

Научная статья

УДК 630*383

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-156-172

Расчет величины задела при строительстве лесовозных автомобильных дорог

М.В. Мащнев¹, преподаватель; ResearcherID: [AAG-1713-2019](https://orcid.org/0000-0002-5984-7033),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5984-7033>

Н.Г. Пономарева², канд. техн. наук; ResearcherID: [A-5693-2019](https://orcid.org/0000-0001-6210-5631),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6210-5631>

О.Н. Тверитнев¹, преподаватель; ResearcherID: [AAE-1352-2021](https://orcid.org/0000-0002-8183-0393),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8183-0393>

П.В. Тихомиров³, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [E-3104-2019](https://orcid.org/0000-0003-4708-0645),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4708-0645>

Д.М. Левушкин⁴, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAS-4522-2021](https://orcid.org/0000-0002-4787-6371),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4787-6371>

А.Н. Брюховецкий¹, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAF-6930-2021](https://orcid.org/0000-0003-3247-3411),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3247-3411>

¹Воронежский государственный университет инженерных технологий, просп. Революции, д. 19, г. Воронеж, Россия, 394036; m.matsnew@yandex.ru, tveritneffo@yandex.ru, bruhoveckiy@rambler.ru

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; n.ponomareva@narfu.ru

³Брянский государственный инженерно-технологический университет, просп. Станке Димитрова, д. 3, г. Брянск, Россия, 241037; vtichomirov@mail.ru

⁴Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141005; levushkin@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 05.05.21 / Одобрена после рецензирования 08.08.21 / Принята к печати 14.08.21

Аннотация. Формализованное описание процесса строительства, включающее перечень работ, порядок их выполнения, характеристику взаимосвязей между работами, особенности технологии ведения работ, реализуется в организационно-технологических моделях. Наиболее полное математическое описание имеют сетевые модели. Однако у сетевого моделирования строительного потока есть серьезные недостатки. С помощью сетевой модели можно достаточно точно отобразить только взаимосвязь специализированных дорожных потоков при расчленении объекта на участки, равные по величине сменным захваткам. Такие графики эффективны при планировании дорожных работ и оперативном управлении ими в небольшом плановом периоде (декаде, месяце). При укрупнении сетевой модели для перспективного планирования потока нарушается адекватность отображения реального строительного процесса. В разрабатываемых в настоящее время так называемых обобщенных сетевых моделях совмещение процессов и обеспечение их непрерывности достигаются введением связей между работами, которые характеризуются временными параметрами, принимающими любые, в том числе отрицательные значения. Сложность математического описания этих моделей затрудняет их использование при решении оптимизационных задач. Цель – разработка математической модели и алгоритма расчета оперативного регулирования задела при строительстве лесовозных автомобильных дорог. Предложена модель

© Мащнев М.В., Пономарева Н.Г., Тверитнев О.Н., Тихомиров П.В., Левушкин Д.М., Брюховецкий А.Н., 2022

Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

комплексного объектного потока, в которой дискретный характер имеет время работы потока. Это условие реализуется в модели путем деления планового периода работы комплексного потока на равные промежутки времени – интервалы планирования. На основе классификационной схемы задач календарного планирования, а также анализа существующих экономико-математических моделей и методов можно дать следующую характеристику модели комплексного дорожно-строительного потока: модель календарного планирования, разрабатываемая с целью определения оптимальных заделов по элементам дорожной конструкции, является детерминированной (на 1-й стадии), дискретной во времени технологической моделью, в терминах «объемов» – с переменными скоростями ведения работ.

Ключевые слова: лесовозная автомобильная дорога, задел, модель дорожно-строительного потока, алгоритм расчета задела, проектирование лесовозных дорог

Для цитирования: Мацнев М.В., Пономарева Н.Г., Тверитнев О.Н., Тихомиров П.В., Левушкин Д.М., Брюховецкий А.Н. Расчет величины задела при строительстве лесовозных автомобильных дорог // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 4. С. 156–172. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-156-172>

Original article

Calculating the Groundwork Volume for the Construction of Logging Roads

Maksim V. Matsnev¹, Lecturer; ResearcherID: [AAG-1713-2019](https://orcid.org/0000-0002-5984-7033),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5984-7033>

Natalia G. Ponomareva², Candidate of Engineering; ResearcherID: [A-5693-2019](https://orcid.org/0000-0001-6210-5631),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6210-5631>

Oleg N. Tveritnev¹, Lecturer; ResearcherID: [AAE-1352-2021](https://orcid.org/0000-0002-8183-0393),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8183-0393>

Petr V. Tikhomirov³, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [E-3104-2019](https://orcid.org/0000-0003-4708-0645), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4708-0645>

Dmitry M. Levushkin⁴, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAS-4522-2021](https://orcid.org/0000-0002-4787-6371), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4787-6371>

Andrei N. Briukhovetskii¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAF-6930-2021](https://orcid.org/0000-0003-3247-3411), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3247-3411>

¹Voronezh State University of Engineering Technologies, prosp. Revolyutsii, 19, Voronezh, 394036, Russian Federation; m.matsnev@yandex.ru, tveritneffo@yandex.ru, bruhoveckiy@rambler.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; n.ponomareva@narfu.ru

³Bryansk State Engineering and Technology University, prosp. Stanke Dimitrova, 3, Bryansk, 241037, Russian Federation; vtikhomirov@mail.ru

⁴Mytischki Branch of Bauman Moscow State Technical University, ul. 1-ya Institut'skaya, 1, Mytischki, Moscow Region, 141005, Russian Federation; levushkin@mgul.ac.ru

Received on May 5, 2021 / Approved after reviewing on August 8, 2021 / Accepted on August 14, 2021

Abstract. Organizational and engineering models provide a formalized description of the construction process, including a list of operations, their sequence, description of the relationship between the operations, and the features of the work technology. Network models



have the most complete mathematical description. However, a number of authors in their works point to serious shortcomings inherent in the network modeling of construction flow. The network model allows displaying accurately enough only the relationship of specialized traffic flows when the object is divided into sections equal in size to interchangeable grips. Such schedules are quite effective in planning and operational management of road works in a short planning period (decade or month). The adequacy of the real construction representation is violated when the network model is enlarged for long-term planning of the flow. The currently developed so-called generalized network models achieve process combination and continuity by introducing links between the operations, characterized by temporal parameters assuming any values, including negative values. However, the complexity of the mathematical description of these models still prevents their use in solving optimization problems. The research aims at developing a mathematical model and an algorithm for calculating the operational control of the groundwork volume during the construction of logging roads. A model of a complex object flow is proposed, where the flow operation time has a discrete nature. This condition is realized in the model by dividing the planned operation period of a complex flow into equal time intervals – scheduling intervals. The below described model of complex road construction flow can be presented on the basis of the scheduling task classification scheme and the analysis of existing economic and mathematical models and methods. The scheduling model developed for the purpose of determining the optimal groundwork for the road construction elements is a deterministic (at the 1st stage), discrete in time, engineering model with variable speeds of operations.

