Научная статья
УДК 625.7.004.9
DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-774-785
EDN: DOFECP

Check for updates

УРОВНИ ПРОРАБОТКИ МОДЕЛИ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНА СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ НА СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Т.В. Боброва*, Е.А. Покалюхина
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), г. Омск, Россия
bobrova.tv@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0292-4421
lenny3109@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0292-4421
**ответственный автор*

АННОТАЦИЯ

Введение. *Проанализирован опыт российских компьютерных компаний в области технологий информационного моделирования (ТИМ) в строительстве. Обращено внимание на роль стандартизации и классификации строительной информации (КСИ) для кодирования элементов цифровой информационной модели (ЦИМ) на этапах организационного проектирования и календарного планирования. Отмечена специфика линейных объектов относительно уровня проработки элементов модели и их атрибутивных характеристик на разных уровнях планирования.*
Модели и методы. *Обоснована необходимость индивидуального подхода к декомпозиции элементов дорожной конструкции с учетом комплекса природных и техногенных факторов. На разных стадиях проектирования организации строительства дороги календарный график представлен с разной степенью детализации в зависимости от целей проектирования и имеющейся информации об объекте. Определены параметры специализированных потоков линейного объекта, ограничения и критерий оптимальности календарного плана на стадии проектирования организации строительства (ПОС). Повышен уровень проработки элементов модели на стадии производства работ подрядной организацией (ППР). Разработанный алгоритм формирования графика комплексного потока представлен в виде блок-схемы и ЦИМ.*
Результаты. *Использование метода рассмотрено на примерах структурирования элементов объекта и технологических процессов на стадии ППР с учетом разных вариантов и схем организации работы специализированных потоков. Результаты проектирования представлены в виде расчетной матрицы, циклограммы и графика Ганта в программе MS Project*
Обсуждение и заключение. *Проработка базовой информации для модели календарного плана строительства автомобильной дороги на разных этапах проектирования представлена в интегрированной среде общих данных. Обосновано применение линейного дорожного районирования в качестве метода декомпозиции линейного объекта на стадиях САПР, ПОС и ППР. Структурными элементами проектирования на заключительной стадии (ППР) приняты линейные проектно-технологические модули (ЛПТМ) и специализированные потоки, сформированные на основе карт трудовых процессов подрядной организации.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *автомобильная дорога, модель календарного плана, стадии проектирования, структурирование информации, уровень детализации линейного объекта, среда общих данных*

БЛАГОДАРНОСТЬ: *авторы выражают благодарность рецензентам статьи за проделанную работу.*

Статья поступила в редакцию 16.11.2023; одобрена после рецензирования 27.11.2023; принята к публикации 20.12.2023.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Боброва Т.В., Покалюхина Е.А. Уровни проработки модели календарного плана строительства автомобильной дороги на стадиях проектирования // *Вестник СибАДИ*. 2023. Т. 20, № 6 (94). С. 774-785. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-774-785

© Боброва Т.В., Покалюхина Е.А., 2023

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-774-785
EDN: DOFECP

DEVELOPMENT LEVELS FOR TIME PLANNING MODEL OF ROAD CONSTRUCTION AT DESIGN STAGE

Tatiana V. Bobrova*, Elena A. Pokalyukhina
Siberian State Automobile and Highway University,
Omsk, Russia
bobrova.tv@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0292-4421,
lenny3109@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-0292-4421
**corresponding author*

ABSTRACT

Introduction. *The experience of Russian computer companies in the field of information modelling technologies (IMT) in construction is analyzed. The attention to the role of standardization and classification of construction information (CSI) for coding elements of the digital information model (DIM) at the stages of organizational design and calendar planning is drawn. The specificity of linear objects with respect to the level of elaboration of model elements and their attribute characteristics at different planning levels is noted.*
Models and methods. *The necessity of an individual approach to the decomposition of road structure elements taking into account the complex of natural and man-made factors is substantiated. At different stages of designing the organization of road construction, the timetable with different degrees of detail depending on the design objectives and available information about the object is presented. The parameters of specialized flows of a linear object, limitations and criteria for the optimality of the calendar plan at the design stage of the construction organization (CO) are determined. The level of elaboration of the model elements at the stage of work production by the contracting organization has been increased. The developed algorithm for forming a complex flow graph in the form of a flowchart and a DIM is presented.*
Results. *The use of the method is considered on the examples of structuring the elements of the object and technological processes at the stage of work production by the contracting organization, taking into account different options and schemes for organizing the work of specialized streams. The design results are presented in the form of a calculation matrix, a cyclogram and a Gantt graph in the MS Project program.*
Discussion and conclusion. *The development of the basic information for the model of the calendar plan for the construction of a road at different stages of design in an integrated general data environment is presented. The use of linear road is justified. zoning as a method of decomposition of a linear object at the stages of CAD, POS and work production by the contracting organization. The structural elements of the design at the final stage (work production by the contracting organization) are linear design and technological modules and specialized flows formed on the basis of maps of labor processes of the contracting organization.*

KEYWORDS: *highway, calendar plan model, design stages, information structuring, level of detail of a linear object, general data environment*

ACKNOWLEDGEMENT: *the authors express their gratitude to the reviewers of the article for the work done.*

The article was submitted 16.11.2023; approved after reviewing 27.11.2023; accepted for publication 20.12.2023.
The authors have read and approved the final manuscript.
Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Bobrova T.V., Pokalyukhina E.A. Development levels for time planning model ofroad constru ction at design stages. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (6): 774-785. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-774-785

© Bobrova T. V., Pokalyukhina E. A., 2023

Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Цифровая трансформация обозначена в качестве основного стратегического направления в развитии строительной отрасли Российской Федерации на ближайшее десятилетие[1]. Точкой отсчета назван 2022 г., хотя крупные компании-лидеры строительной отрасли начали эту работу гораздо раньше и уже накопили определённый опыт, который можно анализировать. По данным зарубежных и отечественных авторов технологии информационного моделирования (ТИМ, *BIM*) способны управлять графиком строительства, организовывать строительный надзор, способствовать обеспечению безопасных условий труда, наглядность контроля хода работ [1, 2, 3, 4, 5].

Специалисты НИУ МГСУ проанализировали ситуацию и в 2022 г. представили отчет «Результаты исследования проблем внедрения ТИМ в инвестиционно-строительных проектах российских компаний»[2]. Отмечая положительные тенденции и заинтересованность участников строительной деятельности, авторы отчета обобщили наиболее существенные препятствия на пути к комплексному внедрению ТИМ:

- неподготовленность основных участников инвестиционной деятельности и контрагентов к взаимодействию с использованием новых технологий моделирования и управления;
- нехватка кадров с достаточным уровнем и набором компетенций для реализации целей цифровой трансформации;
- разрозненность и несогласованность существующих информационных систем, государственных стандартов и нормативной базы.

