



УДК: 625.7/8.05, 658.51

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.13

EDN: NDANNY

Моделирование условий работы и подбора комплектов дорожно-строительных машин и технологического оборудования

Н.А. Ермошин¹, В.А. Борисов¹

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

Аннотация: Главной проблемой создания комплектов дорожно-строительных машин и технологического оборудования является их узкая направленность и низкая вариативность. Необходимо разработать метод моделирования условий работы дорожных машин, в результате применения которого качество производимых работ останется на том же уровне, но появится экономический эффект. Важно учитывать вероятностный характер факторов, включая динамику внешней среды, характеристик грунта, а также колебания стоимости строительных материалов, их транспортировки, затрат, связанных с условиями эксплуатации дорожно-строительных машин и оборудования. *Цель работы* состоит в создании методики обоснования комплектов дорожно-строительных машин и технологического оборудования, удовлетворяющих широкому спектру меняющихся условий. Задачами исследования является: создание алгоритма моделирования условий функционирования комплектов дорожно-строительных машин и технологического оборудования; логико-математическое описание способа выбора конкретных единиц техники из множества возможных вариантов; количественное эквивалентирование ограничений на ресурсы, объемы работ и последовательность их выполнения.

Результаты. Предложенная методика позволяет обосновать вариант комплекта дорожно-строительных машин и технологического оборудования и производить его корректировку (адаптацию) к меняющимся условиям выполнения работ по производству, заготовке и транспортировке материалов и конструкций, возведению земляного полотна, устройству основания, устройству асфальтобетонного покрытия. Разработанная методика также позволяет адаптировать комплект дорожно-строительных машин и механизмов не только к изменению объемов работ и техническому обеспечению строительной организации, но и к финансовым возможностям подрядчика.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что за счет создания адаптивного комплекта дорожно-строительных машин и технологического оборудования для производства работ по строительству автомобильных дорог возможно сокращение затрат на формирование, эксплуатацию и возможную адаптацию комплекта.

Ключевые слова: условия функционирования, комплект дорожно-строительных машин, технологическое оборудование, математическая модель, адаптация

Для цитирования: 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

Modeling of working conditions and selection of sets of road-building machines and processing equipment

N.A. Ermoshin¹, V.A. Borisov¹

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

Abstract: *Problem statement.* The main problem in creating sets of road-building machines and technological equipment is their narrow focus and low variability. It is necessary to develop a method for modeling the operating conditions of road machines, as a result of which the quality of the work performed will remain at the same level, but an economic effect will appear. It is important to take into account the probabilistic nature of factors, including the dynamics of the external environment, soil characteristics, as well as fluctuations in the cost of building materials, their transportation, and costs associated with the operating conditions of road-building machines and equipment. *The purpose of the work* is to create a methodology for justifying sets of road-building machines and technological equipment that satisfy a wide range of changing conditions. The objectives of the research are: creating an algorithm for modeling the operating conditions of sets of road construction machines and technological equipment; logical and mathematical description of the method for selecting specific units of equipment from a variety of possible options; quantitative equivalence of restrictions on resources, volumes of work and the sequence of their implementation.

Results. The proposed methodology makes it possible to justify the option of a set of road construction machines and technological equipment and to adjust it (adapt) to the changing conditions of work on the production, procurement and transportation of materials and structures, construction of the roadbed, foundation construction, and asphalt concrete pavement construction. The developed methodology also makes it possible to adapt a set of road-building machines and mechanisms not only to changes in the scope of work and technical support of the construction organization, but also to the financial capabilities of the contractor.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry is that by creating an adaptive set of road-building machines and technological equipment for the construction of highways, it is possible to reduce the costs for the formation, operation and possible adaptation of the set.

