Development of rational set of machines based on standard labor intensity for asphalt concrete pavement construction. In the World of Science and Discoveries: collection of articles of the International Research Competition. Penza: Nauka i Prosveshchenie, 2024, pp. 21-25.
9. Олейник П.П., Ефимов В.В. Определение значимых параметров и факторов для подбора комплектов машин для земляных работ // *Строительное производство*. 2022. № 2. С. 42-45.
- Oleynik P.P., Efimov V.V. Determination of significant parameters and factors for selection of earthwork machinery sets. Stroitelnoe proizvodstvo, 2022, no. 2, pp. 42-45.
10. Shehadeh A., Alshboul O., Al-Shboul K. F., Tatari O. An expert system for highway construction: Multi-objective optimization using enhanced particle swarm for optimal equipment management // *Expert Systems with Applications*. 2024. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.123621.
11. Спасибухов Ю.Н., Щиенко А.Н., Осипов А.А., Горбачев А.Е., Смирнов Н.С. Экономическое обоснование комплектования дорожно-строительных работ // *Высокие технологии в строительном комплексе*. 2023. № 2. С. 12-18.
- Spasibukhov Yu.N., Shchienko A.N., Osipov A.A., Gorbachev A.E., Smirnov N.S. Economic justification of road construction works equipment sets. High Technologies in Construction Complex, 2023, no. 2, pp. 12-18.

12. Banihashemi S. A., Khalilzadeh M. A Robust Bi-objective Optimization Model for Resource Levelling Project Scheduling Problem with Discounted Cash Flows // Journal article. — 2025. — Available online 2 Jan. 2025. — DOI: 10.1007/s12205-022-0679-z.
13. Нарышкина К., Фабрикантова О.Г. Разработка методики формирования рационального комплекта машин для земляных работ в условиях городской застройки // Актуальные проблемы инженерных наук : материалы X (67-й) ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета. – Ставрополь : Северо-Кавказский федеральный университет, 2023. – С. 147-152.
Naryshkina K., Fabrikantova O.G. Development of methodology for forming rational set of machines for earthworks in urban development conditions. Actual Problems of Engineering Sciences: Proceedings of the X (67th) Annual Scientific-Practical Conference of North Caucasus Federal University. Stavropol, 2023, pp. 147-152.
14. Стибунов Д.В., Сусанина Т.В. Технологии экологически безопасного строительства линейных объектов городской инфраструктуры на примере автомобильных дорог // Дни студенческой науки : сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов института инженерно-экологического строительства и механизации НИУ МГСУ. Москва, 2024. С. 131–134.
Stibunov D.V., Susanina T.V. Technologies of environmentally safe construction of linear urban infrastructure objects on the example of highways // Days of Student Science: proceedings of the scientific and technical conference on the results of students' research works of the Institute of Engineering and Environmental Construction and Mechanization of NRU MSGU. Moscow, 2024. Pp. 131–134.
15. Жулай В.А., Спasiбухов Ю.Н., Щиенко А.Н. Экономическое обоснование формирования комплектов машин для производства асфальтобетонных работ в дорожном строительстве // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2022. – № 1 (20). – С. 99-105.
Zhulai V.A., Spasibukhov Yu.N., Shchienko A.N. Economic justification of forming machinery sets for asphalt concrete works in road construction. Housing and communal infrastructure, 2022, no. 1(20), pp. 99-105.
16. Lin X., Mazlan A. N., Ismail S., Hu L., Kasiman E. H. B., Yahya K. Status of value management studies in construction projects: A systematic review // Journal article. — 2022. — Available online 6 May 2022. — DOI: 10.1016/j.asej.2022.101820.
17. Кабикенов С.Ж., Портнов В.С., Сүңғатоллақызы А. Исследование и разработка методов оптимизации использования комплекса машин при строительстве автодорог // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2020. – № 1 (112). – С. 149-158. – УДК 519.852.33:625.7/8. – ISSN 1609-1817.
Kabikenov S.Zh., Portnov V.S., Sungatollakyzy A. Research and development of methods for optimizing the use of machinery complex in road construction. Bulletin of the Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpaev, 2020, no. 1(112), pp. 149-158.
18. Fu J., Jenelius E., Koutsopoulos H. N. Optimal Fleet Selection for Earthmoving Operations // Proceedings of the 7th International Structural Engineering and Construction Conference (ISEC-7). — Honolulu, 2013.
19. Пермяков В.Б. Салихов Р.Ф. Модернизация математической модели оптимизации структуры дорожных комплектов машин // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации : сб. матер. III Междунар. науч.-практ. конф., 2019. – С. 30–35.
Permyakov V.B., Salihov R.F. Modernization of the mathematical model for optimizing the structure of road machine kits // Architectural-construction and road-transport complexes: problems, prospects, innovations: proceedings of the III International scientific-practical conference, 2019. – P. 30–35.

Информация об авторах

Ермошин Николай Алексеевич, доктор военных наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Email: ermonata@mail.ru, ORCID: 0000-0002-0367-5375

Борисов Вячеслав Андреевич, аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Email: vabor01@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8596-7020

Information about the authors

Nikolay A. Ermoshin, doctor of military sciences, professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

Email: ermonata@mail.ru, ORCID: 0000-0002-0367-5375

Viacheslav A. Borisov, post-graduate student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

Email: vabor01@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8596-7020

Дата поступления: 04.08.2025

Дата принятия: 30.04.2026