

## Технологическое обоснование конструктивных решений железнодорожного земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах с применением экспертной системы

Таисия Васильевна Шепитько , Алексей Викторович Полянский , Игорь Александрович Артюшенко , Алексей Сергеевич Ноздрачев\* 

Российский университет транспорта, Москва, Россия

\* Автор, ответственный за переписку: e-mail: alex14071953@mail.ru

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Рассмотрены теоретические основы и практические аспекты реализации технологического обоснования конструктивных решений железнодорожного земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах с применением экспертной системы. Железнодорожное строительство в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов требует специфических конструктивных решений и технологий, что обусловлено сложными природно-климатическими условиями, динамикой геологических процессов и необходимостью координации множества участников проекта. В таких условиях ключевым становится разработка эффективных технологических процессов, включая возведение железнодорожного земляного полотна, что достигается через внедрение инженерно-интеллектуальной подсистемы инженерно-технического сопровождения. Цель работы заключается в формировании методологии, интегрирующей интеллектуальные технологии в процессы разработки железнодорожного земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах для достижения оптимального баланса между сроками, стоимостью, ресурсами и эксплуатационной надежностью объекта. Для этого проведен анализ технологических особенностей строительства в условиях криолитозоны, включающий территориальную привязку объекта, ресурсоемкость процессов, вариативность конструктивных параметров и круглогодичность работ. **Методы и материалы.** Методология включает декомпозицию железнодорожного земляного полотна на конструктивные элементы с использованием графовых моделей, формализующих взаимосвязи между подсистемами, а также разработку экспертной системы на основе продукционной модели знаний для автоматизации генерации номенклатуры строительных работ. Результаты декомпозиции и генерации номенклатуры строительных работ создают основу для оптимизации технологического процесса, календарного планирования и разработки проектов производства работ. **Результаты и обсуждение.** На основе результатов теоретического исследования в статье рассмотрены возможности применения специально разработанного экспериментального программного модуля для технологического обоснования конструктивных решений железнодорожного земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах. Практическая значимость исследования подтверждается внедрением экспериментальных программных модулей, в том числе включающих интеллектуальные компоненты. Это обеспечивает переход от традиционного вариантного проектирования к адаптивным решениям в реальном времени, минимизируя ошибки и временные затраты. **Вывод.** Итоги работы демонстрируют потенциал информационных интеллектуальных систем для железнодорожного строительства в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов, где формализация процессов и автоматизация решений играют ключевую роль в достижении устойчивого развития отрасли.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** технологический процесс, железнодорожное строительство, железнодорожное земляное полотно, криолитозона, многолетнемерзлый грунт, номенклатура работ, методы искусственного интеллекта, экспертная система, база знаний

**БЛАГОДАРНОСТИ:** Статья подготовлена на основе исследований, выполненных в рамках Гранта, предоставленного Министерством образования и науки в форме субсидии из федерального бюджета на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития, тема проекта «Анализ и разработка теоретических основ с исследованием и разработкой конструктивно-технологических решений по обеспечению эксплуатационной надежности объектов транспортной инфраструктуры в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов», соглашение № 075-15-2024-559 от 25.04.2024.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:**

Шепитко Т.В., Полянский А.В., Артюшенко И.А., Ноздрачев А.С. Технологическое обоснование конструктивных решений железнодорожного земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах с применением экспертной системы. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(6):760–774. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-6-760-774>. – EDN: TBQTFA.

## Technological justification of construction solutions for railway roadbed on permafrost soils using an expert system

Taisia V. Shepitko , Aleksey V. Polyanskiy , Igor A. Artyushenko , Alexey S. Nozdrachev\* 

Russian University of Transport, Moscow, Russia

\* Corresponding author: e-mail: alex14071953@mail.ru

### ABSTRACT

**Introduction.** The theoretical foundations and practical aspects of implementing technological justification for design concept of railway roadbed on permafrost soils using an expert system are considered. Railway construction in permafrost regions requires specific design solutions and technologies due to complex natural and climatic conditions, geological process dynamics, and the need to coordinate multiple project participants. In such conditions, the development of efficient technological processes, including the construction of railway roadbed, becomes crucial and is achieved through the implementation of an engineering-intelligent subsystem for technical support. The aim of this study is to develop a methodology that integrates intelligent technologies into the processes of designing railway roadbed on permafrost soils to achieve an optimal balance between timelines, cost, resources, and operational reliability of the structure. To this end, an analysis of the technological features of construction in the cryolithozone was conducted, including site-specific localization, resource intensity of processes, variability of design parameters, and year-round work operations. **Methods and Materials.** The methodology includes the decomposition of the railway roadbed into constructional elements using graph models that formalize the interconnections between subsystems, as well as the development of an expert system based on a production knowledge model for automating the generation of construction work nomenclature. The results of the decomposition and generation of construction work nomenclature form the basis for optimizing the technological process, scheduling, and the development of work production projects. **Results and Discussion.** Based on the results of the theoretical research, the article explores the possibilities of applying a specially developed experimental software module for the technological justification of design solutions for railway roadbed on permafrost soils. The practical significance of the study is confirmed by the implementation of experimental software modules, including those incorporating intelligent components. This enables a transition from traditional variant-based design to adaptive real-time solutions, minimizing errors and time expenditures. **Conclusion.** The results of the work demonstrate the potential of intelligent information systems for railway construction in permafrost regions, where process formalization and decision automation play a key role in achieving sustainable development in the industry.

**KEYWORDS:** technological process, railway construction, railway roadbed, cryolithozone, permafrost soil, work nomenclature, artificial intelligence methods, expert system, knowledge base

**ACKNOWLEDGEMENTS:** This article was prepared based on research conducted as part of a grant provided by the Ministry of Education and Science in the form of a subsidy from the federal budget for the implementation of large-scale scientific projects in priority areas of scientific and technological development. The project topic is "Analysis and development of theoretical foundations with research and design of structural and technological solutions to ensure operational reliability of transport infrastructure objects in permafrost regions," Agreement No. 075-15-2024-559 dated 04/25/2024.

### FOR CITATION:

Shepitko T.V., Polyanskiy A.V., Artyushenko I.A., Nozdrachev A.S. Technological justification of constructive solutions for railway roadbed on permafrost soils using an expert system. *Nanotechnologies in Construction*. 2025;17(6):760–774. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-6-760-774>. – EDN: TBQTFA.

## ВВЕДЕНИЕ

Интеграция искусственного интеллекта в решение организационно-технологических задач железнодорожного строительства (ЖДС) открывает новые возможности для повышения эффективности производства работ. Применение методов и средств искусственного интеллекта способно существенно преобразовать методологию проектирования и реализации объектов железнодорожной инфраструктуры, особенно в зонах со сложными природно-климатическими и инженерно-геологическими условиями. В числе ключевых сфер воздействия выделяются [1, 2]:

- 1) анализ данных осуществленных проектов для планирования временных и финансовых параметров с учетом меняющихся условий производства работ;
- 2) оптимизация распределения строительных ресурсов (рабочих и техники) по участкам строительства;
- 3) оценка технологичности конструктивных решений;
- 4) поиск оптимальных вариантов технологических процессов.

Ориентация на интеллектуальные методы обусловлена спецификой технологических задач ЖДС, которые часто относятся к классу сложных систем с нечеткими границами. Такие задачи не поддаются описанию средствами традиционной математики и требуют оригинальных подходов. В частности, формализация процесса технологического обоснования конструктивных решений, требующая интуитивных приемов и опытных знаний разработчика организационно-технологической документации (ОТД) [2, 3], сталкивается с масштабностью поискового пространства. Несмотря на дискретность множества решений, их комбинационное разнообразие делает непригодными исключительно вычислительные методы [4–7].

Средства искусственного интеллекта, обладающие способностью к обучению и адаптации, становятся ключевым инструментом в таких ситуациях. Коренное отличие их подхода от аналитических методов заключается во внедрении опыта специалистов и профессиональных знаний в алгоритмические решения. Это обеспечит разработчикам ОТД возможность не только сохранять, но и систематизировать накопленный опыт, что приведет к повышению надежности решений и сокращению времени их принятия [2, 8].