Keywords: operating conditions, road construction machinery set, technological equipment, mathematical model, adaptation

For citation: 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

1. Введение

Качество строительства автомобильных дорог в значительной степени зависит от правильного подбора комплектов строительных машин и технологического оборудования в целях реализации применяемых технологий и достижения требуемых технико-экономических и транспортно-эксплуатационных показателей строящихся объектов [1, 2]. К настоящему времени для транспортного строительства имеется возможность выбора машин и оборудования для дорожных работ. Поэтому возникает задача оптимизации выбора комплекта дорожно-строительных машин и технологического оборудования (далее КДСМ) с учетом их эксплуатационных свойств и условий выполнения работ. Прежде всего, это касается производительности техники и объемов работ, природно-климатических и грунтово-гидрологических условий их выполнения, технологических факторов строительства или реконструкции автомобильных дорог, требований к точности и стабильности технологических процессов производства работ [3-5].

Решение этой задачи возможно за счет совершенствования существующих и разработки новых подходов и методов обоснования КДСМ с необходимыми эксплуатационными свойствами для строительства объектов в тех или иных условиях [6-7].

В настоящее время достаточно часто используются методические рекомендации [8-9] и эмпирический метод, основанный на опыте формирования комплектов для производства строительных работ на предыдущих объектах строительства. Данные рекомендации и метод, являются, по сути, методом аналогов, не является эффективными, так как не учитывают меняющиеся условия строительства. Кроме этого, имеющийся опыт формирования КДСМ может быть недостаточен в связи с появлением новых типов машин с иными производственно-техническими характеристиками и условиями их применения [10-12]. Особенно остро эта проблема проявляется в условиях экономических санкций и необходимости импортозамещения дорожно-строительной техники. Ошибки и просчеты при создании КДСМ могут привести к значительным финансовым издержкам, вызванным простоями техники. В свою очередь отсутствие необходимых машин и технологического оборудования в составе комплектов повлечет срыв установленных сроков производства работ и ввода объектов дорожного строительства в эксплуатацию [13-14].

Известен метод формирования комплектов на основе «библиотечных» данных (типовых комплектов). При всех своих положительных свойствах, обусловленных возможностью применения блочно-модульного принципа создания КДСМ, он тоже имеет свои недостатки. Самым важным из них является то, что метод не в полной мере учитывает особенности условий строительства (геологические, климатические и др. условия).

Методы научного обоснования состава комплектов машин должны содержать алгоритмы и процедуры моделирования выбора конкретных единиц техники из множества возможных вариантов по определенному критерию с учетом стохастичности ограничений, эквивалентных условиям, структуре, объемам работ и последовательности их выполнения. Следует отметить, что стохастичностью обладают не только факторы окружающей среды (климатические, грунтовые, гидрологические условия и др.), но также и стоимость дорожно-строительных материалов и конструкций, стоимость доставки и использования машин, оборудования и механизмов, используемых при производстве дорожных работ, что способствует появлению новых видов затрат [15-16].

Указанные обстоятельства свидетельствуют о необходимости совершенствования способа формирования комплекта на основе учета условий работы дорожно-строительных машин, способных выполнять свои функции с требуемым качеством и экономичностью.

Поэтому целью работы является создание методики для наиболее точного прогнозирования эффективности применения дорожно-строительных машин в различных условиях строительства. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- создание методики, отражающей условия строительства дорог и учитывающей все особенности местности, климата и других факторов;
- выбор наиболее подходящей техники из всех имеющихся вариантов, исходя из заданных критериев (производительности, эффективности, стоимости и др.).

2. Материалы и методы

Формализация условий работы КДСМ предусматривает выявления основных факторов, влияющих на выполнение работ по строительству автомобильных дорог. В этом отношении целесообразно руководствоваться закономерностью, подмеченной Р. Акоффом: «Как правило, степень понимания явления обратно пропорциональна числу переменных, фигурирующих в его описании». Исходя из этого, для повышения эффективности применения дорожно-строительных машин при флуктуации условий их работы, эти условия целесообразно моделировать через количественные показатели требований, которым должен соответствовать состав КДСМ.

Математическая постановка задачи моделирования условий формирования и работы КДСМ может быть сформулирована следующим образом.

Пусть для выполнения какого-либо комплекса работ (устройство земляного полотна, щебеночного основания, асфальтобетонного покрытия) G_o требуется обосновать состав комплекта дорожно-строительных машин, соответствующего условиям применения (требованиям) $B=\|b_i\|$, ($i=1, \dots, n$). При этом количественные значения (эквиваленты) требований (номенклатура работ и их объемы; погодные-климатические, грунтово-геологические условия их выполнения; ресурсоемкость и др.) известны.