Keywords: logging road, groundwork, road construction flow model, calculation algorithm of groundwork, design of logging roads

For citation: Matsnev M.V., Ponomareva N.G., Tveritnev O.N., Tikhomirov P.V., Levushkin D.M., Briukhovetskii A.N. Calculating the Groundwork Volume for the Construction of Logging Roads. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 4, pp. 156–172. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-156-172>

Введение

Вопрос о расширении производства дорожных работ в зимнее время в значительной степени зависит от правильного планирования этих работ, заранее проведенной тщательной подготовки соответствующих заделов по земляному полотну, обеспечивающих базу для последующих работ. Определение рациональных производственных заделов требует применения аппарата математического моделирования. Теоретические основы поточного метода строительства рассматривались Афанасьевым В.А., Будниковым М.С., Курьяновым В.К., Рыбальским В.И., Макеевым В.С., Филахтовым А.Л. и др.

Цель исследования – разработка математической модели и алгоритма расчета оперативного регулирования задела при строительстве лесовозных автомобильных дорог в случае поточного производства дорожно-строительных работ при заданном директивном сроке и с учетом климатических факторов района лесозаготовок, имеющихся производственных мощностей строительства.

Формализованное описание задачи включает следующие допущения.

1. Указывается объем ввода лесовозной автомобильной дороги (км) по годам строительства.

2. В период планирования от 2 лет и более формализованное описание обеспечивает непрерывность планирования работы и позволяет судить о величине и структуре заделов в году, предшествующем году с плановым задани-

ем по вводу, а также о работах, которые необходимо выполнить в плановом году для обеспечения своевременного ввода лесовозной автомобильной дороги в году, следующем за плановым. При этом в расчетный период планирования включается год, предшествующий 1-му году с плановым заданием по вводу. В расчетный период будет входить 2 года выполнения работ без их полного завершения. Охват плановым периодом нескольких лет не отменяет общности постановки задачи при расчете работы потока в течение года.

3. Пусковые комплексы планируемого годового ввода определяются по каждому расчетному году.

4. Плановый период разбит на равные промежутки времени – интервалы планирования. Выбор интервалов планирования зависит от уровня разработки плана (проект организации строительства, проект производства работ) и от принятой в строительной организации формы оперативного планирования и учета (декадная, недельная).

5. Нормативная и сменная производительности всех специализированных потоков (км/смена) определяются по технологическим картам. Сменная производительность потока по возведению земляного полотна (км) является переменной величиной. Она зависит от объема земляных работ на каждом километре лесовозной автомобильной дороги.

Сменные производительности потоков по устройству основания приняты постоянными и соответствующими участкам лесовозной автомобильной дороги. Изменение производительности может быть вызвано сменой конструкции дорожной одежды, технологии выполняемых работ, а в некоторых случаях изменением среднего расстояния перевозки основных материалов.

6. Влияние метеорологических и организационных факторов на строительный процесс учитывается с помощью коэффициентов продуктивности потока K_1 , условий работы потока K_2 и сменности потока $K_{см}$. Коэффициент продуктивности потока определяет соотношение рабочих и календарных дней в плановом интервале. Коэффициент K_1 принимает значения: $0 \leq K_1 \leq 1$. Если $K_1 = 0$, то работы специализированным потоком в этой декаде не ведутся по технологическим ограничениям (ограниченность строительного сезона по климатическим факторам) и для этого потока вводится ожидание календарного периода, когда $K_1 > 0$.

Коэффициент условий работы K_2 характеризует изменение нормативной сменной производительности потока в отдельные периоды. Для дорожно-строительных работ, выполняемых в зимнее время, данный коэффициент вводится к значениям нормативной производительности в зависимости от принадлежности района строительства к температурным зонам и группе работ. В целях усредненного учета влияния на производительность труда перерывов на обогрев в течение рабочего дня табличное значение коэффициента условий работы увеличивается на 10 %. Изменение нормативной сменной производительности потока в летний строительный сезон может быть обусловлено организационными причинами. Коэффициент $K_2 = 0$ в случае организационных перерывов в работе потока, перебазирования машин и т. д.

Значения коэффициентов K_1 , K_2 , $K_{см}$ задаются в виде матрицы. В строках матрицы перечислены плановые интервалы года, в столбцах – технологические потоки, на пересечении столбца и строки – значение соответствующего коэффициента.

7. Расчет потоков искусственных сооружений, линейных зданий, мостов и сосредоточенных земляных работ предусмотрен по отдельным графикам и не включается в настоящую модель. Сроки выполнения этих работ должны назначаться таким образом, чтобы обеспечить непрерывность линейных технологических потоков. Нумерация потоков принята в соответствии с технологической последовательностью производства работ: 1-й – возведение земляного полотна, 2-й – устройство слоев основания, 3-й – устройство покрытия.

8. Предлагаемая организационно-технологическая модель после выполнения зимних работ специализированным потоком, если нет технологических ограничений ($K_1 \neq 0$), весной, после оттаивания сооруженных зимой конструкций, перед выполнением работ следующим потоком предусматривает дополнительную работу, а в случае необходимости доуплотнение и достройку отдельных слоев, положенных зимой. Состав этих работ и их сменная производительность определяются по технологическим картам достройки. В модели учтено, что при строительстве i -го конструктивного слоя в зимний период происходит перекрытие предшествующего ($i - 1$)-го слоя, а готовность i -го слоя для строительства последующего ($i + 1$)-го будет обеспечена только в летний строительный сезон, после производства дополнительных работ.