Внедрение таких систем обеспечивает переход от рутинных процедур к построению адаптивных моделей, способных учитывать нелинейные связи между технико-экономическими параметрами, динамикой среды и организационными ограничениями.

Это, в свою очередь, создает основу для разработки гибких и эффективных технологических решений для ЖДС в сложных условиях.

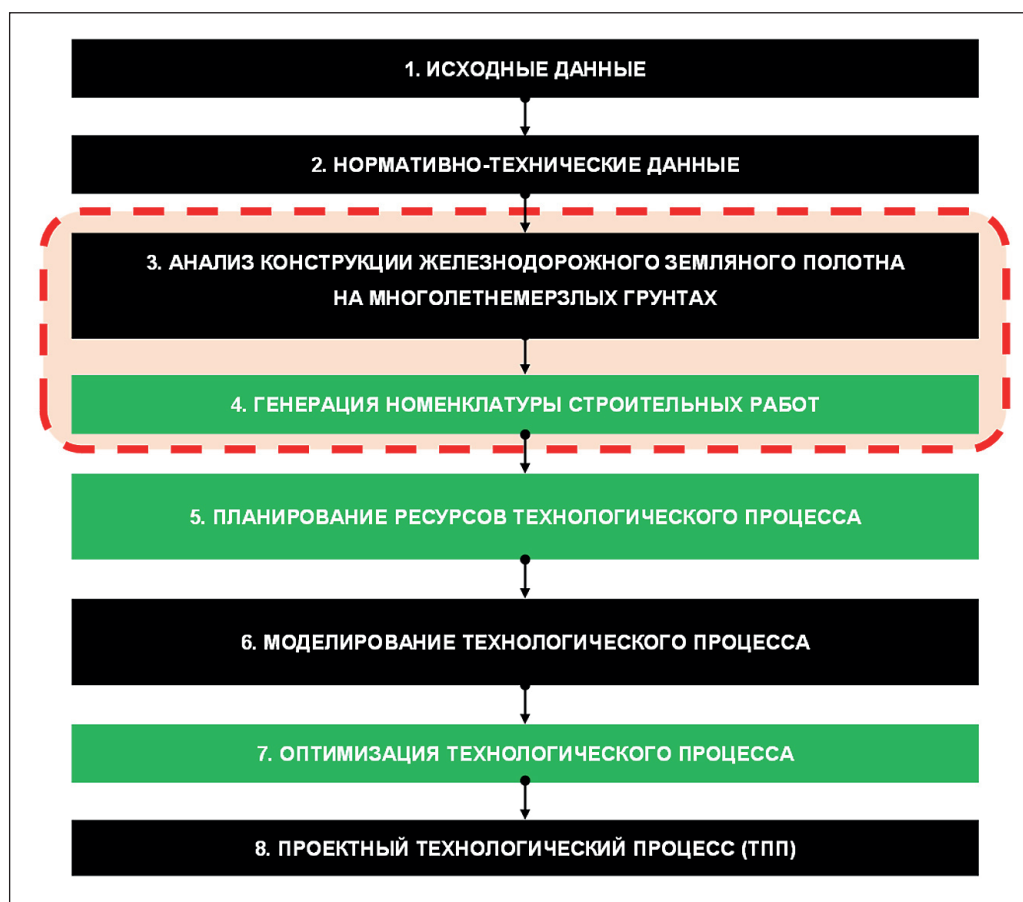
## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование применения искусственного интеллекта в технологическом проектировании ЖДС в сложных условиях способствовало созданию перспективных схем разработки ОТД. На рис. 1 представлена структурная схема интеллектуального проектирования технологического процесса возведения железнодорожного земляного полотна (ЖДЗП) на многолетнемерзлых грунтах (ММГ). Согласно представленной в работе схеме (рис. 1), этапы 1, 2, 3, 6 и 8 реализуют расчетные процедуры, тогда как этапы 4, 5 и 7 требуют реализации алгоритмов, сочетающих математические расчеты с логическими операциями для анализа взаимозависимостей между модулями. Последние, выступая связующим звеном между расчетными блоками, подтверждают необходимость создания комплексной автоматизированной платформы, объединяющей традиционные расчетные методы с интеллектуальными компонентами, что обеспечивает системную координацию этапов технологического обоснования конструктивных решений ЖДЗП на ММГ [2, 7, 8].

В настоящей работе рассмотрено решение задач технологического обоснования конструктивных решений ЖДЗП на ММГ, охватывающих этапы 3 и 4. Следует отметить, что процесс возведения ЖДЗП в таких условиях характеризуется длительностью, высокой ресурсоемкостью и необходимостью координации всех участников строительства. Эти факторы определяют ключевые технологические особенности [9]:

- 1) территориальная привязка ЖДЗП;
- 2) ресурсная мобильность (перемещение рабочих и техники, транспортировка материалов, монтаж/демонтаж техники и конструкций);
- 3) вариативность параметров (разнообразие форм, размеров, эксплуатационных характеристик);
- 4) специфику круглогодичного строительства в сложных (неблагоприятных) природно-климатических условиях.

Для учета вышеуказанных особенностей предлагается разбить технологический процесс возведения ЖДЗП на простые технологические процессы (ПТП), выполняемые на отдельных захватках с привлечением квалифицированных бригад. Учет технологических особенностей требует системного подхода к планированию работ, обеспечивающего синхронизацию во времени и пространстве для достижения качества, безопасности и экономичности.



**Рис. 1.** Структурная схема интеллектуального проектирования технологического процесса возведения железнодорожного земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах

Первым этапом технологического обоснования является анализ конструкции ЖДЗП на ММГ (рис. 1, этап 3). Для этого разработана процедура декомпозиции объекта на составляющие элементы (рис. 2), что позволяет рассматривать ЖДЗП как иерархическую систему с определенными взаимосвязями между подсистемами. Формирование информационной модели ЖДЗП на ММГ включает описание технических и конструктивных параметров для последующей автоматизации процедуры декомпозиции.

Для осуществления декомпозиции ЖДЗП используется графовая модель конструктивного решения (КР), представленная ориентированным графом (орграфом)  $G_{RS_{PS}}^{CS}$  (рис. 3). Вершины графа соответствуют конструктивным элементам (КЭ), а ребра отражают технологические зависимости между ними. Реализация процедуры декомпозиции ЖДЗП на ММГ в автоматизированном режиме предполагает представление орграфа в матричной форме. Для этого можно воспользоваться матрицей смежности  $A = \|a_{i,j}\|$ , которая позволяет формализовать вершины орграфа ( $a_i$  и  $a_j$ ) и связи (ребра) между ними ( $v_{i,j}$ ), что может быть представлено как:

$$A = \begin{cases} a_{i,j} = 1, & \text{if } v_{i,j} \neq 0; \\ a_{i,j} = 0, & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

Это позволяет свести задачу к поиску оптимального пути в орграфе, где конструктивные элементы и связи между ними формализуют модель конструктивной схемы ЖДЗП на ММГ:

$$G_{RS_{PS}}^{CS} = \{CE, SL\}, \quad (2)$$

где  $CE$  — конструктивные элементы,  $SL$  — структурные связи (рис. 4).