Выполнение комплекса работ G_o может быть выполнено с применением соответствующих дорожно-строительных машин и технологического оборудования. Существует возможность рассмотреть ограниченное множество вариантов X структурных элементов комплекта (отдельных дорожно-строительных машин и технологического оборудования) и КДСМ в целом. Варианты структурных элементов комплекта (x_{ij}) могут отличаться один от другого экономичностью c_{ij} , производительными возможностями a_{ij} , показателями стабильности и точности выполнения работ t_{ij} , и др. При этом считаются известными такие показатели качества структурных элементов или единиц x_{ij} , как надежность, безопасность, мобильность и др. Такая информация может быть получена на основе существующих нормативных данных (руководство по эксплуатации, нормативно-техническая документация), либо рассчитаны по методикам, изложенным в ГОСТ Р 27.010-2019.

Необходимо выбрать такой состав КДСМ, который позволяет выполнить дорожно-строительные работы с учетом требований $B=\|b_i\|$ при минимуме затрат на его формирование и эксплуатацию.

Логико-математическое описание этой задачи можно представить следующим образом.

Требуется найти минимум целевой функции (1):

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (1)$$

с учетом ограничений $B=\|b_i\|$:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij} x_{ij} \geq b_i, \quad (2)$$

$$t_{ij} \geq t'_{ij}, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij}^{nom} x_{ij} \geq b_n \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \geq 1, \quad (5)$$

$$x_{ij} - \text{целые числа для } \forall_{ij}, \quad (6)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad (7)$$

$$x_{ij} \leq v_{ij}, \quad (8)$$

где i – индекс вида работ КДСМ и требования к ним, реализация которого необходима при выполнении комплекса работ G_o ;

j – индекс, типа (номер варианта выбора) машины для выполнения работ i -го вида (для каждого вида работ могут применяться разные машины и технологическое оборудование);

x_{ij} – число структурных единиц (машин и технологическое оборудование) для выполнения работ i -го вида машиной j -го типа в составе КДСМ (искомые переменные);

c_{ij} – общие, приведенные к текущему моменту времени (момент принятия решения), затраты на покупку (аренду) и применение машин j -го типа для выполнения работ i -го вида в составе КДСМ;

b_i – количественный эквивалент (значение) i -го условия (требования) к комплекту КДСМ;

a_{ij} и $a_{ij}^{\text{пот}}$ – соответственно, нормативные и потенциальные производственные возможности структурной единицы КДСМ (машина, технологическое оборудование) x_{ij} , для выполнении работ при реализации условия b_i , то есть по выполнению i -го требования к КДСМ;

t_{ij} и t'_{ij} , – соответственно, фактический и требуемый показатель точности технологических процессов производства работ i -го вида структурной единицей КДСМ (машиной, технологическим оборудованием j -го типа);

v_{ij} – допустимое значение x_{ij} (ограничивается допустимым числом структурных единиц в составе КДСМ).

В передоложенной математической модели обоснования состава КДСМ целевая функция и ограничения имеют следующую сущность: целевая функция (1) позволяет рассчитать состав комплекта машин и технологического оборудования при минимуме затрат на его формирование и эксплуатацию при ограничениях, отраженных неравенствами (2-7). Их физический смысл заключается в следующем:

– ограничения (2-4) обуславливают необходимость расчета целевой функции с учетом выполнения всех требований, предъявляемых к КДСМ, и являющихся компонентами вектора $B=||b_i||$;

– ограничение (5) обеспечивает наличие в составе КДСМ не менее одной структурной единицы (машины или технологического оборудования);

– ограничения (6-7) необходимы для обеспечения целочисленности и не отрицательности переменных x_{ij} ;

– ограничение (8) позволяет избежать ситуации, при которой число структурных единиц в составе КДСМ оказывается избыточным, либо по критерию управляемости, либо по критерию обслуживания и размещения.