9. Директивный срок строительства задается как номер интервала планирования, до которого должно быть закончено строительство завершающего конструктивного элемента дороги с осуществлением ее ввода в эксплуатацию. Если эта дата не прописана, то директивным сроком считается последний интервал планирования в завершеном году планового периода, когда для последнего потока каждый из коэффициентов продуктивности и условия работы не равен нулю.

Объекты и методы исследования

Экономико-математическая модель задачи состоит из следующих основных элементов.

Исходные данные. Технологические ограничения и организационные требования: $T = (1, t)$ – плановый период строительства; $j = 1, 2, \dots, t$ – порядковый номер интервала планирования; $T_{\text{пр}}, T_1, T_2$ – годы планового периода (год, предшествующий 1-му году с плановым вводом; 1-й год с плановым вводом; 2-й год с плановым вводом соответственно); t – количество интервалов в плановом году; $i = 1, 2, \dots, m$ – порядковый номер специализированного потока; h_{i1}, h_{i2} – соответственно интервалы начала и конца летнего строительного сезона; $b = 1, 2, \dots, B$ – порядковый номер километра дороги; $s^{\text{н}} - s^{\text{к}}$ – участки сосредоточенных земляных работ, исключаемые из расчета специализированного потока; $E_{i,(i+1)}$ – минимальный организационно-технологический разрыв между i -м и $(i + 1)$ -м потоками, км; d_b – объем земляных работ на b -м километре, м³; $k_{1ij}, k_{2ij}, k_{\text{см}ij}$ – соответственно коэффициенты продуктивности, условия работы потока, сменности i -го потока в j -м интервале; λ – коэффициент, учитывающий незавершенность работ в зимний период; ε – доля потребности в машиносменах при выполнении работ зимнего периода в общей потребности машиносмен данного механизма при выполнении всего объема работ специализированным потоком на 1 км.

Нормативные и стоимостные характеристики: C_z – сметная стоимость z -го комплекса; $p_i(\Delta b)$ – сметная стоимость 1 км на участке Δb , выполненного потоком; $a_i^x(\Delta b)$ – требуемое количество машино-смен машин x -й группы на 1 км i -го потока на участке Δb ; $\beta_i^{\varphi}(\Delta b)$ – нормативный расход материалов φ -й группы на 1 км i -го потока на участке Δb .

Показатели, характеризующие возможности дорожно-строительной организации: $Y_i(\Delta b)$, $Y_i^n(\Delta b)$ – нормативная сменная производительность i -го потока на участке Δb и в период достройки после зимнего строительства соответственно, км; $d_c(\Delta b)$ – сменная производительность i -го потока по строительству землеполотна, м³.

Ограничения на сроки ввода: L_1, L_2 – соответственно план ввода дороги T_1 и T_2 в году, км; $z = 1, 2, \dots, z$ – пусковые комплексы; $T^{\text{дир}}$ – директивный срок строительства (номер интервала планирования).

Неизвестные: I_i^h, I_i^k – соответственно начало и завершение работы i -го потока в плановый период; q_{ij}, Q_{ij} – объемы работ, выполненных i -м потоком в j -м интервале и на конце j -го интервала соответственно, км.

Целевая функция.

При $\tau = 1, 2, \dots, (T^{\text{дир}} - I_i^h)$; $i = 1, 2, \dots, n - 1$; $j = 1, 2, \dots, t$ имеет вид

$$F = \sum_i \sum_j q_{ij} p_i [T^{\text{дир}} - I_i^h - \tau].$$

Анализ целевой функции позволяет сделать вывод, что ее минимальное значение достигается при минимизации разности между директивным сроком строительства и сроками начала работ специализированных потоков, т. е. при $F = \sum_i (T^{\text{дир}} - I_i^h) \rightarrow \min$.

Система ограничений задачи. Ограничения задачи характеризуют взаимосвязь элементов задачи и выражаются в виде неравенств:

$$I_i^h \leq I_i^k; \tag{1}$$

$$I_n^k \leq T^{\text{дир}}; \tag{2}$$

$$t \leq I_n^h \leq 2t. \tag{3}$$

$$\sum_{j=I_i^h}^{j=2t} q_{nj} = L_1; \quad \sum_{j=2t+1}^{j=3t} q_{nj} = L_2; \tag{4}$$

$$L = L_1 + L_2; \quad \sum_{j=I_i^h}^{j=I_i^k} q_{nj} = L; \tag{5}$$

При $l = \max[I_i^h, \dots, t]$

$$\sum_{j=\max(I_i^h, h_1)}^{j=\min(l, h_2)} q_{ij} - \sum_{j=I_{i+1}^h}^{j=l} q_{(i+1)j} \geq E_{i,(i+1)}. \tag{6}$$

При $l = \max [I_i^h, (t + 1), \dots, 2t]$

$$\sum_{j=\max(I_i^h, h_1)}^{j=\min(l, h_2)} q_{ij} + \sum_{j=\max[I_i^h, (t+h_1)]}^{j=\min(l, (t+h_2))} q_{ij} - \sum_{j=I_{i+1}^h}^{j=l} q_{(i+1)j} \geq E_{i,(i+1)}.$$

$$\text{При } l = \max [I_i^n(2t+1), \dots, 3t]$$

$$\sum_{j=\max(I_i^n, h_1)}^{j=\min(l, h_2)} q_{ij} + \sum_{j=\max[I_i^n, (t+h_1)]}^{j=\min[l, (t+h_2)]} q_{ij} + \sum_{j=\max[I_i^n, (2t+h_1)]}^{j=\min[l, (2t+h_2)]} q_{ij} - \sum_{j=I_{i+1}^n}^{j=l} q_{(i+1)j} \geq E_{i, (i+1)}.$$

Ограничение (3) означает, что последний n -й поток по строительству должен начать работу не раньше 1-го года с плановым заданием по вводу. Ограничение (4) обеспечивает выполнение планового ввода по годам строительства. Условие (5) предусматривает выполнение каждым потоком полного объема работ планового периода. Ограничение (6) является интерпретацией основного принципа взаимодействия работ в моделях объемного типа. Объем работ, выполненных на конец каждого планового интервала в предшествующий период, должен быть больше (или равен) объема работ, выполненных на конец соответствующего интервала следующим потоком, на величину минимального организационно-технологического разрыва. Этим ограничением определяются также условия производства работ, связанные с их сезонным характером.