Графовая модель, разработанная на предыдущем этапе, служит основой для реализации второго этапа технологического обоснования ЖДЗП на ММГ — автоматизированного формирования (генерации) номенклатуры строительных работ (НСР) с применением экспертной системы (рис. 1, этап 4). Применение графовой структуры, а именно структурированных технологических связей между конструктивными элементами обеспечивает формализацию



Рис. 2. Декомпозиция железнодорожного земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах на конструктивные элементы

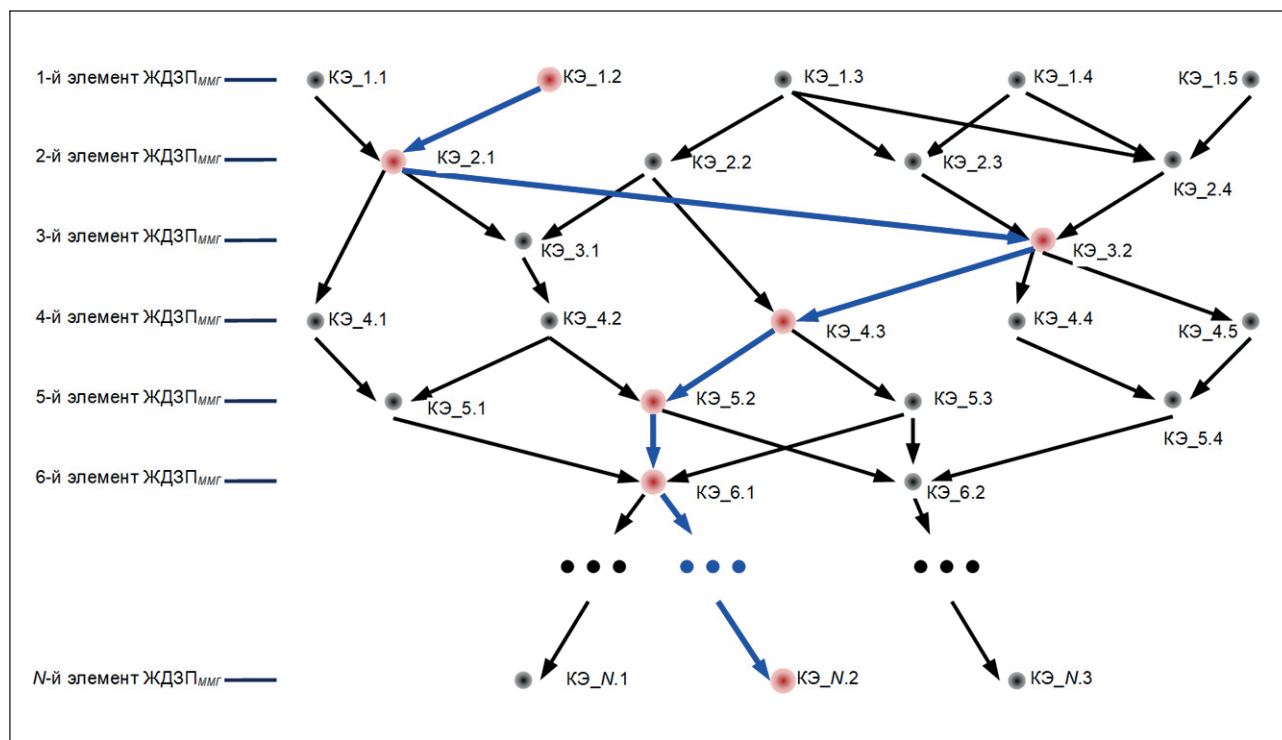


Рис. 3. Фрагмент общей графовой модели железнодорожного земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах с выбранной последовательностью конструктивных элементов (КЭ)

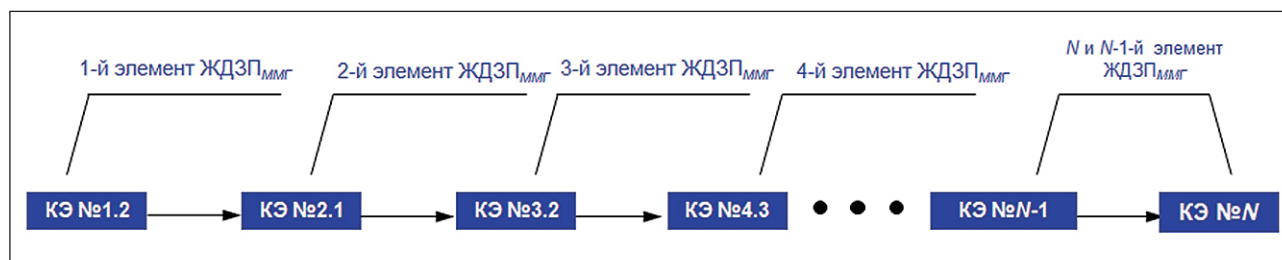


Рис. 4. Графовая модель конструктивной схемы железнодорожного земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах: КЭ (СЭ) – конструктивный элемент

и систематизацию данных перед генерацией перечня работ [2, 7].

Следует отметить, что формирование номенклатуры строительных работ, которое играет ключевую роль в разработке технологических процессов и создании ОТД, характеризуется высокой сложностью и уязвимостью к ошибкам. Это объясняется, прежде всего, ограниченностью доступной информации, временными ограничениями и необходимостью анализа обширных нормативно-технических данных. Последствия таких ошибок критичны для экономической и технической безопасности производства работ [12–20].

Интеллектуализация формирования номенклатуры строительных работ посредством экспертной системы призвана минимизировать количество ошибок и повысить эффективность разработки технологических процессов.

Для решения этих задач предложено использование производственных экспертных систем (ЭС), сочетающих формализованные аналитические модели с эвристическими методами. В этом случае появляется возможность обеспечить реализацию трудноформализуемых этапов разработки технологических процессов в интеллектуальном режиме, повысить объективность экспертизы и сократить временные затраты. В то же время важным преимуществом экспертных систем является их способность к накоплению, хранению и модификации знаний, что позволяет минимизировать субъективные факторы, влияющие на принятие решений. В отличие от традиционных методов, они обеспечивают системный анализ особенностей задачи, что критически важно

при работе в тех случаях, когда параметры ЖДЗП на ММГ отличаются вариативностью и динамикой [12–20].

Для реализации интеллектуального режима работы выбрана продукционная модель ЭС, основанная на правилах вида «ЕСЛИ (факт), ТО (действие)». Такая модель имеет следующие преимущества [2, 5–7, 11, 21, 22]:

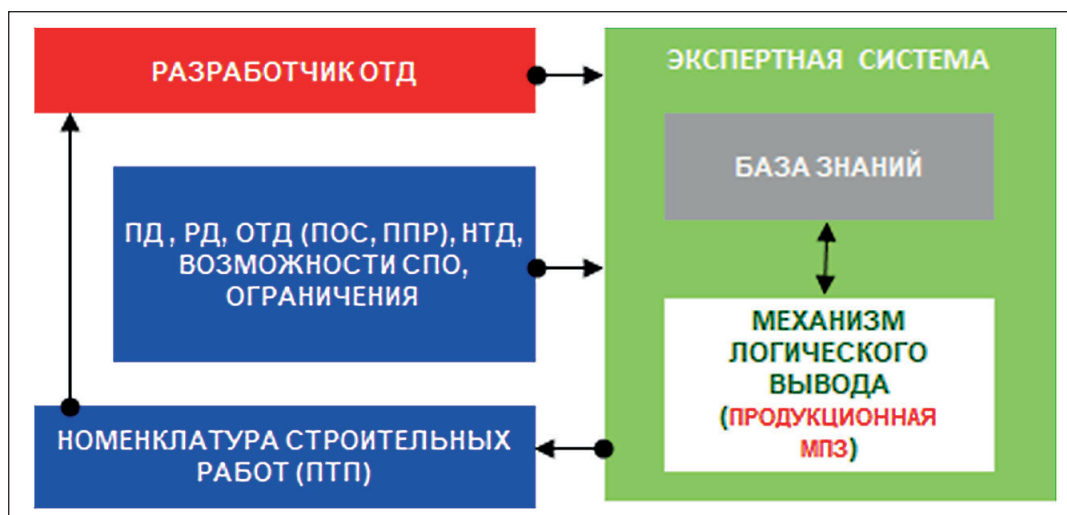
- наглядность — за счет семантической прозрачности правил;
- приспособленность — адаптация к дискретным процессам, типичным для ЖДС;
- модульность — возможность динамического расширения базы знаний без нарушения целостности системы.