Однако такое логико-математическое описание задачи в наибольшей степени подходит для формирования КДСМ, отличающихся незначительным разнообразием видов выполняемых работ. Как правило, это звено. В то же время, когда количество видов работ и технологических процессов резко возрастает данная постановка задачи ввиду увеличения размерности факторного пространства, числа ограничений и переменных оказывается неприемлемой. Требуется корректировка рассмотренной задачи в целях включения в состав КДСМ машин или даже структурных элементов различного предназначения (для выполнения подготовительных, транспортных работ, устройства основания, устройства дорожного покрытия и др.). В этом случае удобно представить формирование КДСМ в виде следующей системы математических формул, соотношений и неравенств в векторной форме:

$$\begin{aligned} & CX \rightarrow \min \\ & \left\{ \begin{array}{l} AX = b \\ X \geq 0 \end{array} \right. , \end{aligned} \quad (9)$$

с учетом ограничений:

где $C = (c_1, \dots, c_n)$ – приведенные затраты на комплектование и применение структурных единиц (структурных подразделений КДСМ);

$X = (x_1, \dots, x_n)^T$ – структурные единицы (машины, технические средства, структурные подразделения);

$A=||a_{ij}||$, ($i=1, \dots, n$), ($j=1, \dots, m$) – показатели производительности, надежности, мобильности структурных единиц (структурных элементов), являющиеся коэффициентами ограничений модели (9);

(b_1, \dots, b_n) – показатели требований к составу КДСМ по выполнению дорожно-строительных работ в установленные сроки.

В целях обоснования состава КДСМ множество его вариантов X следует разбить на S подмножеств. Для этого вектор X отображается как $X = (x^1, x^2, \dots, x^k, \dots, x^S)^T$. Здесь $x^k = (x^k_1, \dots, x^k_{nk})^T$ транспонируется.

По аналогии можно представить векторы b и C в виде:

$$b = (b^0, b^1, b^2, \dots, b^k, \dots, b^S)^T,$$

$$C = (c^1, c^2, \dots, c^k, \dots, c^S)^T,$$

где $b^k = (b^k_1, \dots, b^k_{mk})^T$, $c^k = (c^k_1, \dots, c^k_{nk})^T$, $b^0 = (b^0_1, \dots, b^0_l)^T$, $k = 1, \dots, S$.

Для строительства автомобильных дорог матрица ограничений представляется как совокупность некоторых блоков A^k и D^k ($k = 1, \dots, S$) в виде (10):

$$A = \begin{pmatrix} A^1 & A^2 & \dots & A^k & \dots & A^S \\ D^1 & & & & & \\ & D^2 & & & & \\ & & \ddots & D^k & & \\ & & & & \ddots & D^S \end{pmatrix}, \tag{10}$$

где $A^k = \|a^k_{ij}\|$, ($i=1, \dots, l$), ($j=1, \dots, m_k$); $D^k = \|d^k_{ij}\|$, ($i=1, \dots, n_k$), ($j=1, \dots, m_k$).

При таком подходе модель математического программирования (9) можно записать в следующем виде (11):

минимизировать $F = C^1 X^1 + C^2 X^2 + \dots + C^k X^k + C^S X^S$;

при ограничениях:

$$A^1 X^1 + A^2 X^2 + \dots + A^k X^k + A^S X^S = b^0 D^1 X^1 = b^1 D^2 X^2 = b^2 \cdot \dots \cdot D^k X^k = b^k \cdot \dots \cdot D^S X^S = b^S, \tag{11}$$

$$X^k \geq 1, X^k \leq V^k.$$

Значение искомым переменных, ограничений и параметров этой задачи интерпретируются следующим образом:

X^k – вектор возможных вариантов состава КДСМ, которые могут подлежать сравнительному анализу в целях выбора лучшего из них по критерию затрат для выполнения k -го комплекса дорожно-строительных работ;

C^k – вектор приведенных затрат, необходимых для формирования и эксплуатации вариантов КДСМ в целях выполнения k -го комплекса работ;

D^k – вектор показателей производственных возможностей и эксплуатационных свойств, характеризующих «вклад» каждой структурной единицы КДСМ в выполнение k -го комплекса работ;

b^k – вектор объемов ограничений, накладываемых на структурную единицу (машину, технологическое оборудование), включаемую в сосав КДСМ для реализации k -го комплекса работ;

A^k – матрица показателей производственных возможностей, которые являются "вкладом" структурной единицы в выполнение k -го комплекса работ и достижение общих требований к комплекту в целом;

b^0 – вектор показателей, характеризующих выполнение требований своевременности производства работ составом КДСМ в целом;

V^k – вектор показателей, характеризующих допустимое число структурных элементов в составе КДСМ для выполнения k -го комплекса работ;

S – количество видов работ по строительству участка автомобильной дороги, требующих создания КДСМ.