По технологии нижний слой конструкции, возводимый зимой, может быть окончательно подготовлен и перекрыт верхним слоем только в летний строительный сезон. Верхний слой может и зимой перекрывать нижний, построенный в летнее время. Эти особенности дорожной технологии учитываются в ограничении (6) при суммировании объемов предшествующего потока только по интервалам строительного сезона, а для последующего потока – по всем интервалам (рис. 1).

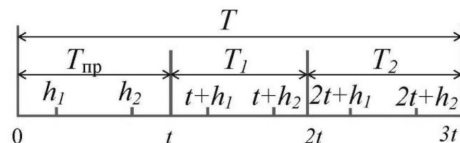


Рис. 1. Схема компоновки интервалов в плановый период

Fig. 1. Layout scheme of intervals in the planning period

Сформированная модель задачи. Она представляет собой динамическую систему, т. е. систему, находящуюся в каждый момент времени t (из множества T) в одном из возможных состояний W_i (из множества W), способную переходить (во времени) из одного состояния в другое под действием внешних и внутренних причин.

Исследования последних лет показали ограниченность применения методов линейного и целочисленного программирования для решения динамических задач календарного планирования [3, 4, 7, 10, 12, 14]. Эти методы наиболее эффективны при рассмотрении производства в статике. Использование методов динамического программирования при решении задач оперативно-календарного планирования также не дает приемлемых для практики результатов [2, 5, 6]: для большинства практических задач календарного планирования или отсутствует достаточно полное математическое описание, или сложность математической формулировки не позволяет легко найти эффективные аналитические методы решения. Это характерно и для настоящей задачи. Ее решение зависит от многих внешних и внутренних факторов, трудно поддается математическому описанию. В частности, математическое выражение процесса достройки после зимнего периода работ значительно снижает возможность аналитического решения.

Более перспективными для решения календарных задач, имеющих сложную «комбинаторную» структуру, оказываются разрабатываемые в нашей стране и за рубежом различные приближенные, так называемые эвристические методы, представляющие собой набор правил конструирования, сравнения, анализа и отбора вариантов возможных решений, берущие свое начало от вычислительных схем динамического программирования и восходящие до интеллектуальных информационных систем [1, 8, 9, 11, 13, 20].

Результаты исследования и их обсуждение

В разработанной эвристической программе, осуществляются направленный перебор вариантов по срокам начала каждого специализированного потока и пошаговая оптимизация процесса по заданному критерию. Перебор определяет минимизирующую целевую функцию вариант с наиболее поздним в соответствии со сроками началом работ.

Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.

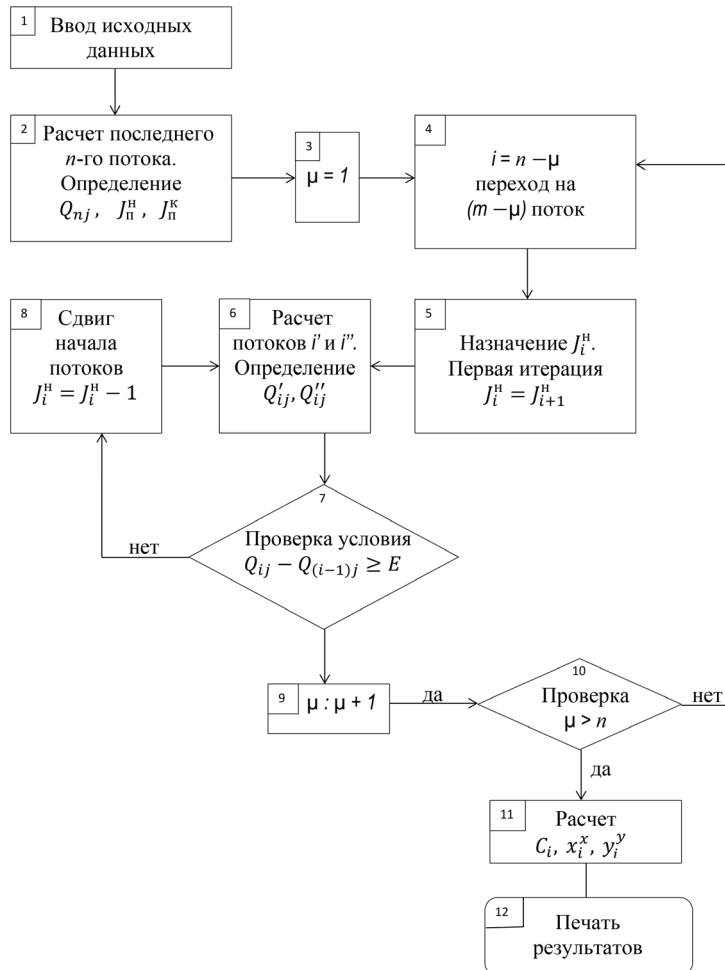


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета комплексного объектного потока

Fig. 2. Algorithm block diagram for calculating the complex object flow

Расчет модели начинаем с последнего n -го потока по формулам:

$$q_{ij} = Y_i (\Delta b) k_{1ij} k_{2ij} D_k k_{cmij};$$

$$Q_{ij} = Q_{i(j-1)} + q_{ij},$$

где D_k – количество календарных дней в интервале планирования.

Определяем I_n^H и I_n^K в соответствии с ограничениями (1)–(5).

Принимаем, что $\mu = 1$ и переходим к расчету предшествующего $(n - 1)$ -го потока. Назначаем декаду начала $(n - 1)$ -го потока из условия $I_{n-1}^H = I_n^H$ и производим расчет $(n - 1)$ -го потока. Расчет всех потоков, предшествующих n -му, при сезонном производстве работ осуществляется аналогично. Для учета особенностей круглогодичной организации работ и оптимизации сезонных заделов разработана схема расчета по 2 условным потокам (рис. 3).