С 2023 г. отмечена активизация российских компьютерных компаний в области информационных технологий, особенно в условиях импортозамещения отечественными программными продуктами. Проводится много обучающих вебинаров в Интернете для специалистов строительной отрасли разного уровня с целью повышения компетентности и заинтересованности работников, широко демонстрируются возможности и результаты использования новых технологий, касающиеся, в том числе организации совместной работы над проектом в среде общих данных (СОД). Среди отечественных компаний, работающих активно в области *BIM*-технологий и реализующих комплексный подход к цифровизации строительной отрасли, можно отметить следующих вендоров: *Renga, Model Studio CS, Nano CAD, Credo Dialogue, IndorCad*, Адепт, *Spider,* «Проектные практики».

Интересен опыт Консалтинговой компании «Айбим»[3], которая, сопровождая внедрение технологий цифровой трансформации в пионерные строительные и девелоперские проекты на протяжении более десятка лет, разработала детальную карту *IT* решений на основе интеграции программного обеспечения, оптимизации функциональных связей организационных структур, стандартизации нормативных данных и документооборота. Интеграционный принцип основан на научном системном подходе, который разрабатывался в нашей стране на первом этапе внедрения автоматизированных систем в строительстве (1970–1990 годы) [6, 7]. По разным причинам, включая недостаточную инструментальную базу, этот этап не был реализован в полной мере, но даже в тех условиях обеспечивал эффективность отдельных инженерных и экономических решений в строительстве. На базе опыта, накопленного строительной индустрией в предшествующие годы, можно прогнозировать, что использование современных разработок на российских WEB-платформах для профессионального многоуровневого управления проектами будет успешным.

В то же время нужно отметить, что успехами цифровизации не ограничиваются реальные результаты строительной деятельности. Проектирование сооружений и реализация проектных решений постоянно нуждаются в научных подходах, инновационных инженерных решениях, которые необходимо встраивать в общую систему любой цифровой трансформации.

Большая работа была проведена и проводится в настоящее время по стандартизации и классификации строительных нормативных документов в соответствии с требованиями *SMART* (*англ. Standards Machine Applicable, Readable and Transferable* – стандарты, применимые для машин, читаемые машинами и передаваемые на машины). Приказом Фе-

[1] Режим доступа: Распоряжение Правительства РФ от 31.10.2022 N 3268-р (дата обращения: 27.10.2023)

[2] Режим доступа: https://mgsu.ru/news/2022/Otchet_rez_issled_problem_TIM.pdf (дата обращения: 27.10.2023)

[3] Режим доступа: https://bim-info.ru/ (Дата обращения: 27.10.2023)

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

дерального агентства по техническому регулированию и метрологии утверждён предварительный национальный стандарт ПНСТ 864-2023 «Умные (SMART) стандарты. Общие положения»[4]. Вопросы стандартизации оказались тесно связанными не только с системами автоматизации проектирования (САПР). На этапах организационного проектирования и календарного планирования классификаторы строительной информации (КСИ) востребованы для кодирования объектов цифровой информационной модели (ЦИМ) и текстов конструктивных и технологических требований.

Как считают эксперты[5], не устранены недостатки в вопросах взаимосвязи отдельных элементов объекта даже в известном программном комплексе «*CADLib* Модель и Архив», разработанном компанией «СиСофт Девелопмент»[6]. Например, по данным экспертизы, при описании структуры здания «ступеньки не всегда знают, что являются частью лестничного марша, поручень лестницы вообще чувствует свою независимость, арматурная сетка ведет себя так, будто никому ничего не должна…». В качестве правильного семантического описания элемента здания приводится следующее: железобетонная свая относится к глобальной группе «строительные конструкции» и является частью «фундамента». Коды и связи элементов объекта, присвоенные на стадии проектирования ЦИМ, должны использоваться далее на всех стадиях организационного проектирования и календарного планирования.

Ещё одним важным понятием информационного моделирования, связанным с процессом решения основных проектных задач, включая планирование, является уровень детализации или уровень проработки элементов модели (*LOD – Level of Development*). *LOD* определяет перечень элементов модели и их атрибутивные характеристики, достаточные для принятия решений участниками проекта на каждом из уровней жизненного цикла (ЖЦ) объекта[7].

Для комплексной автоматизации процесса календарного планирования строительства используют программы, учитывающие специфику строительных объектов: *Microsoft Project Professional, Oracle Primavera, Project Spider*, *Plan-R* и другие. Данные программные продукты могут использоваться для проектирования календарных графиков как для площадочных, так и линейных объектов. К тому же именно эти программные комплексы, встроенные в интегрированные системы ТИМ, получили достаточно широкое распространение в отечественных бизнес-структурах и в проектных организациях независимо от отраслевой принадлежности.

При строительстве площадочных объектов промышленного и гражданского строительства выработаны определенные подходы к структурным декомпозициям элементов сооружений на модули и виды работ (СДР или *WBS*), которые необходимо выполнить в процессе планирования.

BIM-технологии в дорожной отрасли имеют свои специфические особенности, связанные прежде всего с линейным характером объекта. Ведущие ученые и практики в своих публикациях отразили достаточно полную картину истории становления и развития базовых автоматизированных систем в проектировании и строительстве отечественных автомобильных дорог, обозначили перспективы формирования национальной цифровой платформы транспортной инфраструктуры России, представили первоочередные задачи, которые, по их мнению, необходимо решить для полноценного внедрения этой технологии на всех стадиях жизненного цикла (ЖЦ) автомобильных дорог [8, 9, 10]. Учитывая современные подходы к *SMART*-стандартам, в дорожной отрасли уже ведется и будет продолжаться большая работа в этом направлении.

При строительстве автомобильных дорог основой структурной декомпозиции объекта служат конструктивные элементы: земляное полотно, слои дорожной одежды, искусственные сооружения, обустройство дороги и другие элементы, в зависимости от уровня *LOD*. Учитывая неравномерность распределения

---

[4] Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/1303488720 (дата обращения: 17.11.2023)

[5] Кутузова О. Через тернии к… автоматической экспертизе цифровой информационной модели. https://www.nanocad.ru/press/technical-articles/cherez-ternii-k-avtomaticheskoy-ekspertize-tsifrovoy-informatsionnoy-modeli/ (дата обращения: 13.10.2023).

[6] Режим доступа: https://stroimprosto-msk.ru/digital/organizations/ao-sisoft-development/ (дата обращения: 27.10.2023)

[7] Бенклян С. Уровни детализации элементов информационной модели здания. http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=17329. (дата обращения: 06.11.2023).