База знаний ЭС — основной компонент, который позволяет формализовать знания в виде продукционных правил:

$$\{\gamma\} \Rightarrow \delta, \quad (3)$$

где  $\gamma$  — antecedentes (факты),  $\delta$  — консеквент (действие). Механизм логического вывода (рис. 5) обеспечивает поиск решений через анализ соответствия antecedентов текущему состоянию предметной области (в данном случае: сведения, данные, ограничения, возможности возведение ЖДЗП в условиях распространения ММГ). Для оптимизации работы при большом объеме правил применяется обратная стратегия вывода, начинающаяся с целевого факта, что ускоряет процесс принятия решений [2, 7, 11].

Рис. 5 иллюстрирует схему работы продукционной экспертной системы, включающую базу знаний



**Рис. 5.** Схема работы экспертной системы: ОТД - организационно-технологическая документация; ПД – проектная документация; РД – рабочая документация; ПОС – проект организации строительства; ППР – проект производства работ; НТД – нормативно-техническая документация; СПО – строительная (подрядная) организация; ПТП – простой технологический процесс; МПЗ – модель представления знаний

(хранилище продукционных правил) и механизм логического вывода (модуль, реализующий поиск решений).

Процедура генерации НСР состоит из трех этапов [2, 7]:

1) интерактивное взаимодействие — получение исходных данных от разработчика ОТД (система анализирует конструктивные особенности ЖДЗП, включая уникальные требования к материалам, геометрическим параметрам и взаимосвязям элементов, обусловленные сложными условиями ММГ);

2) обработка данных — классификация строительных работ по принадлежности к конструктивным элементам (КЭ) ЖДЗП с применением ЭС (учитываются логические принципы разработки технологического процесса, включающие использование последовательности работ, привязанных к отдельным конструктивным элементам с последующим их объединением в единую систему);

3) формирование результатов — создание структурированного перечня строительных работ (на уровне

ПТП) с указанием их взаимосвязей (учитывается ресурсное обеспечение работ, в частности, объемы, фронт и продолжительность работ, технические возможности подрядной организации, что критически важно для адаптации технологических процессов к реальным условиям производства работ).

Таким образом, экспертная система анализирует графовую модель конструктивной схемы ЖДЗП (рис. 4), выявляя ПТП и их технологические связи. А результатом будет являться номенклатура строительных работ, структурированная по  $N$  слоям, каждому из которых соответствует определенный конструктивный элемент (рис. 6). Такой подход обеспечивает визуальную прозрачность генерации НСР, позволяя определить предшествующие этапы для каждого ПТП и синхронизировать их выполнение.

Применение ЭС способствует:

- автоматизации рутинных этапов (например, классификации работ);
- ускорению принятия решений за счет интеграции технологических закономерностей;

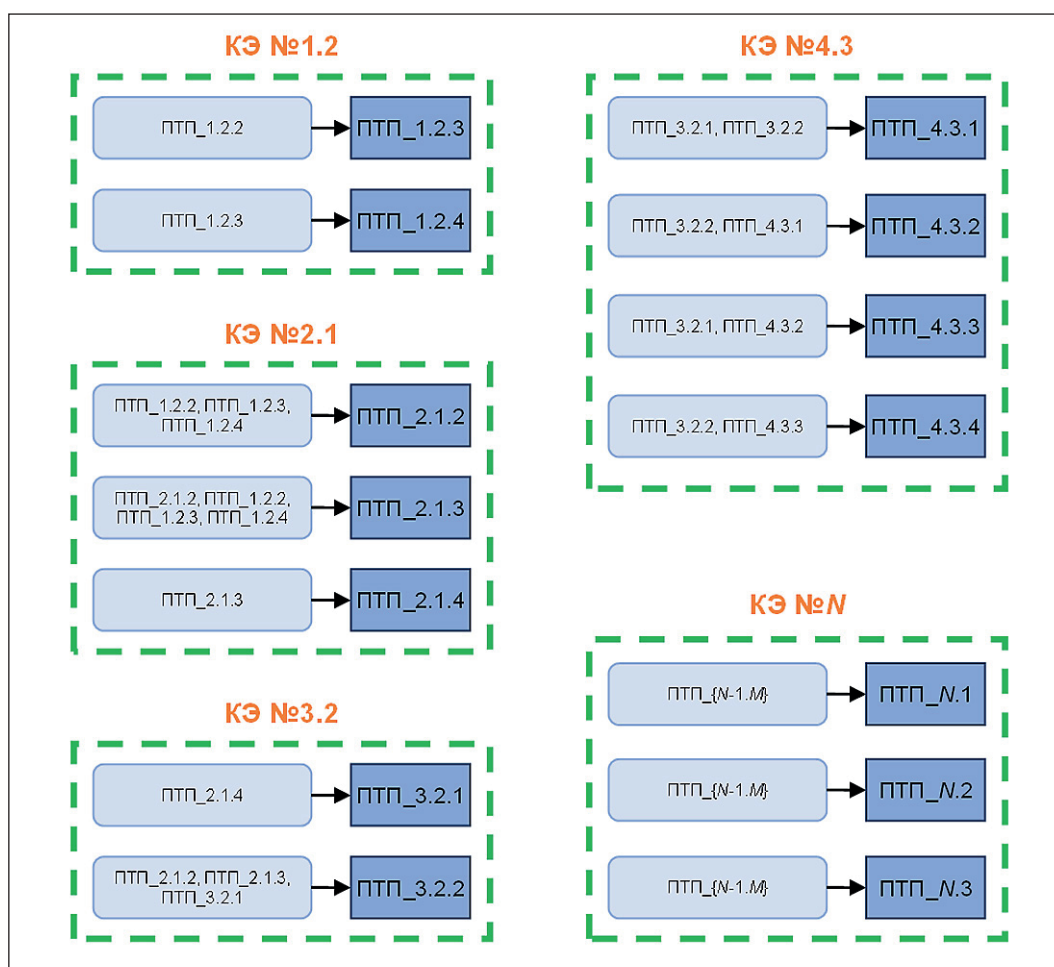


Рис. 6. Взаимосвязи между простыми технологическими процессами (ПТП) с привязкой к конструктивным элементам (КЭ)

СИСТЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

- формированию структурированной номенклатуры строительных работ, включая ресурсные характеристики ПТП, что станет основой для календарного планирования [12–20].

Внедрение экспертных систем в технологическое обоснование конструктивных решений ЖДЗП на ММГ не только способствует формализации сложных технологических процессов, но и создает основу для их дальнейшей эволюции в рамках цифровой трансформации железнодорожного строительства.

Несмотря на ограниченность возможностей полной замены разработчика ОТД (человеческого фактора), ЭС становится инструментом, минимизирующим количество ошибок и оптимизирующим временные затраты. Это позволяет перейти от вариантного проектирования к интеллектуальному сопровождению процессов ЖДС, повышая уровень автоматизации и надежности технологических решений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Практическая реализация методологии технологического обоснования конструктивных решений ЖДЗП на ММГ осуществляется посредством применения двух экспериментальных программных модулей (ЭПМ), разработанных для автоматизации ранее рассмотренных этапов (3 и 4, см. рис. 1)):

1) «Конструкция-М» — среда для автоматизированной декомпозиции ЖДЗП на отдельные конструктивные элементы;

2) «Техструктура-М» — среда, обеспечивающая технологическое обоснование и включающая:

- оболочку взаимодействия — интерфейс для ввода и корректировки данных;
- базу знаний «Технология» — хранилище продукционных правил, формализующих технологические зависимости;

- механизм логического вывода — модуль, реализующий алгоритмы поиска оптимальных решений на основе графовых моделей;

- базу данных «Техструктура-М» — репозиторий, хранящий результаты генерации номенклатуры работ и параметры конструктивных элементов.

Далее будет рассмотрен пример применения двух ЭПМ для технологического обоснования насыпи ЖДЗП на ММГ.

На рис. 7 показан поперечный профиль насыпи ЖДЗП на ММГ (на участке подтопления), который анализируется с применением ЭПМ.

Сначала используется модуль «Конструкция-М» (рис. 8). В ходе его работы выполняется:

- ввод исходных данных: геометрические параметры насыпи, характеристики грунтов, свойства материалов и элементов конструкции;

- автоматизированная декомпозиция ЖДЗП на конструктивные элементы с использованием графовой модели, где вершины соответствуют элементам, а ребра — технологическим связям.