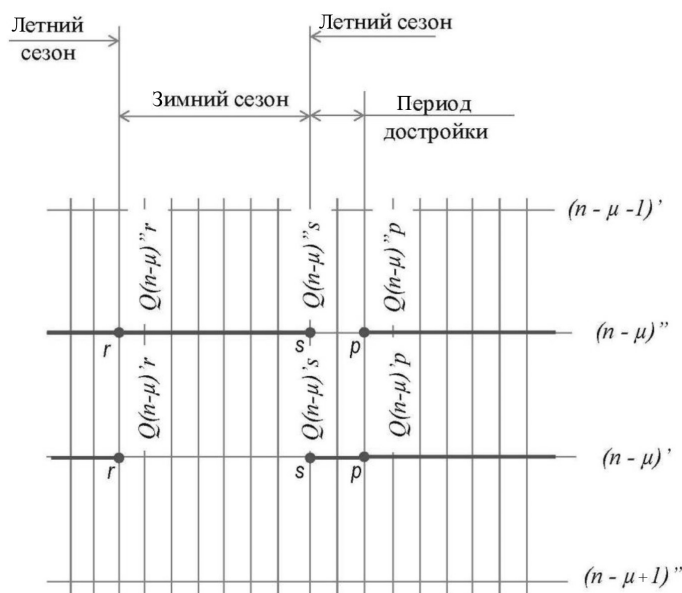


Рис. 3. Расчет потока при круглогодичной работе: поток $(n - \mu)'$ – круглогодичная работа; поток $(n - \mu)''$ – строительство и достройка в летний сезон

Fig. 3. Flow calculation for year-round operation: flow $(n - \mu)'$ – year-round operation; flow $(n - \mu)''$ – construction and completion in summer season

По потоку $(n - \mu)''$ определяется потребность в предшествующем $(n - \mu - 1)'$ слое, по потоку $(n - \mu)'$ – готовность $(n - \mu)$ -го слоя для строительства $(n - \mu + 1)''$.

Пусть r, s, p – фиксированные номера интервалов в порядке возрастания. При $r < j < s$ – зимний период, при $s < j < p$ – период достройки после зимнего периода, т. е.

$$K_{1(n-\mu)j} = \begin{cases} 0, & \text{если } r < j < s; \\ 0 < K_{1(n-\mu)j} \leq 1, & j < r; \\ j > s. & \end{cases}$$

Принят следующий порядок расчета:

$$Q_{(n-\mu)'' , r} = Q_{(n-\mu)' , r} ;$$

$$Q_{(n-\mu)' , r} = Q_{(n-\mu)' , s} ;$$

$$Q_{(n-\mu)'' , s} = Q_{(n-\mu)'' , r} + \sum_{j=r}^{j=s} q_{(n-\mu)'' , s} .$$

При $s < j < p$ – период достройки со сменной производительностью $Y_{n-\mu}^{\text{д}}$:

$$Q_{(n-\mu)' , p} = Q_{(n-\mu)'' , s} = Q_{(n-\mu)'' , p} .$$

При расчете потока по строительству землеполотна ($i = 1$) сменная производительность потока Y_1 (км) зависит от объема земельных работ (м^3) на каждом километре и рассчитывается по схеме, приведенной на рис. 4.

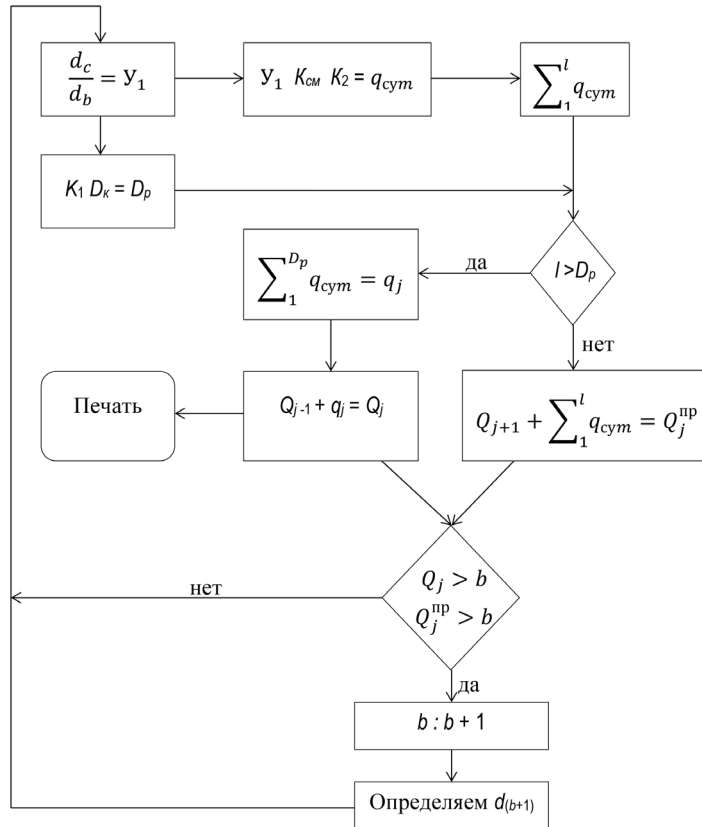


Рис. 4. Блок-схема расчета потока по строительству земляного полотна: Q_j^{np} – промежуточный объем внутри j -го интервала нарастающим потоком; $q_{\text{сут}}$ – объем работ, выполненных за сутки, км; l – рабочие сутки j -го интервала; D_p – количество рабочих дней

Fig. 4. Block diagram of flow calculation for the roadbed construction: Q_j^{np} – intermediate volume within the j -th interval by increasing flow; $q_{\text{сут}}$ – volume of works performed per day, km; l – working day of the j -th interval; D_p – number of working days

Начало работы $(n - \mu)$ -го потока определяется при условии выполнения ограничения (6):

$$I_{(n-\mu-1)}^H - I_{(n-\mu+1)}^H \rightarrow \min \text{ при } Q_{(n-\mu)j}' - Q_{(n-\mu+1)j}'' \geq E_{(n-\mu),(n-\mu+1)}.$$