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile and Highway Industry Journal

объемов по длине дороги, разные конструктивные решения, технологические особенности работы комплектов машин, климатические факторы и т.д., для разработки информационной модели организации строительных работ на линейном объекте необходимо прежде всего обосновать структуру элементов и процессов модели для разных стадий ЖЦ и уровней проектирования.

Практически все разработанные программы календарного планирования в своей основе опираются на диаграмму Ганта и разные формы представления графиков на основе её расчета в автоматическом режиме. Вопрос заключается в том, является ли исходная диаграмма Ганта оптимальным графиком производства работ, какой метод строительства принят в проекте, по какому принципу определены ресурсные и фронтальные связи? Эти вопросы должны быть четко сформулированы на подготовительном этапе до ввода исходных данных в программу расчета календарного графика.

Целью данной работы является:

- обоснование научного подхода к декомпозиции элементов модели автомобильной дороги на разных стадиях проектирования организации строительства с учетом специфики линейного объекта;
- математическая подготовка и структурирование информации для оптимизации календарного планирования в компьютерной среде.

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ

Строительство дорог осуществляют в основном поточным методом с выделением отдельных участков для не поточного (последовательного) выполнения работ. Базовой моделью для отображения графика неритмичного строительного потока является циклограмма. Основой для формирования оптимальных планов являются математические модели разных типов [11, 12, 13]. Для расчета параметров комплексного линейного потока используют матрично-сетевой метод, метод непрерывного использования ресурсов или фронта работ [14].

При проектировании дорожных конструкций прежде всего необходимо учитывать влияние природной среды, поэтому наиболее важными первичными условиями обоснования декомпозиции объекта является грунтовое основание, на котором строится дорога, и климатические факторы на территории. На разных стадиях ЖЦ линейного объекта исходными данными для проектирования дорожных конструкций и определения сроков строительства служат нормативные документы, учитывающие деление территорий на дорожно-климатические зоны[8][9], районирование территорий на подзоны и районы на основе более углублённого изучения факторов природной среды [15], а также результаты инженерно-изыскательских работ.

Э.К. Кузахметова в работах [16, 17] обосновывает необходимость нового индивидуального подхода к проектированию земляного полотна дорог, учитывающего в полной мере особенности инженерно-геологических, гидрологических и топографических условий местности на протяжении линейного объекта[10]. Методы геоинформатики и таксономического анализа, предложенные в работе [18], позволяют выполнить линейное дорожное районирование (ЛДР), разделяя проектируемое земляное полотно на характерные участки с относительно однородными параметрами природной среды на основе инженерно-изыскательских работ по трассе дороги (линейно-дорожные комплексы – ЛДК).

В работах [19, 20] этот процесс определен как пространственная вертикальная декомпозиция дорожной конструкции на линейные проектно-технологические модули (ЛПТМ) и сосредоточенные проектно-технологические модули (СПТМ). В качестве СПТМ рассматривают участки с существенным изменением технологии и объёмов линейных работ, а также участки с искусственными сооружениями

[8] ПНСТ 542-2021. Дороги автомобильные общего пользования. Правила проектирования. М.: Стандартинформ. 2021. 153 с. https://protect.gost.ru/v.aspx?control=8&baseC=6&page=7&month=6&year=2021&search=&RegNum=1&DocOnPageCount=15&id=230356 (Дата обращения 30.06.2023).

[9] ОДМ 218.3.1.005-2021 Проектирование нежестких дорожных одежд. Методические рекомендации по расчету параметров напряженно-деформированного состояния многослойных конструкций при воздействии колесных нагрузок. (Дата обращения 27.10.2023).

[10] Кузахметова Э. К. Усовершенствование методологии индивидуального проектирования сооружений в сложных условиях с учетом техногенного воздействия // Пути к конкурентоспособным и инновационным решениям по строительству зданий и сооружений транспортной инфраструктуры: сборник докладов участников 1-й научно-практической конференции с международным участием, Москва, 05 декабря 2020 года. М.: Российский университет транспорта, 2021. С. 54–64. EDN CKGXXW.

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Таблица
Структурирование базовой информации для календарного планирования линейных работ
Источник: составлено авторами.

Table
Structuring of basic information for the scheduling of linear works
Source: Compiled by the authors.

№	Стадия ЖЦ объекта / документ	Структурная декомпозиция линейного объекта	Декомпозиция процесса строительства	База для планирования
1	Предварительное планирование / Техническое задание	Горизонтальная: земляное полотно, слои дорожной одежды. Вертикальная: в рамках климатической зоны, подзоны	Комплексный поток, технологический (специализированный поток)	Объекты аналоги; предварительные проектные объемы
2	Проектирование / ПОС	По элементам дорожной конструкции. Территориальное районирование по геокомплексам: зона, подзона, район, ЛДР	Комплексный поток, технологический (специализированный поток)	Исходные данные по объёмам проектной модели; типовые технологические карты, ГЭСН. Стандартный календарь
3	Строительство / ППР	Линейное дорожное районирование. Формирование ЛПТМ, СПТМ по уточненным элементам дорожной конструкции, сменная захватка специализированного потока	Потоки: комплексный, специализированный, рабочий (на основе операционного анализа)	Уточнённые согласованные данные по объёмам работ; карты трудовых процессов подрядчика. Рабочий календарь подрядной организации, учет факторов сезонности

В соответствии со структурной декомпозицией линейного объекта длина общего фронта работ на каждом линейном конструктивном элементе дороги L_j,как правило, совпадает с длиной объекта (дороги) L_D и определяется соотношением

$$L_j = \sum_{p=1}^{P} \sum_{k=1}^{K} l_{kpj} + \sum_{r=1}^{R} l_{rj}, \qquad (1)$$

где l_{kpj} – протяженность *k*-го участка *p*-го ЛПТМ на *j*-м конструктивном элементе при *p* = 1, 2,…,*P; k* = 1, 2,…,*K*, км; *j* = 1,2,…,*J*; l_{rj} – протяжённость сосредоточенного участка *r*-го типа на *j*-м конструктивном слое, при *r* = 1,2,….,*R*, км.

Выполнение работ на СПТМ не включают в линейную модель специализированного потока. Однако при расчёте графика строительства на уровнях проекта организации строительства (ПОС) и проекта производства работ (ППР) определяют сроки, ранее которых, до подхода специализированных линейных отрядов, все работы на СПТМ должны быть завершены.

На каждом этапе жизненного цикла проекта строительства дороги календарный график представляют с разной степенью детализации в зависимости от целей проектирования и имеющейся информации об объекте (таблица).

ЦИМ календарного планирования основана на ряде предпосылок, обеспечивающих взаимосвязь элементов строительного процесса по ресурсам и фронту работ.