После приведенных объяснений предлагается следующая форма записи задачи формирования составов КДСМ для строительства автомобильных дорог (12):

$$\left. \begin{aligned} \sum_{k=1}^S C^k X^k \xrightarrow{x} \min \\ \text{при условиях} \\ \sum_{k=1}^S A^k X^k = b^0, D^k X^k = b^k \\ X^k \geq 1, \quad X^k \leq V^k \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Предложенный подход к обоснованию состава КДСМ обеспечивает возможность построения математической модели условий выполнения дорожно-строительных работ. Моделирование условий работы дорожно-строительных машин при такой постановке задачи может быть выполнено на основе варьированию векторов общих (b^0) и независимых (b^k) ограничений, а также коэффициентов (C^k) функционала (затрат на формирование и функционирование комплектов) модели (12).

Общая структура методики моделирования условий работы КДСМ показана далее (рис. 1).



Рис. 1. Общая структура методики моделирования условий работы КДСМ (иллюстрация авторов)

Fig. 1. The general structure of the methodology for modeling the working conditions of the RBMS (illustration by the authors)

3. Результаты и обсуждение

Математическая постановка задачи моделирования условий формирования и работы комплекта дорожно-строительных машин состоит в следующем.

Имеется вектор $B = \{b^0, b^k, C^k\}$, основными элементами которого являются количественные показатели, характеризующие общие, независимые ограничения и коэффициенты функционала модели линейного программирования (12). Каждый из элементов заданного вектора $B = \|b_i\|$, $(i=1, \dots, n)$ характеризует условия работ по строительству автомобильных дорог и может принимать различные значения на отрезке $[b_{min,i}, b_{max,i}]$. Количественные значения этих условий определяют требования к составу и структуре КДСМ.

По итогам моделирования необходимо получить необходимое множество случайных сочетаний $\{M\}$ векторов $\tilde{B} = \|\tilde{b}^0, \tilde{b}^k, \tilde{C}^k\|$ исходного вектора B . При этом требуется учитывать:

а) совокупность случайных факторов, влияющих на изменения каждого элемента b_i (объемов дорожных работ и ресурсно-экономического обеспечения формирования и функционирования КДСМ);

б) синхронность (одновременность или воздействие через равные временные периоды) воздействия случайных факторов на элементы вектора B .

Решение сформулированной задачи осуществляется поэтапно.

Первый этап состоит в построении матрицы смежности в целях учета влияния факторов (условий выполнения работ) на показатели выполнения требований к КДСМ $S = \|s_{ij}\|$, $(i=1, \dots, n)$, $(j=1, \dots, l)$.

Элементы построенной матрицы отражают степень влияния факторов на показатели ограничений. На этой основе определяются матрицы $B_{max} = \|b_{max,ij}\|$ и $B_{min} = \|b_{min,ij}\|$, где $b_{max,ij}$, $b_{min,ij}$ – максимальное и минимальное возможные значения i -го показателя от воздействия j -го фактора.

Второй этап сводится к имитации случайных значений элементов заданного вектора B для каждой его компоненты. Моделирование осуществляется на основе допущения о виде функции плотности распределения случайной величины \tilde{b}_{ij} , $f(\tilde{b}_{ij})$.

Предположение о виде закона распределения $f(\tilde{b}_{ij})$ принимается в соответствии с принципом максимума энтропии. Дополнительно могут использовать результаты ранее выполненных исследований или эвристические представления о закономерностях флуктуаций случайных величин \tilde{b}_{ij} .