Для $(n - \mu - 1)$ -го потока $I_{(n-\mu-1)}^H$ находится при условии, когда

$$I_{(n-\mu-1)}^H - I_{(n-\mu)}^H \rightarrow \min \text{ при } Q_{(n-\mu-1)j}' - Q_{(n-\mu)j}'' \geq E_{(n-\mu-1),(n-\mu)}.$$

Если ограничение (6) при расчете потока не выполняется, переходим к блоку 8. Начало потока уменьшается на 1 интервал – далее к блоку 6. Если ограничение (6) выполнено, переходим к блоку 9 и увеличиваем μ на 1, переходим на поток $(n - \mu - 1)$. Проверяем, все ли потоки рассчитаны. Если нет, обращаемся к блоку 4 и повторяем расчет. Если да, двигаемся к блоку 11 и по полученному оптимальному варианту производим расчет суммарного объема незавершенного строительного производства в плановый период C_j (тыс. р), количества машино-смен машин x -й группы в j -м интервале X_j^x и материалов ϕ -й группы в j -м интервале Y_j^ϕ :

$$C_j = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} - C_z;$$

$$X_j^x = q_{ij} \alpha_i^x;$$

$$Y_j^\phi = q_{ij} \beta_i^\phi,$$

где c_{ij} – сметная стоимость работ, выполняемых i -м потоком в j -м интервале, тыс. р, c_{ij} принимает значения $c_{ij}^{\text{лет}}$, $c_{ij}^{\text{зим}}$, $c_{ij}^{\text{дост}}$ – сменные стоимости работ, выполняемые i -м потоком в j -м интервале соответственно летнего строительного сезона, зимнего и в период достройки конструкции. Эти величины находятся по формулам: $c_{ij}^{\text{лет}} = q_{ij} p_i (\Delta b)$; $c_{ij}^{\text{зим}} = q_{ij} p_i (\Delta b) \lambda$; $c_{ij}^{\text{дост}} = q_{ij} p_i (\Delta b) \cdot 1 - \lambda$.

Последнее, 12-е действие алгоритма, предполагает печать календарного плана производства работ, определение оптимальных сроков их начала для специализированных потоков. Разница объемов работ (км) между смежными потоками в каждом интервале позволяет судить о величине, структуре и динамике изменения заделов.

В матрице календарного графика значений Q_{ij} для каждого интервала приводятся минимальные допустимые объемы работ, выполняемых предшествующим потоком, чтобы не вызвать задержки последующего потока ($Q_{ij\min}$). Они определяются из условия минимальных организационно-технологических разрывов между смежными потоками на конец каждого интервала. На последнем n -м потоке $Q_{nj\min} = Q_{nj}$, на каждом последующем $Q_{ij\min} = Q_{(i+1)j} + E_{i,(i+1)}$.

В связи с сезонным характером работ производится корректировка минимальных объемов. Объем, равный $Q_{ij\min}$ на конец сезонного перерыва в работе потока, должен быть выполнен к началу этого перерыва. Соответственно корректируются и предшествующие объемы с учетом заданной скорости потока и определяются значения $Q_{ij\min}'$ в порядке, противоположном технологической последовательности производства работ. Пример расчета приведен в таблице.

Фрагмент из расчета календарного графика производства работ в матричной форме
A fragment from the schedule calculation of works in matrix form

Показатель	Номер интервала												
	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
$i = n = 4$													
$K_{1, 4, j}$	0	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
$Q_{4, j}$	0	0,7	1,4	2,2	3,0	3,8	4,7	5,6	6,5	7,4	8,3	9,2	10,1
$Q_{4, jmin}$	0	0,7	1,4	2,2	3,0	3,8	4,7	5,6	6,5	7,4	8,3	9,2	10,1
$Q'_{4, jmin}$	0	0,7	1,4	2,2	3,0	3,8	4,7	5,6	6,5	7,4	8,3	9,2	10,1
Резерв r	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$i = 3$													
$R_{1, 3j}$	0	0	0	0	0	0	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
$Q_{3, j}$	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	6,8	8,5	10,2	11,9	13,6	15,3	17,0
$Q_{3, jmin}$	0	1,2	1,9	2,7	3,5	4,3	5,2	6,1	7,0	7,9	8,8	9,7	10,6
$Q'_{3, jmin}$	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	6,1	7,9	9,7	11,5	13,8	15,1	16,9
Резерв r	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1

Получаемый в результате расчета график предназначен не только для планирования работы потока, но и для оперативного управления им. Разница между Q_{ij} и Q_{ijmin} является объемным резервом. Уменьшение выполняемых объемов в потоке ($n - \mu$) в пределах этого резерва не вызовет задержки следующего потока, однако потребует либо увеличения темпов ($n - \mu$)-го потока, чтобы наверстать отставание к тому интервалу, в котором резерв объема равен нулю, либо увеличения времени работы предшествующего потока, чтобы не задерживать работу последующего. Эта задача решается в ходе оперативного управления ходом работ.

Наиболее вероятны 2 ситуации, связанные с изменением характера взаимного расположения смежных потоков.

1. В промежуток времени от I_{i+1}^n до момента К планируемое расстояние между потоками i и $(i + 1)$ сокращается и в момент К достигает минимального организационно-технологического разрыва (рис. 5, а). При этом величина планового резерва r снижается ($r \rightarrow 0$). При отклонении фактических объемов от плановых в сторону уменьшения в этот промежуток времени возникает угроза остановки последующего потока из-за отсутствия фронта работ.