Продолжительность работы *i*-го отряда на *k*-м участке модуля *p*-го типа *j*-го конструктивного слоя, во временных единицах измерения, установленных в компьютерной программе для проекта, определяют по формуле

$$\tau_{kpij} = Q_{kpij}/M_{pij}\ , \qquad (2)$$

где Q_{kpij} – объём готовой продукции *i*-го отряда на *k*-м участке модуля *p*-го типа *j*-го конструктивного слоя в нормативных ед. измерения вида работ; M_{pij} – производительность *i*-го отряда на *p*-м модуле *j*-го конструктивного слоя, в нормативных ед. изм. продукции / в ед. времени, установленных в проекте (часы, дни).

Непрерывность работы *i*-го линейного отряда на *k*-х участках одного модуля *p*-го типа на *j*-м конструктивном элементе определяется условием

$$t^{\text{кон}}_{kpij} + \tau^{\text{дисл}}_{k,(k+1)pij} = t^{\text{нач}}_{(k+1)pij}, \qquad (3)$$

где $t^{\text{кон}}_{kpij}$ – время окончания работы *i*-го отряда на *k*-м участке модуля *p*-го типа *j*-го конструктивного элемента, ед. изм. проектного времени; $t^{\text{нач}}_{(k+1)pij}$ – время начала работы *i*-го отряда на (*k+1)*-м участке модуля *p*-го типа *j*-го конструктивного элемента, ед. проектного времени; $\tau^{\text{дисл}}_{k,(k+1)pij}$ – время передислокации *i*-го отряда с *k*-го участка модуля *p*-го типа *j*-го конструктивного элемента на (*k*+1) участок модуля *p*-го типа *j*-го конструктивного элемента, ед.

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile and Highway Industry Journal

изм. проектного времени (в частных случаях время передислокации можно не учитывать).

При разработке ПОС составы специализированных отрядов, их производительности и параметры принимают на основе типовых технологических карт[11] или Государственных элементных сметных норм (ГЭСН)[12] для соответствующего вида работ и принятой технологии. При рабочем проектировании на стадии ППР для формирования составов отряда и оптимизации сменной захватки используют карты трудовых процессов с учетом парка машин подрядчика. Сменные графики работы машин на захватках удобно разрабатывать и оптимизировать в MS Project при часовой шкале времени [21].

Объединение специализированных потоков (СП) в комплексный поток осуществляют с использованием расчетных организационно-технологических параметров линейных специализированных потоков: $\tau_{ij}^{\text{разв}}$ – время развертывания *i*-го специализированного потока на *j*-м конструктивном элементе, дни; $\tau_{ij}^{\text{сверт}}$ – время свёртывания *i*-го специализированного потока на *j*-м конструктивном элементе, дни; $\tau_{j,(j+1)}^{\text{тех}}$ – нормативное время технологического перерыва между готовностью *j*-го конструктивного элемента к перекрытию (*j*+1)-м элементом (слоем дорожной конструкции), дни; $\tau_{j(j+1)}^{\text{резерв}}$ – резерв времени на случай непредвиденных задержек в работе предшествующего потока, 1-2 дня.

При работе одного специализированного отряда на каждом конструктивном элементе возможны следующие варианты организации работ:

1-й вариант

Конструктивный элемент не разделен на модули и участки (*P* = 1, *K* = 1), то есть длительность строительства слоя зависит только от общего объёма линейных работ на конструктивном элементе и расчетной производительности отряда (2).

2-й вариант:

На всех участках разных ЛПТМ будет работать один специализированный отряд, переходящий последовательно с участков одного модуля на участки другого модуля (с изменением производительности отряда на разных ЛПТМ).

Длительность работы *i*-го отряда на *j*-м конструктивном слое при таком варианте организации работ определится как время завершения линейных работ поточным методом на всех участках и модулях конструктивного слоя

$$T_j = \sum_{p=1}^{P}\sum_{k=1}^{K}\tau_{kpij} + \\ + \sum_{p=1}^{P}\sum_{k=1}^{K}\tau_{k,(k+1)pij}^{\text{дисл}}. \quad (4)$$

Датой начала строительства $D_c^{\text{нач}}$ считают дату начала работы первого отряда на первом участке первого модуля первого слоя конструкции (*i*=1, *j*=1, *k*=1, *p*=1). Завершение работы на последнем *P*-м модуле *J*-го слоя дорожной конструкции соответствует сроку завершения строительства объекта $D_c^{\text{кон}}$, ед. изм. проектного времени.

Целевая функция модели *F* (продолжительность строительства, рабочие дни) с учетом заданных ограничений является оптимальной и рассчитывается по формуле

$$F = D_c^{\text{кон}} - D_c^{\text{нач}} \rightarrow \min. \quad (5)$$

Блок-схема алгоритма расчета комплексного линейного потока представлена на рисунке 1. Тип временной связи между смежными специализированными потоками в составе комплексного устанавливают исходя из соотношения времени работы этих потоков на *j*-м и (*j*+1)-м конструктивных элементах по формулам, приведённым в блоках 7 и 8 (рисунок 1).

Наиболее характерными для дорожного строительства являются методы, реализующие принцип непрерывности использования ресурсов (формула 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ

При формировании плана на уровне ППР, имеющего наиболее высокий уровень проработки элементов модели (*LOD)*, рассмотрим варианты комбинированного метода организации работ, когда строительство одного конструктивного слоя осуществляют несколько специализированных отрядов (потоков). Каждый отряд закреплен за участками ЛПТМ одного типа. При этом возможны две схемы организации работ:

[11] Технологические карты на устройство земляного полотна и дорожной одежды. Введены в действие распоряжением Минтранса России от 23.05.2003 г. № ОС-468-р. Изд-во РОСАВТОДОР. М., 2004. 357с.

[12] Государственные элементные сметные нормы ÷(ГЭСН), утв. приказами Минстроя России №№ 871/пр – 876/пр от 26.12.2019 г. URL: https://minstroyrf.gov.ru/trades/view.gesn-2020.php (дата обращения: 27.09.2022).