Результатом работы ЭПМ является идентификация ключевых конструктивных элементов насыпи на участке подтопления, что позволяет формализовать их взаимодействие и определить требования к технологическим процессам.

В табл. 1 представлен перечень конструктивных элементов насыпи (на участке подтопления) с указанием их характеристик, полученный с применением ЭПМ «Конструкция-М».

Каждый конструктивный элемент насыпи определяет комплексный технологический процесс (КТП). Соответственно, для полученного перечня конструктивных элементов предусмотрено шесть КТП:

- 1) «Подготовка основания»;
- 2) «Устройство фильтрующих прослоек»;
- 3) «Возведение тела насыпи (нижняя часть)»;

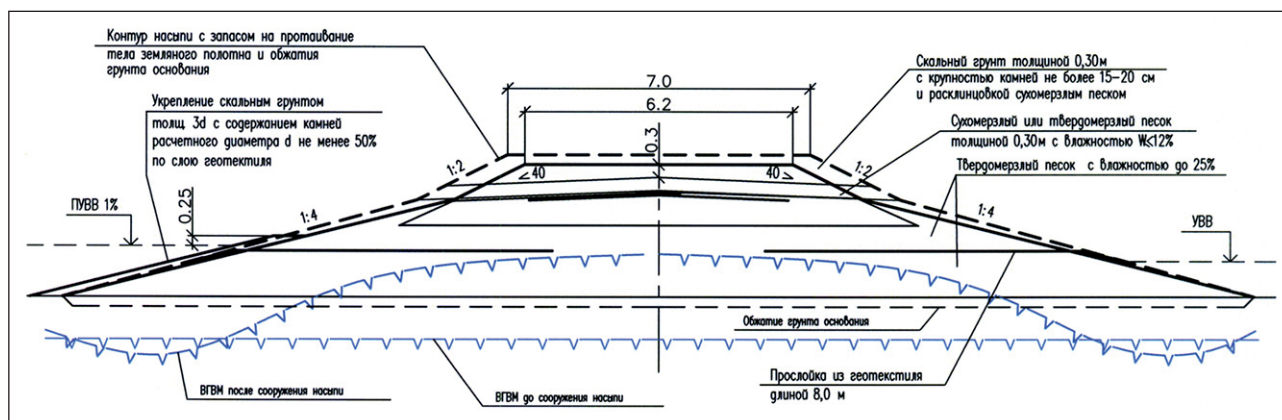


Рис. 7. Поперечный профиль насыпи железнодорожного земляного полотна на многолетнемерзлом грунте (на участке подтопления)

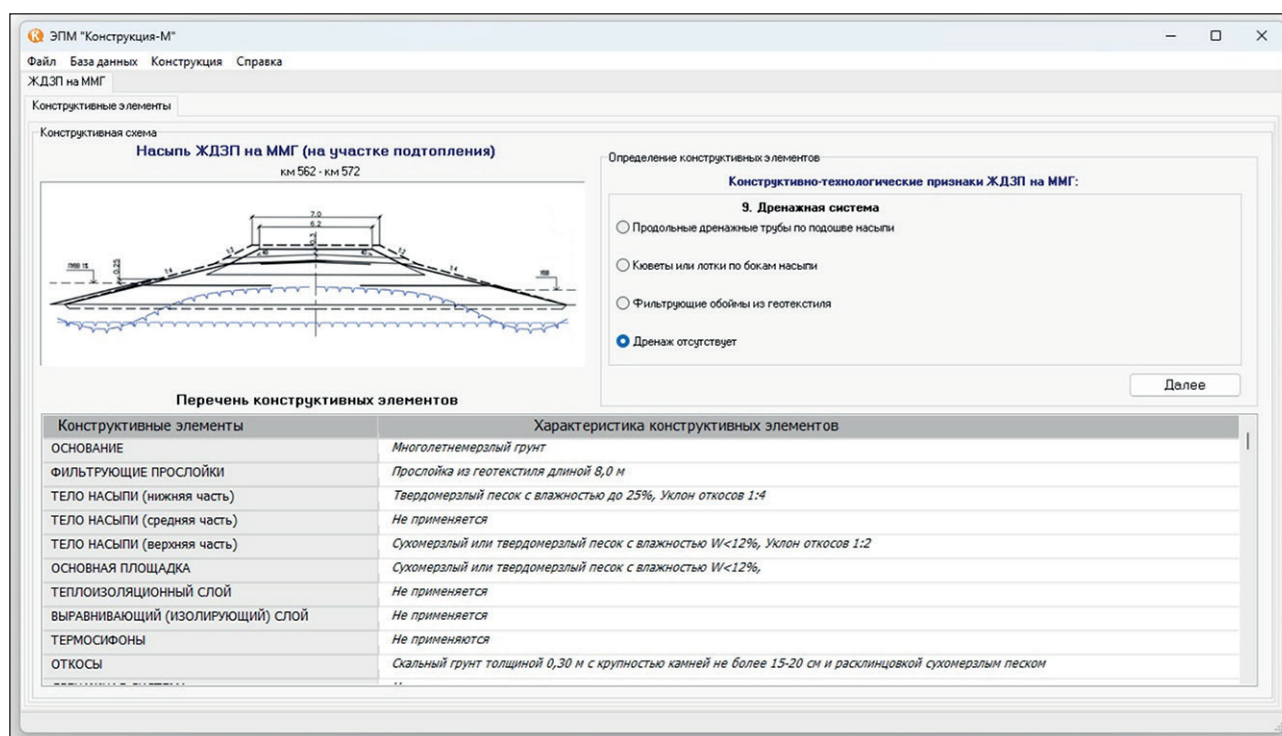


Рис. 8. Фрагмент работы ЭПМ «Конструкция-М»

Таблица 1. Конструктивные элементы насыпи ЖДЗП на ММГ (на участке подтопления) и их характеристики

Конструктивный элемент	Материал	Характеристика
КЭ №1. «ОСНОВАНИЕ»	грунт	многолетнемерзлый
КЭ №2. «ФИЛЬТРУЮЩИЕ ПРОСЛОЙКИ»	геотекстиль	Прослойка длиной 8,0 м
КЭ №3. «ТЕЛО НАСЫПИ (нижняя часть)»	грунт	Твердомерзлый песок с влажностью $W < 25\%$ ; Уклон откосов: 1:4
КЭ №4. «ТЕЛО НАСЫПИ (верхняя часть)»	грунт	Сухомерзлый или твердомерзлый песок с влажностью $W \leq 12\%$ ; Уклон откосов: 1:2
КЭ №5. «ОСНОВНАЯ ПЛОЩАДКА»	грунт	Сухомерзлый или твердомерзлый песок с влажностью $W \leq 12\%$ ;
КЭ №6. «ОТКОСЫ»	грунт	Скальный – толщиной 0,30 м с крупностью камней не более 15–20 см и раслинцовкой сухомерзлым песком

- 4) «Возведение тела насыпи (верхняя часть)»;
- 5) «Устройство основной площадки»;
- 6) «Укрепление откосов».

Далее осуществляется процедура генерации НСР на уровне ПТП, реализуемая с применением ЭПМ «Техструктура-М».

Запуск ЭПМ «Техструктура-М» инициирует работу в диалоговом режиме разработчика ОТД и экспертной системы. В рамках функционала модуля обеспечивается сбор и анализ параметров кон-

структивных элементов ЖДЗП на ММГ, включая характеристики материалов и условия производства работ. Также интерфейс модуля обеспечивает возможность корректировки исходных данных, работу с базой знаний (добавление, удаление, изменение правил-продукций).

База знаний экспертной системы реализована на основе производственных правил, которые формализуют причинно-следственные связи между конструктивными элементами ЖДЗП и технологически-

СИСТЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

ми процессами, специфичными для ЖДС в условиях распространения ММГ. База знаний организована в виде иерархической реляционной структуры, созданной на основе системы управления базами данных *MS Access*. В рамках этой архитектуры производственные правила формализованы через пять взаимосвязанных таблиц, что обеспечивает логическую целостность и структурированность знаний [2, 7].