Если известен только интервал изменения случайной величины \tilde{b}_{ij} , то принимается равномерный закон распределения. При этом случайная величина \tilde{b}_{ij} определяется по зависимости (13):

$$\tilde{b}_{ij} = b_{ij} + \xi_{ij} (b_{ij} - b_{ij}), \quad (13)$$

где ξ_{ij} – случайное число, распределенное равномерно на отрезке $[0, 1]$.

Окончательные значения случайных компонент каждого их векторов \tilde{B} вычисляются с учетом возможности синхронного влияния на каждый b_i -ый показатель нескольких случайных независимых факторов (14):

$$\tilde{b}_i = \sum_{j=1}^l [b_{ij} + \xi_{ij} (b_{ij} - b_{ij})], \quad (14)$$

где l – количество факторов, влияющих на i -й показатель (требование).

Аналогичные преобразования с использованием известных методик можно построить и для других законов распределения.

Достаточное количество реализаций модели позволяет найти совокупность сочетаний условий формирования и функционирования КДСМ $M = \{\tilde{B}_m\}$, $(m=1, \dots, M)$. Следует отметить, что полученная в результате моделирования совокупность имеет большую размерность. Это приведет к значительным затратам времени на выполнение последующих оптимизационных расчетов состава КДСМ по модели (12). В такой ситуации целесообразно сократить число сочетаний (групп) меняющихся условий

производства дорожно-строительных работ и ресурсно-экономического обеспечения формирования и эксплуатации КДСМ до значения $N \ll M$.

На третьем этапе из поученного множества сгруппированных условий производства дорожно-строительных работ, формирования и эксплуатации КДСМ M кластеризуется заданное число однородных групп N .

С этой целью каждая полученная группа исходных данных (вектор \tilde{B}_m) множества M сравнивается друг с другом. Сравнение осуществляется посредством определения меры близости между случайными значениями \tilde{b}_{mi} сравниваемых векторов \tilde{B}_m . Вполне естественно, что однородным условиям формирования и эксплуатации (объемы финансирования, технологические ресурсы, номенклатура и объемы дорожных работ и др.) соответствуют близкие значения величин \tilde{b}_{mi} группируемых сочетаний условий $M = \{\tilde{B}_m\}$. В связи с этим объединение в группы производится так, чтобы сила взаимосвязи между сочетаниями условий внутри группы была больше, чем между сочетаниями условий в разных группах.

В качестве меры тесноты связи $d_{mm'}$ используется евклидово расстояние, между двумя сочетаниями условий \tilde{B}_m и $\tilde{B}_{m'}$ в n -мерном пространстве (n - размерность вектора B) (15):

$$d_{mm'} = \sum_{i=1}^n p_i^2 (\tilde{b}_{mi} - \tilde{b}_{m'i})^2, \quad (15)$$

где \tilde{b}_{mi} и $\tilde{b}_{m'i}$ – численные значения i -ой компоненты векторов ограничений и коэффициента функционала (C^k) в m -ой и m' -ой реализации модели;

p_i – нормирующий коэффициент i -ой компоненты (элемента вектора), определяемый нормированием пространства расстояний относительно каждой i -ой компоненты (применяется для перевода значений ограничений из абсолютных в относительные величины, т.е. для «устранения размерности»).

Последовательность группировки условий с помощью алгоритмов кластеризации начинается с того, что из общего числа сочетаний первые N сочетаний условно принимаются за центры групп и по формуле (15) вычисляется матрица попарных расстояний между ними $D^N = \|d_{mm'}\|$.

Далее последовательно рассматривается каждое из оставшихся $(M - N)$ сочетаний условий, определяется его расстояние до каждого из первых N сочетаний и выбирается наименьшее из них. Если это расстояние меньше минимального расстояния между первыми N сочетаниями, то рассматриваемое сочетание объединяется в одну группу с тем из них, к которому оно ближе расположено. В противном случае объединяются между собой два близко расположенных из первых N сочетаний, а рассматриваемое сочетание является центром новой группы. Принципиальная схема определения тесноты связей между сочетаниями условий представлена ниже (рис. 2).