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

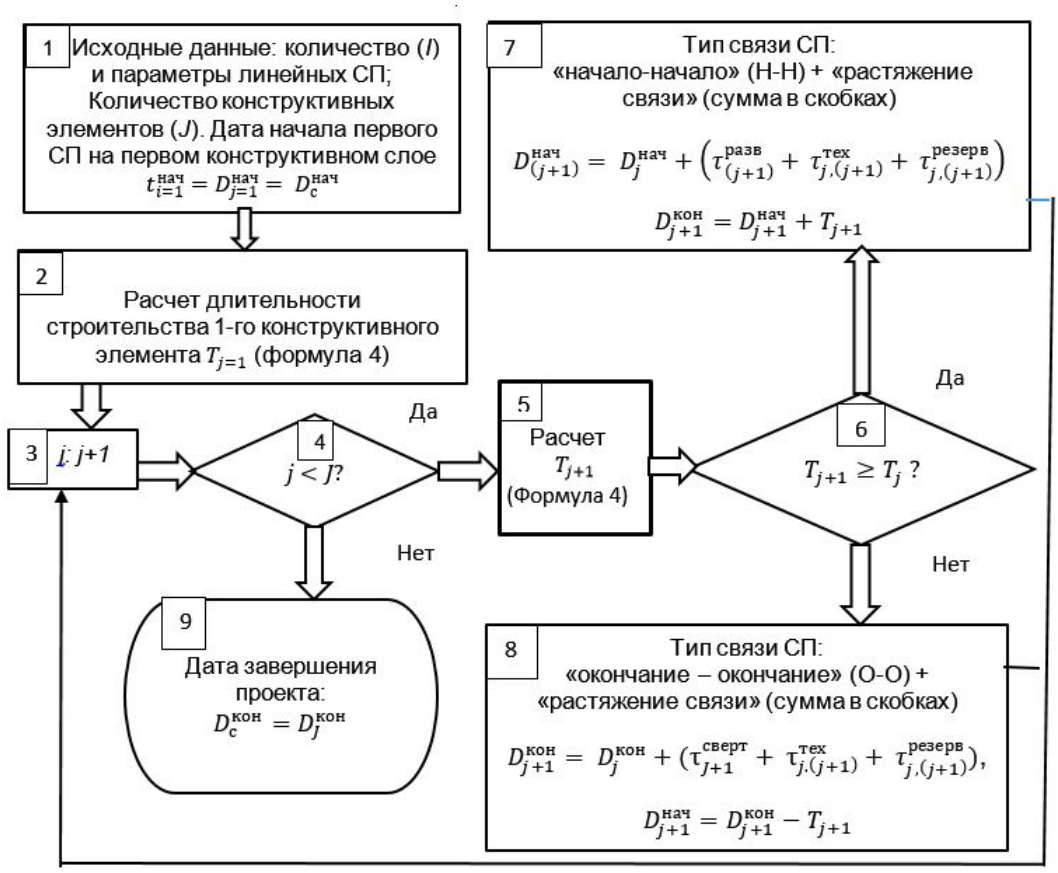


Рисунок 1 – Формирование графика комплексного потока в программе календарного планирования проекта
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Formation of the integrated flow schedule in the project calendar planning program
Source: Compiled by the authors.

1-я схема

Каждый отряд (кроме первого) начинает работу на рассредоточенных участках ЛПТМ своего типа после завершения работы предыдущего отряда на другом типе ЛПТМ (последовательный метод). Длительность строительства *j*-го слоя конструкции определится как сумма продолжительностей работы всех отрядов на этом конструктивном элементе дороги.

2-я схема

Специализированные отряды для разных ЛПТМ *j*-го конструктивного слоя работают параллельно (параллельно-поточный метод). Такая схема организации работ особенно характерна для строительства земляного полотна в сложных условиях, обеспечивая сокращение сроков строительства и повышение эффективности.

При организации работы специализированных потоков по 2-й схеме (параллельно-поточный метод) параметры потоков на отдельных участках линейного объекта устанавливают на основе специальных алгоритмов расчета матриц, учитывающих непрерывность работы потоков с возможным совмещением работы отрядов на разных конструктивных элементах [13]. Продолжительности работы специализированных отрядов на каждом отдельном участке по фронту работ τ_{ijpk} определяют по формуле (2). Тип связи между потоками на смежных конструктивных элементах по каждому участку отдельно устанавливают по аналогии с зависимостями, сформулированными для связи СП применительно к комплексному дорожному потоку (см. рисунок 1).

При условии $\tau_{i(j+1)pk} \geq \tau_{ijpk}$ связь между потоками устанавливают «начало – начало (Н - Н) + «растяжение связи» (см. рисунок 1, блок 7).

При условии $\tau_{i(j+1)pk} < \tau_{ijpk}$ связь между потоками устанавливают «окончание – окончание (О-О)» + «растяжение связи» (см. рисунок 1, блок 8).

Далее рассмотрен пример расчета матрицы, в котором строительство земляного полотна ведут два специализированных от-

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile and Highway Industry Journal

ряда параллельно-поточным методом на закреплённых участках ЛПТМ, на строительстве подстилающего слоя основания работает один специализированный отряд. Для лучшей наглядности принята связь О-О для всех участков по фронту работ, а для «растяжения связи – $\tau_{\text{растяж}}$» только время свёртывания потока. Эти допущения не меняют общего подхода к расчету матрицы. Для пояснения деталей расчета и более удобного графического отображения его результатов перейдём в систему координат с порядковым обозначением участков (1, 2, …, *n*,...,*N*).

$t_{ijn}^{\text{нв}}$		$t_{ijn}^{\text{ов}}$
$t_{ijn}^{\text{н}}$		$t_{ijn}^{\text{о}}$
	τ_{ijn}	

Рисунок 2 – Обозначения параметров потока
Источник: составлено авторами.

*Figure 2 – Designations of flow parameters**
Source: compiled by the authors.

На рисунке 2 в ячейке матрицы на *n*-м участке приведены следующие обозначения расчетных параметров потоков: $t_{ijn}^{\text{нв}}$, $t_{ijn}^{\text{н}}$ – соответственно возможное и расчетное начало работы *i*-го отряда на *n*-м участке *j*-го конструктивного слоя, дни; $t_{ijn}^{\text{ов}}$, $t_{ijn}^{\text{о}}$ – соответственно возможное и расчетное окончание работы *i*-го отряда на *n*-м участке *j*-го конструктивного слоя, дни; τ_{ijn} – длительность работы i-го отряда на *n*-м участке *j*-го конструктивного слоя, дни.

На рисунке 3 представлен пример расчета матрицы с заданными выше условиями по формулам:

$$t_{ijn}^{\text{нв}} = \max \begin{Bmatrix} t_{(n-1)ij}^{\text{о}} \\ t_{(j-1)n}^{\text{о}} + \tau_{\text{растяж}} - \tau_{ijn} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

$$t_{ijn}^{\text{ов}} = t_{ijn}^{\text{нв}} + \tau_{ijn}\,, \quad (7)$$

$$\tau_{\text{растяж}} = \tau_{j-1}^{\text{сверт}} + t_{j,(j-1)}^{\text{техн}} + \tau_{j,(j-1)}^{\text{резерв}}. \quad (8)$$

Обратный ход расчета потока по матрице обеспечил непрерывность работы специализированного отряда по строительству слоя основания (подстилающий слой) на участках дороги. Оптимальная продолжительность проекта при заданных условиях проектирования составила 40 дней. На рисунке 4 представлен график работы потоков, рассчитанных по матрице (рисунок 3) в виде графика Ганта в программе MS Project.