Такой подход к работе с правилами позволяет адаптивно обновлять базу за счет включения данных, полученных в процессе практического определения НСР для ЖДЗП на ММГ. Использование реляционной модели обеспечивает не только хранение, но и эффективный поиск производственных правил в условиях многозадачной работы, минимизируя избыточность данных и ускоряя процессы логического вывода.

Преимуществом выбранной архитектуры является возможность динамического расширения базы знаний без нарушения целостности системы. Это обеспечивает адаптивность системы к новым условиям, расширяя ее функциональность через накопление и структурирование опыта. Ключевой особенностью является возможность динамического обновления базы знаний, что позволяет учитывать изменения в нормативно-технических требованиях и совершенствовать алгоритмы принятия решений на основе анализа реальных технологических решений [2, 7].

Использование реляционной СУБД обеспечивает не только хранение, но и эффективный поиск производственных правил в условиях работы системы. Каждая таблица базы отвечает за конкретный аспект знаний: от описания конструктивных элементов до связей между ними и соответствующими технологическими процессами. Это позволяет минимизировать избыточность данных и ускорить процессы логического вывода при генерации НСР.

Разработанная структура базы знаний обеспечивает высокую гибкость системы, что критически важно при решении задач в условиях сложных геотехнических и климатических параметров ММГ. Ее модульность позволяет вносить изменения в отдельные правила без нарушения целостности всей системы, что особенно актуально для непрерывного улучшения качества технологических решений в ЖДС [2, 7].

Интерфейс ЭПМ «Техструктура-М» включает в себя следующие режимы [2, 7]:

1) «Конструкция» – позволяет работать с типами ЖДЗП на ММГ, перечнем конструктивных элементов ЖДЗП на ММГ, сформированным в ЭПМ «Конструкция-М» и комплексными работами (КТП) (рис. 9);

2) «БД «Техструктура-М» – позволяет вводить, изменять, накапливать, просматривать: перечни ПТП; параметры (конструктивные элементы) ЖДЗП на ММГ; условия реализации КТП для возведения конструктивного элемента ЖДЗП на ММГ; факторы

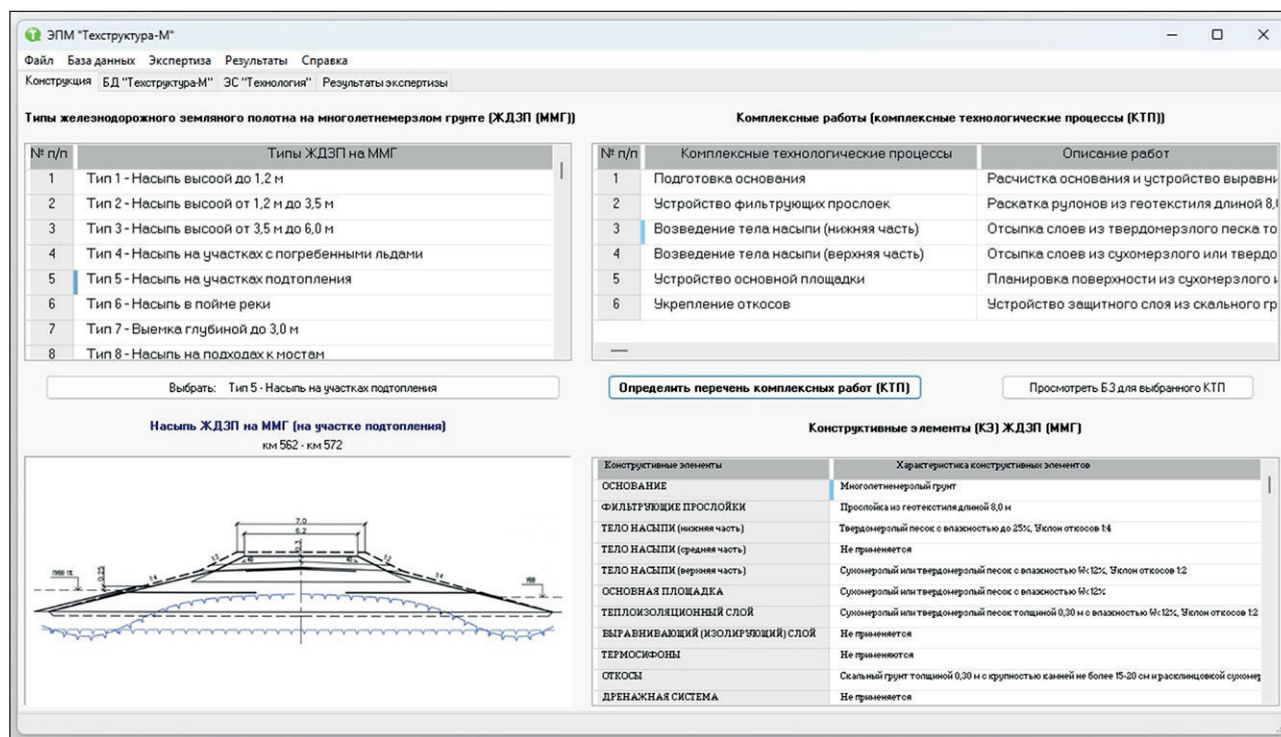


Рис. 9. Режим работы ЭПМ «Техструктура-М»: «Конструкция»

СИСТЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

реализации КТП для возведения конструктивного элемента ЖДЗП на ММГ; правила продукционно-го типа (рис. 10), которые представлены кортежем, содержащим четыре компонента в кодированной форме:

$$\begin{aligned} & \{\{\text{Условия реализации КТП}\} \Rightarrow \\ & \quad \{\text{Факторы реализации КТП}\} \rightarrow \\ & \{\text{Работы (ПТП)}\} \leftrightarrow \{\text{Работы (норматив)}\}; \end{aligned}$$

3) «ЭС «Технология» – позволяет выбирать факторы с учетом условий реализации КТП для возведения конструктивного элемента ЖДЗП на ММГ, с определением логической последовательности ПТП и соответствующих им работ из нормативных источников (рис. 11);

4) «Результаты экспертизы» – представляют результаты экспертизы – номенклатуру строительных работ (ПТП) для возведения ЖДЗП на ММГ, которая содержит совокупность следующих данных (рис. 12):

{<Номер работы>-<Название работы (ПТП)>-<Код работы в таблице БД>-<Название работы (норматив): [Код работы. Название работы. Измеритель. (Нормы времени). (Нормы машинного времени). (Трудовые ресурсы). (Технические средства). (Идентификаторы последующих работ)]>}.

Представленные на рис. 9–12 фрагменты работы ЭПМ «Техструктура-М» демонстрируют этапность генерации номенклатуры строительных работ от процедуры анализа конструктивных элементов насыпи ЖДЗП до формирования перечня работ для всей конструкции.

При этом на первом этапе определяется перечень комплексных работ (КТП) с привязкой к перечню конструктивных элементов для рассматриваемого участка ЖДЗП. На втором этапе в соответствии с предложенными условиями и факторами реализации КТП (для возведения рассматриваемого конструктивного элемента ЖДЗП на ММГ) определены ПТП. Одновременно с учетом правил к ПТП привязывается нормативное описание работы, взятое из сборников государственных элементно-сметных норм (ГЭСН), или предлагается расчетная формула для определения технологических параметров.

Результаты ГНСР, включая перечень ПТП с их атрибутивными характеристиками, можно сохранить в базе данных, что обеспечит их доступность для последующей аналитической обработки.

В табл. 2 показан фрагмент перечня работ (ПТП), входящих в комплексный технологический процесс «3. Возведение тела насыпи (нижней части)».