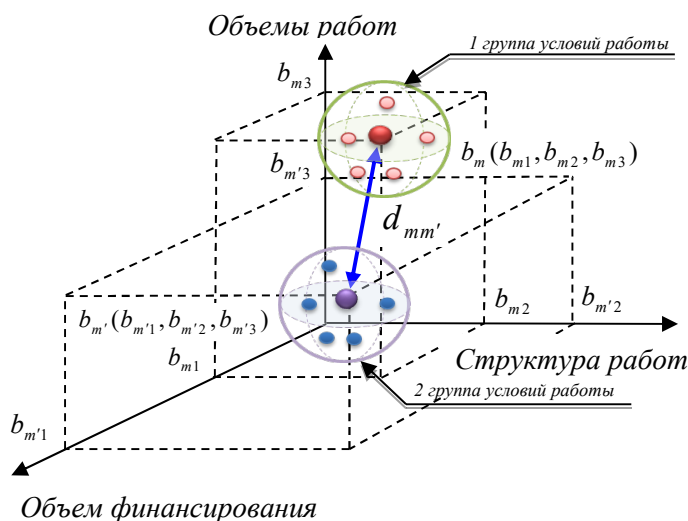


Рис. 2. Принцип определения силы связи между группами условий (иллюстрация авторов)
 Fig. 2. A schematic diagram for determining the tightness of connections between combinations of conditions (illustration by the authors)

Действия по этому алгоритму выполняются последовательно для всех $(M - N)$ сочетаний, после чего они оказываются распределенными по N группам. В качестве исходных данных для построения состава КДСМ по модели (12) используется только по одному вектору $\tilde{B}_n, (n = 1, \dots, N)$ из каждой сформированной группы.

4. Заключение

1. Предложена методика моделирования условий работы дорожно-строительных машин и технологического оборудования, отражающая условия строительства дорог и учитывающая все особенности местности, климата и других факторов. Методика заключается в имитации стохастических факторов, характеризующих условия строительства и объединении их в группы с помощью методов кластерного анализа. В отличие от имеющихся, методика позволяет учитывать особенности строительства дорог, обусловленные их линейной протяженностью и необходимостью выполнения работ в разных природно-климатических, грунтово-геологических и ресурсно-экономических условиях. Разработка методики обеспечивает возможность повышения эффективности подбора состава комплектов дорожно-строительных машин и их адаптации к меняющимся условиям производства дорожно-строительных работ.

2. Обоснована постановка задачи выбора состава комплектов дорожно-строительных машин, включая логико-математическое описание процесса ее решения. Для решения задачи используется метод декомпозиции (блочного линейного программирования). При этом в качестве общих ограничений задачи выступают ресурсы. Частными ограничениями являются объемы, структура дорожно-строительных работ и условия их выполнения. Варианты и количество структурных элементов КДСМ представляют собой управляемые переменные, а затраты на них исполняют значение коэффициентов целевой функции. Это позволяет выбрать состав комплектов дорожно-строительных машин, удовлетворяющих широкому спектру меняющихся условий работы, по критерию оптимизации затрат не только на их формирование, но и адаптацию.

Список литературы/References

1. Абдулаев М.Н., Омаров А.З., Расулова А.П., Ахмедова С.А. Обоснование рациональной области использования взаимозаменяемых машин на строительстве или ремонте дорожных объектов // Транспортное дело России, №5. 2023. С. 226-231. DOI: 10.52375/20728689_2023_5_226 [Abdulaev M.N., Omarov A.Z., Rasulova A.P., Akhmedova S.A. Rationale for the rational use of interchangeable machines in the