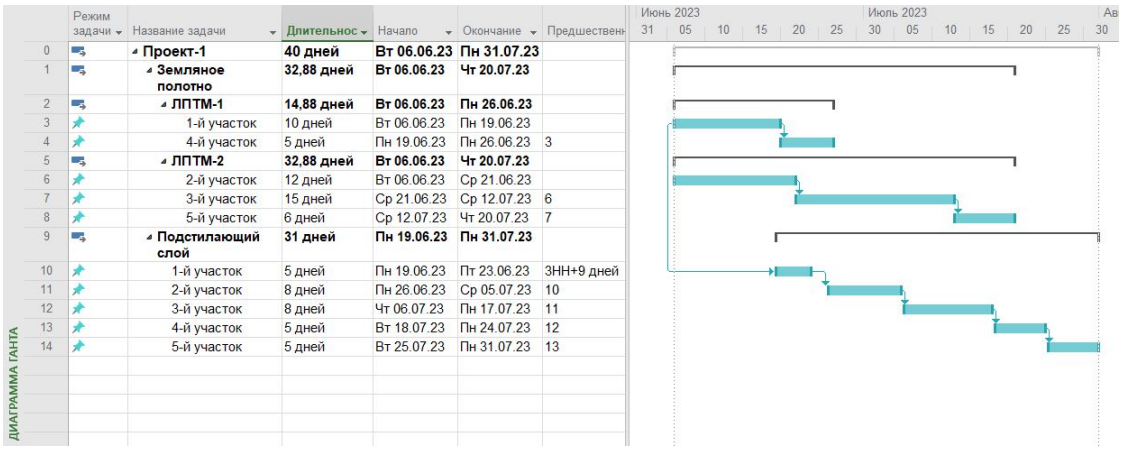
Структурная декомпозиция проекта в таблице *MS Project* представлена в виде 4-уровневой системы: проект – конструктивный элемент – номер ЛПТМ – номер участка на ЛПТМ. На рисунке 5 по матрице (см. рисунок 3) в программе *MS Excel* выполнено построение циклограммы работы трех специализированных потоков.

Специализированный поток (i) / Конструктивный элемент (j)	τ *ijn* , дни	ЛПТМ - участки (p.k); в скобках - порядковый номер участка (1, 2 ,...n,...N)														
		1.1 (1)			2.1 (2)			2.2 (3)			1.2 (4)			2.3 (5)		
	Земляное полотно: 1-й поток на первом конструктивном элементе (*ij*) при *i*=1 , *j*=1	o		10							10		15			
			10			**0**			**0**			**5**			**0**	
	Земляное полотно: 2-й поток на первом конструктивном элементе (*ij*) при *i*=2, *j*=1	0		0	0		12	12		27				27		33
			0			**12**			**15**			**0**			**6**	
	Время развертывания (свертывания), потока на подстилающем слое (дни)		3			3			3			3			3	
	Подстилающий слой: 1-й поток на втором конструктивном слое (*ij*) при i=1, j=2	8		13	13		21	22		30	30		35	35		40
		9		14	14		22	22		30	30		35	35		
			5			**8**			**8**			**5**			**5**	

Рисунок 3 – Матрица расчета потоков при параллельно-поточном методе организации работ на строительстве земляного полотна
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Flow calculation matrix for the parallel-flow method of organizing work on the construction of the roadbed
Source: compiled by the authors.

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal



	Режим задачи	Название задачи	Длительнос	Начало	Окончание	Предшественн
0		**Проект-1**	**40 дней**	**Вт 06.06.23**	**Пн 31.07.23**	
1		**Земляное полотно**	**32,88 дней**	**Вт 06.06.23**	**Чт 20.07.23**	
2		**ЛПТМ-1**	**14,88 дней**	**Вт 06.06.23**	**Пн 26.06.23**	
3		1-й участок	10 дней	Вт 06.06.23	Пн 19.06.23	
4		4-й участок	5 дней	Пн 19.06.23	Пн 26.06.23	3
5		**ЛПТМ-2**	**32,88 дней**	**Вт 06.06.23**	**Чт 20.07.23**	
6		2-й участок	12 дней	Вт 06.06.23	Ср 21.06.23	
7		3-й участок	15 дней	Ср 21.06.23	Ср 12.07.23	6
8		5-й участок	6 дней	Ср 12.07.23	Чт 20.07.23	7
9		**Подстилающий слой**	**31 дней**	**Пн 19.06.23**	**Пн 31.07.23**	
10		1-й участок	5 дней	Пн 19.06.23	Пт 23.06.23	3НН+9 дней
11		2-й участок	8 дней	Пн 26.06.23	Ср 05.07.23	10
12		3-й участок	8 дней	Чт 06.07.23	Пн 17.07.23	11
13		4-й участок	5 дней	Вт 18.07.23	Пн 24.07.23	12
14		5-й участок	5 дней	Вт 25.07.23	Пн 31.07.23	13

ДИАГРАММА ГАНТА

Рисунок 4 – График проекта по расчетной матрице (см. рисунок 3)
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – The project schedule according to the calculation matrix (Fig.3)
Source: compiled by the authors.

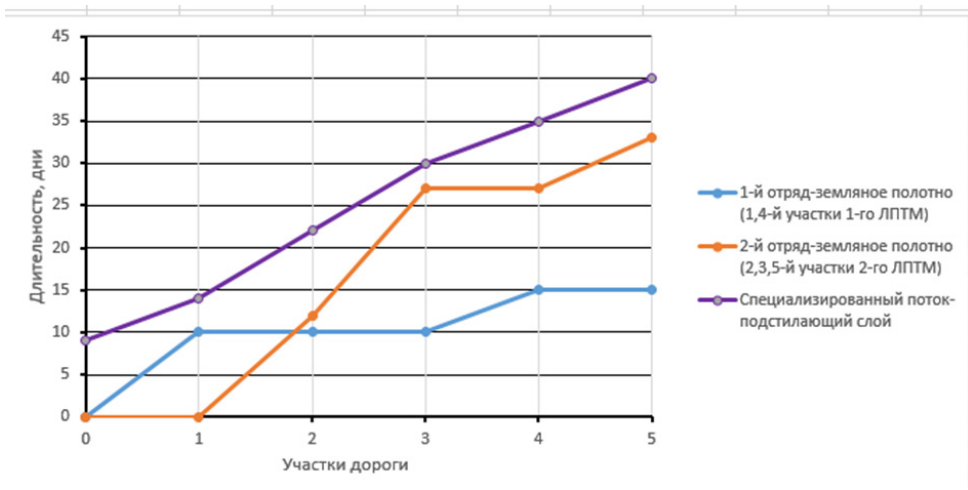


Рисунок 5 – Циклограмма проекта по расчетной матрице (см. рисунок 3)
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – The cyclogram of the project according to the calculation matrix (Fig. 3
Source: compiled by the authors.