Перечень работ, представленных в табл. 2, учитывает привязку к конкретным ресурсам строительной (подрядной) организации, поэтому ряд работ пред-

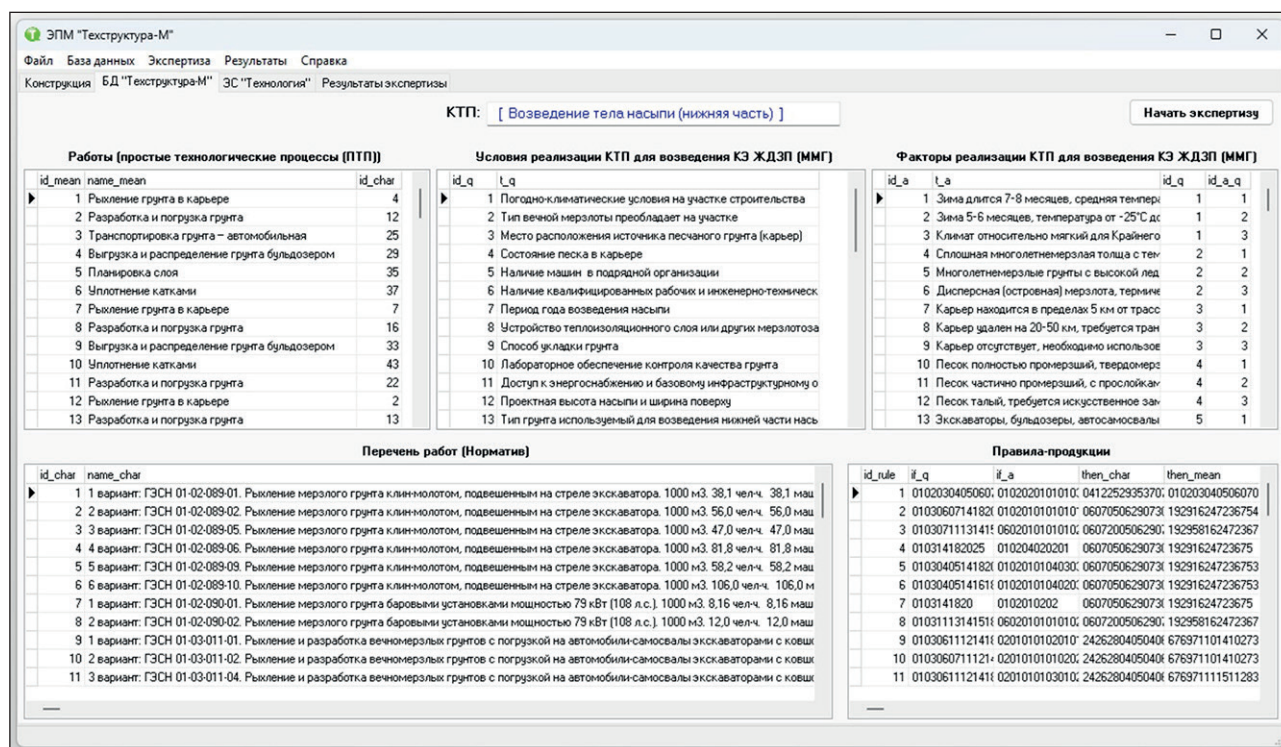


Рис. 10. Режим работы ЭПМ «Техструктура-М»: «БД «Техструктура-М»



**Таблица 2.** Фрагмент перечня работ, входящих в комплексный технологический процесс «3. Возведение тела насыпи (нижней части)»

№ п/п	Строительные работы (ППП)	Обоснование, шифр	Наименование работ по нормативным источникам	Норма времени,		Состав бригады	Машины
				чел.-ч	маш.-ч		
...							
2.5.2	Уплотнение грунтоуплотняющей машиной	ГЭСН 01-02-003-02+08	Уплотнение грунта вибрационными катками 2,2 т	12,3	10,5 1,8+(1,8×л)	Машинист бульдозера, Машинист вибротатка	Бульдозер, мощность 79 кВт (108 л.с.); Каток дорожный самоходный вибрационный, масса 2,2 т
3. Возведение тела насыпи (нижней части)							
3.1.1	Рыхление грунта в карьере	ГЭСН 01-02-089-06	Рыхление мерзлого грунта клин-молотом, подвешенным на стреле экскаватора	81,8	81,8	Машинист экскаватора	Экскаваторы одноковшовые дизельный на гусеничном ходу, емкость ковша 0,65 м³
3.1.2	Рыхление грунта в карьере	ГЭСН 01-02-090-01	Рыхление мерзлого грунта баровыми установками мощностью 79 кВт (108 л.с.)	8,16	8,16	Машинист трактора	Установка однобаровая на тракторе, мощность 79 кВт (108 л.с.), ширина щели 54 см
3.2.1	Разработка и погрузка грунта	ГЭСН 01-03-011-05	Рыхление и разработка вечномерзлых грунтов с погрузкой на автомобили-самосвалы экскаваторами с ковшом вместимостью 2,5; 1,6; 1,25 м³	6,03 145,17	3,96 83,39 28,91	Рабочие, Машинист бульдозера, Машинист экскаватора ×2	Бульдозер, мощность 79 кВт (108 л.с.); Экскаватор одноковшовый дизельный на гусеничном ходу, емкость ковша 0,65 м³; Экскаватор одноковшовый дизельный на гусеничном ходу, емкость ковша 1,6 м³
3.2.2	Разработка и погрузка грунта	ГЭСН 01-03-012-02	Рыхление и разработка вечномерзлых грунтов с погрузкой на автомобили-самосвалы экскаваторами с ковшом вместимостью 1; 0,65; 0,5 м³	8 136,92	5,5 83,39 48,03	Рабочие, Машинист бульдозера, Машинист экскаватора ×2	Бульдозер, мощность 79 кВт (108 л.с.); Экскаватор одноковшовый дизельный на гусеничном ходу, емкость ковша 0,65 м³; Экскаватор одноковшовый дизельный на гусеничном ходу, емкость ковша 1,0 м³
3.2.3	Разработка и погрузка грунта	ГЭСН 01-03-013-02	Рыхление и разработка вечномерзлых грунтов с погрузкой на автомобили-самосвалы экскаваторами с ковшом вместимостью 0,4; 0,25 м³	20,76 143,59	14,3 45,9 83,39	Рабочие, Машинист бульдозера, Машинист экскаватора ×2	Бульдозер, мощность 59 кВт (80 л.с.); Экскаватор одноковшовый дизельный на гусеничном ходу, емкость ковша 0,4 м³; Экскаватор одноковшовый дизельный на гусеничном ходу, емкость ковша 0,65 м³
3.3	Транспортировка грунта – автомобильная	Расчет	Транспортировка грунта автомобилями-самосвалами	$T_{ц}/V_k k_n n \cdot 60$	$T_{ц}/V_k k_n n \cdot 60$	Водитель × <i>m</i>	Автосамосвалы, 16–25 т
3.4.1	Выгрузка и распределение грунта бульдозером	ГЭСН 01-03-070-05+11	Разработка предварительно разрыхленного вечномерзлого грунта бульдозерами	1,87+(1,43×L/10)	1,87+(1,43×L/10)	Машинист бульдозера	Бульдозер, мощность 340 кВт (450 л.с.)
3.4.2	Выгрузка и распределение грунта бульдозером	ГЭСН 01-03-071-05+11	Засыпка траншей и котлованов бульдозерами в вечномерзлых грунтах	1,1+(0,44×L/10)	1,1+(0,44×L/10)	Машинист бульдозера	Бульдозер, мощность 340 кВт (450 л.с.)
3.5	Планировка споя	ГЭСН 01-03-072-02	Планировка площадей бульдозерами	0,08	0,08	Машинист бульдозера	Бульдозер, мощность 340 кВт (450 л.с.)
3.6.1	Уплотнение грунтоуплотняющей машиной	ГЭСН 01-02-001-02+08	Уплотнение грунта прицепными катками на пневмоколесном ходу 25 т	13,99+(1,25×g)	12,74 1,25+(1,25×g)	Машинист бульдозера, Машинист катка	Бульдозер, мощность 79 кВт (108 л.с.); Каток дорожный прицепной на пневмоколесном ходу, масса 25 т; Трактор на гусеничном ходу, мощность 79 кВт (108 л.с.)
3.6.2	Уплотнение грунтоуплотняющей машиной	ГЭСН 01-02-003-02+08	Уплотнение грунта вибрационными катками 2,2 т	12,3+(1,8×g)	10,5 1,8+(1,8×g)	Машинист бульдозера, Машинист вибротатка	Бульдозер, мощность 79 кВт (108 л.с.); Каток дорожный самоходный вибрационный, масса 2,2
4. Возведение тела насыпи (верхней части)							
4.1.1	Рыхление грунта в карьере	ГЭСН 01-02-089-06	Рыхление мерзлого грунта клин-молотом, подвешенным на стреле экскаватора	81,8	81,8	Машинист экскаватора	Экскаватор одноковшовый дизельный на гусеничном ходу, емкость ковша 0,65 м³
...							