- construction or repair of road facilities // *Transport Business of Russia*, No. 5. 2023. P. 226-231. DOI: 10.52375/20728689_2023_5_226]
2. Гарманов, Е.М., Метод моделирования эксплуатационных характеристик строительных и дорожных машин // *Повышение эффективности дорожного хозяйства в условиях интенсивной автомобилизации страны: сб. науч. тр. МАДИ(ГТУ)*. - М.: Изд-во МАДИ(ГТУ), 2006.- С. 23-36 [Garmanov, E.M., Method for modeling the operational characteristics of construction and road machines // *Improving the efficiency of road management in the conditions of intensive motorization of the country: collection of scientific works. MADI (GTU)*. - M.: Publishing house MADI (GTU), 2006.- P. 23-36.]
 3. Arzu Uzun, Ahmet Ozdogan, (2012) "Maintenance parameters based production policies optimization", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 18 Issue: 3, P.295-310,. DOI: 10.1108/13552511211265884 .
 4. Габдуллин Т.Р. Разработка обучающих тренажеров дорожно-строительных машин // *Техника и технология транспорта*. 2018. №4(9). С. 2. [Gabdullin T.R. Development of training simulators for road construction machines // *Equipment and technology of transport*. 2018. No. 4(9). P. 2.]
 5. Габделхаев Р.Р., Габдуллин Т.Р. Автоматизация дорожно-строительной техники // *Техника и технология транспорта* №4 (15). 2019 [Gabdelkhaev R.R., Gabdullin T.R. Automation of road construction equipment // *Transport technology and technology* No. 4 (15). 2019.]
 6. Efimenko V., Efimenko S., Sukhorukov A. Features of road-climatic zoning of territories // *MATEC Web of Conferences* 143, 01012. 2018. DOI: 10.1051201814301012
 7. Efimenko V., Efimenko S., Sukhorukov A., Yankovskaya A. Application of information systems in road-climatic zoning // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* DOI: 10.1088/1757-899X/71/1/012049
 8. Методические рекомендации по выбору рациональных комплектов машин и технологии скоростного строительства земляного полотна в сложных инженерно-геологических условиях МССР – Введ. 20.08.1986 г. – Москва: СоюздорНИИ, 1986. – 47 с. [Methodological recommendations for the selection of rational sets of machines and technology for high-speed construction of roadbeds in the difficult engineering and geological conditions of the MSSR – Int. 08/20/1986 - Moscow: SoyuzdorNII, 1986. - 47 p.]
 9. Методические рекомендации по комплектованию парка машин для текущего ремонта и содержания автомобильных дорог – Введ. 18.02.1974 г. – Москва: ГИПРОДОРНИИ, 1976 – 179 с. [Methodological recommendations for creating a fleet of vehicles for routine repairs and maintenance of highways - Intro. 02/18/1974 - Moscow: GIPRODORNII, 1976 - 179 p.]
 10. Янковская А. Е., Аметов Р. В. Интеллектуальная система для поддержки принятия решений по дорожно-климатическому районированию // *Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине*. 2017. С. 36-40 [Yankovskaya A. E., Ametov R. V. Intelligent system for supporting decision-making on road climate zoning // *Information technologies in science, management, social sphere and medicine*. 2017. P. 36-40.]
 11. Баловнев В. И., Данилов Р. Г., Селиверстов Н. Д. Выбор транспортно-технологических машин // *Наука и техника в дорожной отрасли*. 2018. № 2. С. 38-41 [Balovnev V.I., Danilov R.G., Seliverstov N.D. Selection of transport and technological machines // *Science and technology in the road industry*. 2018. No. 2. P. 38-41.]
 12. Ченсов Р.Р., Мухаметшина Р.М. Улучшение долговечности и качества автомобильных дорог // *Техника и технология транспорта*. 2022. №3 (26). С. 3 [Chensov R.R., Mukhametshina R.M. Improving the durability and quality of highways // *Equipment and technology of transport*. 2022. No. 3 (26). P. 3]
 13. Мухаметшина Р. М. Обеспечение безопасности при эксплуатации дорожно-строительных машин // *Вестник НЦ БЖД*. 2017. № 4 (34). С. 93-96

- [Mukhametshina R. M. Ensuring safety during the operation of road-building machines // Bulletin of the Scientific Center of Belarusian Railways. 2017. No. 4 (34). P. 93-96.]
14. Nils Rinke, Volker Berkhahn, Ingo Neumann, Flitz Berner. Simulating quality assurance and efficiency analysis between construction management and engineering geodesy // Science Direct magazine. 2017. № 76. P. 24-35.
 15. Lamond J. Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials. West Conshohocken: ASTM International Press, 2018. 655 p.
 16. Efimenko S., Efimenko V., Sukhorukov A. Peculiarities of strength and deformability properties of clay soils in districts of Western Siberia // AIP Conference Proceedings 1698, 070020. 2016. DOI: 10.1063/1.4937890

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