В реальных условиях могут создаваться более сложные схемы организации строительства, поэтому в каждом конкретном случае требуется уточнение и дополнительный анализ алгоритма расчета.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обосновано применение линейного дорожного районирования в качестве метода декомпозиции элементов автомобильных дорог на стадиях САПР, ПОС и ППР. В качестве структурных элементов информационного моделирования для этих объектов на заключительной стадии (ППР) рассмотрены линейные проектно-технологические модули (ЛПТМ) и специализированные потоки, сформированные на основе карт трудовых процессов подрядной организации. Представлены результаты моделирования производства работ параллельно-поточным методом на основе предварительного расчета матриц с последующей реализацией модели в компьютерной среде календарного планирования проектов. Продолжением исследований является совершенствование методов структурирования линейных объектов и строительных процессов для повышения точности и надежности планирования на разных уровнях управления проектной деятельностью.

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile and Highway Industry Journal

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Khodabandelu, A. Agent-based modeling and simulation in construction / A. Khodabandelu, J. W. Park // Automation in Construction. 2021. Vol. 131. P. 103882. DOI 10.1016/j.autcon.2021.103882.
2. Doukari O. Automatic generation of building information models from dig-itized plans / O. Doukari, D. Greenwood // Automation in Construction. 2020. Vol. 113. P. 103129. DOI 10.1016/j.autcon.2020.103129.
3. Возгомент Н. В. Современные вызовы и перспективы развития BIM-моделирования в России в эпоху цифровизации // E-Management. 2020. Т. 3, № 3. С. 20–27. DOI 10.26425/2658-3445-2020-3-3-20-27.
4. BIM-integrated construction safety risk assessment at the design stage of building projects / Y. Lu, P. Gong, Y. Tang [et al.] // Automation in Construction. 2021. Vol. 124. P. 103553. DOI 10.1016/j.autcon.2021.103553.
5. Digital twin and its implementations in the civil engineering sector / F. Jiang, L. Ma, T. Broyd, K. Chen // Automation in Construction. 2021. Vol. 130. P. 103838. DOI 10.1016/j.autcon.2021.103838. EDN HXUUWO.
6. Глушков В. М.Ю., Михалевич В. С. Кибернетика. Вопросы теории и практики. М. Наука, 1986. 448 с.
7. Гусаков А.А. Системотехника строительства / Рос. АН. Совет по комплекс. проблеме «Кибернетика». 2-е изд., перераб. и доп. М., Стройиздат, 1993. 368 с.
8. Скворцов А.В. Общая среда данных как ключевой элемент информационного моделирования автомобильных дорог // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2015. № 2(5). С. 37−41. DOI: 10.17273/C.
9. Бойков В.Н., Скворцов А. В., Сарычев Д.С. Цифровая автомобильная дорога как отраслевой сегмент цифровой экономики // Транспорт Российской Федерации. 2017. №2(75). С. 56–60.
10. Бойков В.Н., Скворцов А.В. InfraBIM для автомобильных дорог // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2019. № 1(12). С. 4–9. DOI: 10.17273/CADGIS.2019.1.1.
11. Солодкий А.И., Карпов Б.Н. Календарное планирование строительства и ремонта автомобильных дорог. М. Транспорт, 1988. 120 с.
12. Classification of network schedules as part of construction organization projects and works production projects / S. S. Dontsov, S. K. Zhetpysbaev, A. E. Mazhitova [et al.] // Вестник Торайгыров университета. Экономическая серия. 2022. No. 2. P. 35-44. DOI 10.48081/DLJR6812. EDN GZFEGJ.
13. Construction schedule planning for railway station facilities / V. Z. Velichkin, M. V. Petrochenko, E. B. Zavodnova, A. Yu. Gorodishenina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans 2020), Irkutsk, 11–13 ноября 2020 года. Vol. 1151. Irkutsk: IOP Publishing Ltd, 2021. P. 012012. EDN GULUTG.
14. Величкин В. З., Петроченко М. В., Птухина Матрично-сетевая модель планирования сложных комплексов работ // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2019. № 669. С. 13–17. EDN ZVYJMD.
15. Efimenko V., Efimenko S., Sukhorukov A., Features of road-climatic of territories MATEC Web of Conferences, Vol. 143, 01012 (2018).
16. Кузахметова Э. К. Строительство автомобильных дорог из местных слабых грунтов // Наука и техника в дорожной отрасли. 2019. № 2(88). С. 25–28. EDN TMEQJA.
17. Кузахметова Э.К. К новой нормативной базе для современных дорог // ДОРОГИ. Инновации в строительстве № 83. 2020. http://www.techinform-press.ru/images/stories/pdf/new_journal/83.pdf
18. Bobrova, T. Linear structure taxonomy with the account of environmental polystructures impact / T. Bobrova, V. Vorobyev // MATEC Web of Conferences 216, 01003 (2018). URL: https://doi.org/10.1051/matecconf/201821601003
19 Дубенков, А. А. Особенности структурно-модульного проектирования организации строительства дорог на многолетнемерзлых грунтах / А. А. Дубенков, Т. В. Боброва, М. С. Перфильев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 6(47). – С. 168-181. – EDN TBZNIN.
20. Боброва Т.В. Совершенствование организационно-технологического проектирования линейных транспортных объектов на основе моделирования их пространственной декомпозиции / Т.В. Боброва, А.А. Дубенков, И.В. Тытарь // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 4. С.169–175. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_27517937_48597390.pdf.
21. Боброва Т.В. Актуализация параметров информационной модели дорожно-строительного потока при разработке проекта производства работ. *Научный рецензируемый журнал "Вестник СибАДИ"*. 2022;19(6):916-927. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-916-927

REFERENCES

1. Khodabandelu A., Park J. W. Agent-based modeling and simulation in construction. *Automation in Construction*. 2021. Vol. 131. P. 103882. DOI 10.1016/j.autcon.2021.103882.
2. Doukari O., Greenwood D. Automatic generation of building information models from dig-itized plans. *Automation in Construction*. 2020. Vol. 113. P. 103129. DOI 10.1016/j.autcon.2020.103129.
3. Vozgoment N.V. Modern challenges and prospects for the development of BIM-modeling in Russia in the age of digitalization. *E-Management*. 2020;3(3):20-27. (In Russ.) https://doi.org/10.26425/2658-3445-2020-3-3-20-27
4. Lu Y., Gong P., Tang Y. [et al.] BIM-integrated construction safety risk assessment at the design stage of building projects. *Automation in Construction*. 2021. Vol. 124. P. 103553. DOI 10.1016/j.autcon.2021.103553.
5. Jiang F., Ma L., Broyd T., Chen K. Digital twin and its implementations in the civil engineering sector. *Automation in Construction*. 2021; Vol. 130: P. 103838. DOI 10.1016/j.autcon.2021.103838. EDN HXUUWO.