Примечание: в таблице *L* – длина участка (захватки); *g* – число проходов по одному следу; *m* – количество автосамосвалов;  $T_{ц}$  – время цикла работы автосамосвала;  $V_k$  – объем ковша экскаватора;  $k_n$  – коэффициент первоначального наполнения; *n* – количество ковшей с грунтом, загружаемых в кузов автосамосвала

полагает несколько вариантов исполнения. Очевидно, что при небольшом количестве вариантов несложно выбрать один, удовлетворяющий одному или нескольким требованиям. Однако при увеличении вариативности необходимо будет решать задачу формирования оптимального перечня работ. По сути, потребуются решение задачи формирования оптимального технологического процесса, удовлетворяющего требованиям эффективности (критериям оптимальности). Таким образом, возникает необходимость решения задачи оптимизации, которая усложняется наличием нескольких критериев и большой размерностью. Решение такой задачи является предметом дальнейшего исследования и применения инструментария, в том числе относящегося к области искусственного интеллекта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги технологического обоснования конструктивных решений ЖДЗП на ММГ представляют собой фундамент для реализации инженерно-интеллектуальных подходов в проектировании технологических процессов. Полученные результаты обеспечивают формирование номенклатуры строительных работ, которая становится основой для разработки калькуляций трудозатрат, оптимизации организационной структуры технологического процесса и создания проектов производства работ.

Особое значение имеют следующие аспекты применения результатов исследования:

1) формализация технологических связей — полученные графовые модели конструктивных элементов и их взаимосвязей позволяют автоматически генерировать перечни ПТП, что минимизирует человеческий фактор при формировании ОТД.

2) многокритериальная оптимизация — данные о параметрах ПТП (трудозатраты, сроки, ресурсы) становятся входными данными для алгоритмов оптимизации, включая генетические и нейросетевые методы. Это обеспечивает выбор оптимальной последовательности работ с учетом таких критериев, как сокращение времени строительства, снижение затрат или минимизация рисков в условиях распространения ММГ.

3) интеграция в цифровые платформы — номенклатура строительных работ может быть внедрена в автоматизированные системы управления строительством, что ускоряет разработку календарных планов и мониторинг производства работ в сложных климатических и геологических условиях.

Полученные результаты не только формируют базу для интеллектуализации технологического проектирования ЖДС в условиях распространения ММГ, но и открывают перспективы для цифровой трансформации отрасли, обеспечивая соответствие требованиям современных стандартов строительной безопасности и экономической эффективности.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мастаченко В.Н. Искусственный интеллект в контексте транспортной науки. *Мир транспорта*. 2004;3:12-17.
2. Полянский А.В. Инженерно-интеллектуальное обеспечение технологических процессов в железнодорожном строительстве. Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство «Мир науки»». 2023;245. <https://doi.org/10.15862/39MNNPM23>
3. Завадкас Э.-К. Системотехническая оценка технологических решений строительного производства. 1991:256.
4. Антамошин А.Н., Близнова О.В., Бобов А.В., Большаков А.А., Лобанов В.В., Кузнецова И.Н. Интеллектуальные системы управления организационно-техническими системами. 2006:160.
5. Каклаускас А., Завадкас Э.К. Биометрическая и интеллектуальная поддержка решений: монография. 2012:344.
6. Ручкин В.Н., Фулин В.А. Универсальный искусственный интеллект и экспертные системы. 2009:238.
7. Полянский А.В. Теория и практика технологического обоснования конструктивных решений объектов железнодорожного пути с применением экспертной системы. *Транспортные сооружения*. 2020;7;3:1. <https://doi.org/10.15862/01SATS320>
8. Polyanskiy A. Stages of intellectualization of engineering and technical support of railway construction. *Transportation Research Procedia*: 12, Irkutsk-Krasnoyarsk. 2022:574-581. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.01.093>
9. Луцкий С.Я., Шепитько Т.В., Токарев П.М., Дудников А.Н. Строительство путей сообщения на Севере: Научно-практическое. 2009:286.
10. Нейман А.О. Системное управление ресурсопотоками строительных процессов: монография. 2006:240.

11. Полянский А.В. Основные принципы технологического обоснования конструктивных решений транспортных объектов с применением экспертной системы. Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы Десятой Международной научно-практической конференции. Т.1. Иркутск: ИрГУПС. 2019:499-504.
12. Гусаков А.А., Ильин Н.И., Эдели Х. и др. Экспертные системы в проектировании и управлении строительством. Москва. 1995:296.
13. Shehadeh A., Alshboul O., Al-Shboul K.F., Tatari O. An expert system for highway construction: Multi-objective optimization using enhanced particle swarm for optimal equipment management. *Expert Systems with Applications*. 2024;249(B):123621. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123621>
14. Cao J., Vakaj E., Soman R.K., Hall D.M. Ontology-based manufacturability analysis automation for industrialized construction. *Automation in Construction*. 2022;139:104277. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104277>
15. Zheng Y., Törmä S., Seppänen O. A shared ontology suite for digital construction workflow. *Automation in Construction*. 2021;132:103930. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103930>
16. Irani Z., Kamal M.M. Intelligent Systems Research in the Construction Industry. *Expert Systems with Applications*. 2014;41;4(1):934-950. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.06.061>
17. Hajdasz M. Flexible management of repetitive construction processes by an intelligent support system. *Expert Systems with Applications*. 2014;41;4(1):962-973. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.06.063>
18. Waqar A. Intelligent decision support systems in construction engineering: An artificial intelligence and machine learning approaches. *Expert Systems with Applications*. 2024;249(A):123503. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123503>
19. Ors D.M., Ebid A.M., Mahdi I.M., Mahdi H.A. Decision support system to select the optimum construction techniques for bridge piers. *Ain Shams Engineering Journal*. 2023;14(10):102152. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102152>
20. Hwang B.-G., Shan M., Looi K.-Y. Knowledge-based decision support system for prefabricated prefinished volumetric construction. *Automation in Construction*. 2018;94:168-178. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.06.016>
21. Джексон П. Введение в экспертные системы. 2001;624.
22. Джарратано Д., Райли Г. Экспертные системы: Принципы разработки и программирование: монография. Москва. 2007;1147.

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Шепитько Таисия Васильевна** – доктор технических наук, профессор, и.о. директора института пути, строительства и сооружений, Российский университет транспорта, Москва, Россия, shepitko-tv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4785-1625>

**Полянский Алексей Викторович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Проектирование и строительство железных дорог», Российский университет транспорта, Москва, Россия, polal\_82@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6190-0481>

**Артюшенко Игорь Александрович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Проектирование и строительство железных дорог», Российский университет транспорта, Москва, Россия, tywka351@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7749-9626>

**Ноздрачёв Алексей Сергеевич** – ассистент кафедры «Проектирование и строительство железных дорог», Российский университет транспорта, Москва, Россия, alex14071953@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-8893-0991>

#### ВКЛАД АВТОРОВ

**Шепитько Т.В.** – научное руководство; анализ результатов.

**Полянский А.В.** – подготовка и написание текста, обработка данных; составление итоговых выводов.

**Артюшенко И.А.** – литературный обзор; теоретический анализ.

**Ноздрачёв А.С.** – доработка текста; обработка данных.

#### Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 22.10.2025; одобрена после рецензирования 04.12.2025; принята к публикации 08.12.2025