Допустим, $Q_i^{пл}$ и $Q_i^ф$ – соответственно плановый и фактический объемы (км), выполняемые i -м потоком к контрольному моменту τ_1 , $Q_i^к$ – плановый объем i -го потока в момент К. Если в момент τ_1 $Q_i^ф < Q_i^{пл}$, необходимо принимать экстренные меры по увеличению суточного темпа R_i i -го потока за счет привлечения резервных мощностей или повышения коэффициента сменности ($R_i = Y_i k_{см}$). Необходимое увеличение темпа работ в процентах к плановому рассчитывается по формуле

$$\Delta R = \frac{Q_i^{пл} - Q_i^ф}{Q_i^к - Q_i^{пл}} \cdot 100 \%$$

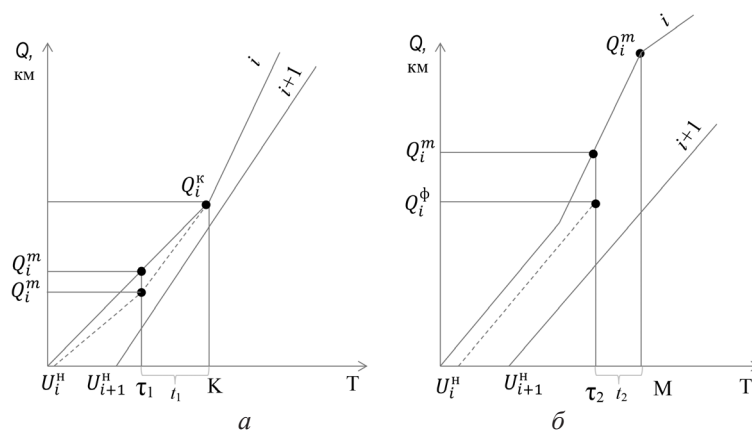


Рис. 5. Схематичные графики 2 смежных разноритмичных потоков: *a* – сокращение разрыва; *б* – увеличение разрыва (— – план; ---- – фактическое выполнение *i*-го потока)

Fig. 5. Schematic diagrams of 2 adjacent flows of different rhythm: *a* – gap reduction; *б* – gap extension (— – plan; ---- – actual performance of the *i*-th flow)

Требуемый суточный темп работ можно определить также следующим образом:

$$R = \frac{Q_i^k - Q_i^{\phi}}{\sum_1^{\eta} (K_{1ij} K_{2ij} D_k)}$$

где η – количество плановых интервалов в промежутке от τ_1 до K .

2. Величина планового резервного фронта работ между потоками увеличивается (промежуток времени от $I_{(i+1)}^n$ до точки M , рис. 5, *б*). В случае отставания фактических объемов *i*-го потока от плановых выполнение работ *i*-м потоком берется под контроль. Ликвидировать допущенное отставание можно без использования дополнительных ресурсов за счет устранения сдерживающих факторов.

Схема регулирования величины заделов в процессе строительства приведена на рис. 6.

Задача определения оптимальных заделов в дорожном строительстве, как и другие задачи календарного планирования, требует ввода большого количества исходных данных. В целях упорядочения подготовки исходной информации был исследован процесс формирования необходимых показателей и установлены взаимосвязи между ними. Используются формализованные методы изучения и описания информационных потоков, рекомендуемые авторами [12, 15–19] при рассмотрении информационных вопросов в управлении промышленными предприятиями и строительным производством. Основной инструмент, предлагаемый в этих работах, – матричная информационная модель, с помощью которой можно однозначно определить набор входных, промежуточных и результативных данных, проанализировать процесс преобразования входных данных в промежуточные и выходные, установить взаимосвязь и последовательность выполнения отдельных операций обработки данных, количественные и качественные характеристики потоков информации.



Рис. 6. Блок-схема регулирования величины заделов в ходе строительства

Fig. 6. Block diagram for groundwork control during construction

Для построения информационной модели был составлен список всех информационных элементов, используемых для решения поставленной задачи. Для идентификации элементов применен порядковый код.

Взаимосвязь информационных элементов задачи представлена в виде 2 структурных матриц. Матрица 1 указывает на использование показателей задачи для формирования каждого информационного элемента. В матрице 2 перечислены показатели, для получения которых берется каждый информационный элемент задачи. Разброс связей затрудняет восприятие цепочки формирования исходных данных для решения задачи. В целях упорядочения элементов по уровням формирования разработаны специальные алгоритмы триангуляции квадратных матриц. Применение этих методов осложняется с увеличением размерности матриц.

Заключение

В разработанном нами алгоритме расчета величины задела при строительстве автомобильных лесовозных дорог для упорядочения информационных элементов задачи по уровням формирования использована структурная матрица.

Изображение взаимосвязей показателей в виде информационного графика, вершины которого (информационные элементы задачи) распределены по

уровням формирования, делает представление данных наглядным и облегчает процесс подготовки информации для решения поставленной задачи в рамках календарного планирования. К нулевому уровню относятся не формируемые в данной системе показатели. Показатели каждого последующего уровня задаются на основе показателей предшествующих уровней, на последнем уровне расположены выходные данные решаемой задачи. Возможна дальнейшая детализация информационных элементов. Упорядочение их по предложенной схеме будет способствовать внедрению автоматизированных расчетов при разработке оптимальных календарных планов строительства лесовозных автомобильных дорог в составе проектов строительства и производства работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабков В.Ф. Дорожные условия и безопасность движения. М.: Транспорт, 1993. 271 с.
Babkov V.F. *Road Conditions and Traffic Safety*. Moscow, Transport Publ., 1993. 271 p. (In Russ.).
2. Бирюля А.К. Эксплуатация автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1966. 326 с.
Birulya A.K. *Operation of Roads*. Moscow, Transport Publ., 1966. 326 p. (In Russ.).
3. Гулевский В.А., Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Ломакин Д.В., Микова Е.Ю. Экспериментальная оценка сцепных качеств и ровности покрытий при различных состояниях автомобильных дорог и погодных условиях // Вестн. ВГАУ. 2018. № 1(56). С. 112–118.
Gulevsky V.A., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Lomakin D.V., Mikova E.Yu. Experimental Evaluation of Traction Properties and Road Evenness in Various Road and Weather Conditions. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*, 2018, no. 1(56), pp. 112–118. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2018.1.112>
4. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими. М.: Транспорт, 2012. 424 с.
Dryu D. *Theory of Traffic Flows and Their Management*. Moscow, Transport Publ., 2012. 424 p. (In Russ.).
5. Иванов В.Н., Ерохов В.Н. Влияние параметров автомобильных дорог на расход топлива // Автомобильные дороги. 2014. № 8. С. 10–13.
Ivanov V.N., Erokhov V.N. Road Parameters Influence on Fuel Consumption. *Avtomobil'nyye dorogi*, 2014, no. 8, pp. 10–13. (In Russ.).
6. Калужский Я.А., Бегма И.В., Кисляков В.М., Филиппов В.В. Применение теории массового обслуживания в проектировании автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1969. 136 с.
Kaluzhskiy Ya.A., Begma I.V., Kislyakov V.M., Filippov V.V. *The Use of Queueing Theory in the Road Design*. Moscow, Transport Publ., 1969. 136 p. (In Russ.).
7. Козлов В.Г. Методы, модели и алгоритмы проектирования лесовозных автомобильных дорог с учетом влияния климата и погоды на условия движения: дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск, 2017. 406 с.
Kozlov V.G. *Methods, Models and Algorithms for Designing Timber Roads Considering the Impact of Climate and Weather on Traffic Conditions*: Dr. Eng. Sci. Diss. Arhangelsk, 2017. 406 p. (In Russ.).
8. Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Микова Е.Ю., Могульников П.В., Чуриков Е.В. Формирование модели проектирования системы «дорожные условия – транспортные потоки» и пути ее реализации // Лесотехн. журн. 2018. Т. 8, № 1(29). С. 100–111.

Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Mikova E.Yu., Mogutnov R.V., Chirikov E.V. Formation of the Model of Designing the System “Road Conditions – Transport Flows” and Ways of Its Implementation. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2018, vol. 8, no. 1(29), pp. 100–111. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/article_5ab0dfbe6ece23.91630316

9. Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Могутнов Р.В., Микова Е.Ю., Зеликова Ю.А. Комплексные экспериментальные исследования изменения параметров и характеристик дорожных условий, транспортных потоков и режимов движения под влиянием климата и погоды // Лесотехн. журн. 2018. Т. 8, № 2(30). С. 156–168.

Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Mogutnov R.V., Mikova E.Yu., Zelikova Yu.A. Comprehensive Experimental Research of Changing Parameters and Characteristics of Road Conditions, Transport Flows and Motion Modes under Influence of Climate and Weather. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2018, vol. 8, no. 2(30), pp. 156–168. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/article_5b240611858af4.37544962

10. Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Чернышова Е.В., Чирков Е.В., Поставничий С.А., Могутнов Р.В. Теоретические основы и методы математического моделирования лесовозных автомобильных дорог // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 6. С. 117–127.

Kozlov G.V., Skrypnikov A.V., Chernyshova E.V., Chirkov E.V., Postavnichiy S.A., Mogutnov R.V. Theoretical Foundations and Methods of Mathematical Modeling of Forestry Roads. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2018, no. 6, pp. 117–127. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.6.117>

11. Кондрашова Е.В., Скворцова Т.В. Совершенствование организации дорожного движения в транспортных системах лесного комплекса // Системы управления и информационные технологии. 2008. № 3-2(33). С. 272–275.

Kondrashova E.V., Skvortsova T.V. Improvement of Road Traffic Organization in the Forest Complex Transport Systems. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii = Automation and Remote Control*, 2008, no. 3-2(33), pp. 272–275. (In Russ.).

12. Сильянов В.В., Ситников Ю.М. Расчет скоростей движения при проектировании автомобильных дорог // Тр. МАДИ. 1974. Вып. 72. С. 47–66.

Sil'yanov V.V., Sitnikov Yu.M. Calculation of Traffic Speeds in the Road Design. *Trudy MADI*, 1974, iss. 72, pp. 47–66. (In Russ.).

13. Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Ломакин Д.В., Микова Е.Ю. Оценка влияния на скорость движения постоянных параметров плана и профиля при различных состояниях поверхности дороги // Лесн. вестн. 2017. Т. 21, № 6. С. 43–49.

Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Lomakin D.V., Mikova E.Yu. Assessment of the Impact on the Speed of the Constant Parameters of the Plan and Profile in the Various States of the Road Surface. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 43–49. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2017-6-43-49>

14. Хомяк Я.В. Проектирование сетей автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1983. 207 с.

Khomyak Ya.V. *Designing Road Networks*. Moscow, Transport Publ., 1983. 207 p. (In Russ.).

15. Чернышова Е.В. Алгоритм решения задачи оптимального трассирования лесовозной автомобильной дороги на неоднородной местности // Вестн. ВГУИТ. 2017. Т. 79, № 2(72). С. 113–120.

Chernyshova E.V. Algorithm for Solving the Problem of Optimal Tracing of a Timber Road on a Non-Uniform Terrain. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernyh tekhnologii = Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2017, vol. 79, no. 2(72), pp. 113–120. (In Russ.). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2017-2-113-120>

16. Berestnev O., Soliterman Y., Goman A. Development of Scientific Bases of Forecasting and Reliability Increase of Mechanisms and Machines – One of the Key Problems of Engineering Science. *International Symposium on History of Machines and Mechanisms Proceedings HMM 2000*. Ed. by M. Ceccarelli. Dordrecht, Springer, 2000, pp. 325–332. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9554-4_37
17. Kozlov V.G., Gulevsky V.A., Skrypnikov A.V., Logoyda V.S., Menzhulova A.S. Method of Individual Forecasting of Technical State of Logging Machines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 327, iss. 4, art. 042056. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042056>
18. Mogutnov R.V., Tikhomirov P.V., Skrypnikov A.V., Zavrazhnov A.I., Kozlov V.G., Belyaev A.N., Zelikov V.A., Mikheyev N.V. Designing Mathematical Models of Geometric and Technical Parameters for Modern Road-Building Machines Versus the Main Parameter of the System. *Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” Dedicated to the 85th Anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. Atlantis Press, 2019, pp. 823–827. DOI: <https://doi.org/10.2991/isees-19.2019.165>
19. Skrypnikov A., Dorokhin S., Kozlov V.G., Chernyshova E.V. Mathematical Model of Statistical Identification of Car Transport Informational Provision. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, vol. 12, no. 2, pp. 511–515.
20. Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Samtsov V.V., Nikitin V.V., Denisenko V.V., Boltnev D.E. Theoretical Background of Road Landscape Zoning. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 659, art. 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012011>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article