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

6. Glushkov V. M., Mikhalevich V. S. *Kibernetika voprosy` teorii i praktiki* [Cybernetics. Questions of theory and practice]. Moscow, Nauka, 1986: 448. (In Russ.)

7. Gusakov A. A. *Sistemotekhnika stroitel`stva* [Construction System Engineering]. Ros. AN. Sovet po kompleks, probleme "Kibernetika". 2-e izd., pererab. i dop. Moscow, Strojizdat, 1993: 368. (In Russ.)

8. Skvorczov A.V. Obshhaya sreda danny`kh kak klyuchevoj e`lement informaczionnogo modelirovaniya avtomobil`ny`kh dorog [Common Data Environment as a Key Element of Highway Information Modeling]. *SAPR i GIS avtomobil`ny`kh dorog*. 2015; 2(5):37−41. (In Russ.) DOI: 10.17273/C.

9. Bojkov V.N., Skvorczov A.V., Sary`chev D.S. Czifrovaya avtomobil`naya doroga kak otraslevoj segment czifrovoj e`konomiki [Digital Highway as an Industry Segment of the Digital Economy]. *Transport Rossijskoj Federaczii*. 2017; 2(75): 56-60. (In Russ.)

10. Bojkov, V.N. Skvorczov, A.V. InfraBIM dlya avtomobil`ny`kh dorog [InfraBIM for Highways]. *SAPR i GIS avtomobil`ny`kh dorog*. 2019;1(12): 4-9. (In Russ.) DOI:10.17273/CADGIS.2019.1.1.

11. Solodkij A.I., Karpov B.N. Kalendarnoe planirovanie stroitel`stva i remonta avtomobil`ny`kh dorog [Road Construction and Repair Schedule]. Moscow: Transport, 1988:120. (In Russ.)

12. Dontsov S. S., Zhetpysbaev S. K., Mazhitova A. E. Classification of network schedules as part of construction organization projects and works production projects. *Vestnik Torajgy`rov universiteta.* E`konomicheskaya seriya. 2022; 2: 35-44. (In Russ.) DOI 10.48081/DLJR6812. EDN GZFEGJ.

13. Construction schedule planning for railway station facilities / V. Z. Velichkin, M. V. Petrochenko, E. B. Zavodnova, A. Yu. Gorodishenina. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans 2020), Irkutsk, 11–13 November 2020 goda. Vol. 1151. Irkutsk: IOP Publishing Ltd, 2021. P. 012012. EDN GULUTG.

14. Velichkin V. Z., Petrochenko M. V., Ptukhina I. S. Matrichno-setevaya model` planirovaniya slozhny`kh kompleksov rabot [Matrix-network model of complex work complex planning]. *Trudy` Voenno-kosmicheskoj akademii imeni A.F. Mozhajskogo*. 2019; 669: 13-17. (In Russ.) EDNZVYJMD.

15. Efimenko V., Efimenko S., Sukhorukov A. Features of road-climatic of territories. MATEC Web of Conferences, Vol. 143, 01012 (2018).

16. Kuzakhmetova E`. K. Stroitel`stvo avtomobil`ny`kh dorog iz mestny`kh slaby`kh gruntov []. *Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli*. 2019; 2(88): 25-28. EDN TMEQJA.

17 Kuzakhmetova E`. K. K novoj normativnoj baze dlya sovremenny`kh dorog. *DOROGI. Innovaczii v stroitel`stve*. 2020;83. Available at: http://www.techinform-press.ru/images/stories/pdf/new_journal/83.pdf

18. Bobrova T., Vorobyev V. Linear structure taxonomy with the account of environmental polystructures impact. *MATEC Web of Conferences* 216, 01003 (2018). Available at: https://doi.org/10.1051/matecconf/201821601003

19. Dubenkov A. A., Bobrova T. V., Perfil`ev M. S. Osobennosti strukturno-modul`nogo proektirovaniya organizacii stroitel`stva dorog na mnogoletnemerzly`x gruntax. [Features of structural and modular design of the organization of road construction on permafrost soils] *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel`nogo universiteta*. 2014; 6(47):168-181. (In Russ.) EDN TBZNIN.2120

20. Bobrova T.V., Dubenkov A.A., Ty`tar I.V. ` Sovershenstvovanie organizaczionno-tekhnologicheskogo proektirovaniya linejny`kh transportny`kh ob`ektov na osnove modelirovaniya ikh prostranstvennoj dekompoziczii [Improvement of organizational and technological design of linear transport objects based on modeling of their spatial decomposition]. *Sistemy`. Metody`. Tekhnologii*. 2016; 4: 169-175. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_27517937_48597390.pdf.

21. Bobrova T.V. Updating parameters of an information model for road construction flow in work development project. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022;19(6):916-927. (In Russ.) https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-6-916-927

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Боброва Т.В. Формулирование цели и задач исследования, математическая постановка задач календарного планирования для уровней ПОС и ППР.

Покалюхина Е.А. Анализ источников, формирование вариантов организации работ, алгоритмы и расчет циклограмм, реализация расчетов в MS Project.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Tatiana V. Bobrova. The purpose and objectives of the study statement, mathematical formulation of calendar planning tasks for the levels of POS and work production by the contracting organization.

Elena A. Pokalyukhina. Analysis of sources, formation of work organization options, algorithms and calculation of cyclograms, implementation of calculations in MS Project.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Боброва Татьяна Викторовна – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Проектное управление и информационное моделирование в строительстве», SPIN-код: 8670-8576.

Покалюхина Елена Александровна – инженер, кафедра «Проектное управление и информационное моделирование в строительстве», SPIN-код: 3159-0150.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tatyana V. Bobrova – Dr. of Sciences, Professor, the Project Management and Information Modelling in Construction Department, SPIN-код: 8670-8576.

Elena A. Pokalyukhina – Engineer, the Project Management and Information Modelling in Construction Department, SPIN-код: 3159-0150.

© 2004–2023 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile and Highway Industry Journal