Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2020, №3, Том 7 / 2020, N 3, Vol. 7 <https://t-s.today/issue-3-2020.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/01SATS320.pdf>

DOI: 10.15862/01SATS320 (<http://dx.doi.org/10.15862/01SATS320>)

Теория и практика технологического обоснования конструктивных решений объектов железнодорожного пути с применением экспертной системы

Полянский А.В.

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Полянский Алексей Викторович, e-mail: polal_82@mail.ru

Аннотация. В статье представлены теоретические положения и практические возможности реализации технологического обоснования конструктивных решений объектов железнодорожного пути с применением экспертной системы. Железнодорожное строительство как сложная динамическая система, требует определенных затрат ресурсов на свое обслуживание. В то же время оно характеризуется применением новых, более совершенных конструктивных решений, материалов и технологий, развитием специализации исполнителей и связанных с этим большим числом участников технологического процесса. В этих условиях решающее значение приобретает эффективный контроль над технологией производства работ, выполняемых при строительстве объектов железнодорожного пути. Этого можно достигнуть путем совершенствования существующей системы инженерно-технического сопровождения железнодорожного строительства за счет внедрения подсистемы инженерно-интеллектуального обеспечения технологических процессов строительства объектов железнодорожного пути. Одной из задач инженерно-интеллектуального обеспечения технологических процессов является эффективное использование автоматизированных систем с элементами искусственного интеллекта. Их создание и внедрение ориентировано на достижение единого конечного результата: готового объекта железнодорожного пути соответствующего функционального назначения в установленные сроки, запланированной себестоимостью и трудозатратами, а также отвечающего современным требованиям безопасности в течение всего периода эксплуатации.

В рамках формирования методологии инженерно-интеллектуального обеспечения технологических процессов железнодорожного строительства были рассмотрены этапы технологического обоснования конструктивных решений объектов железнодорожного пути. Для этого были определены технологические особенности железнодорожного строительства. Описана процедура декомпозиции объекта железнодорожного пути на конструктивные элементы. Результаты, полученные на этапе декомпозиции, позволили определить возможности применения экспертных систем для разработки технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути. С учетом особенностей формализации ряда решаемых задач была разработана и описана методика генерации номенклатуры строительных работ с применением экспертной системы, построенной на продукционной модели представления знаний. На основе результатов теоретического исследования в статье представлены практические аспекты реализации технологического обоснования конструктивных решений с применением экспертной системы на примере возведения подтопленной насыпи железнодорожного земляного полотна.

Результаты, приведённые в статье, получены в ходе диссертационного исследования, выполненного автором.

Ключевые слова: технологический процесс; железнодорожное строительство; рабочая операция; номенклатура работ; объект железнодорожного пути; земляное полотно; методы искусственного интеллекта; экспертная система; база знаний

Theory and practice of constructive solutions technological justification for railway objects via the use of an expert system

Aleksey V. Polyanskiy

Russian University of Transport, Moscow, Russia

Corresponding author: Aleksey V. Polyanskiy, e-mail: polal_82@mail.ru

Abstract. In this article, we present the abstract theorem and the feasibility for the implementation of the technological justification of the structural concept for track railway line objects using the expert system. Railway construction as a complex dynamic system requires certain resources for maintaining it. At the same time, it is characterized by the use of new, more advanced design solutions, materials, and technologies, the performers' specialization development, and the attendant large number of participants in the technological process. Key role in these conditions gets effective standard operating procedures control, procedures that performed during the railway facilities construction. This can be achieved by improving the existing engineering and technical support system for railway construction by introducing an engineering and intellectual support subsystem for the technological processes of rail-way facilities construction. One of the tasks of technological processes engineering and intellectual support is the effective use of automated systems with artificial intelligence elements. Creation and implementation of automated systems with artificial intelligence elements are focused on achieving a single final result: a finished railway track facility of the corresponding functional purpose within the established deadlines planned prime cost and labor contribution and also up to date safety requirements throughout the entire operation period.

Within the scope of the methodology formation for engineering and intellectual support of railway construction technological processes, the stages of constructive solutions technological substantiation for railway objects were considered, and the railway construction technological features were determined. The procedure for the railway track object decomposition into structural elements is de-scribed here. The results obtained at the decomposition stage made it possible to determine the possibilities of using expert systems to develop a technological process for the railway track object construction. With account taken of special factors relating to formalization series of tasks at hand. By the aid of the expert system, which was built based on the knowledge representation production model, was developed and described methodology for generating a construction works nomenclature. Based on theoretical research results, practical aspects of the technological substantiation implementation of design solutions using an expert system were presented here through the example of the railway roadbed flooded carn construction.

During dissertation research done by the author, were obtained results that were presented in this article.

Keywords: technological process; railway construction; working operation; nomenclature of works; railway track object; roadbed; artificial intelligence methods; expert system; knowledge base

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License

Введение

Introduction

Железнодорожное строительство (ЖДС) представляет собой сложную динамическую систему, требующую определенных затрат ресурсов на свое обслуживание. Это относится как к разработке технологических процессов (ТП), так и к их реализации. Важная роль при этом отводится инженерам – разработчикам организационно-технологической документации (ОТД), которые, с одной стороны, несут ответственность за принимаемые технологические решения, а с другой стороны, обеспечивают адаптацию ТП строительства объекта железнодорожного пути (ОЖДП) к внутренним и внешним воздействиям. Реализация этой деятельности расширяет системный кругозор разработчика ОТД, повышает уровень его квалификации [1]. Очевидно, что на эффективность указанного комплекса существенное влияние оказывает «субъективный фактор». Также можно понять стремление строительной (подрядной) организации (СПО) обеспечить определенную независимость реализации ТП от исполнителей (трудовых и технических ресурсов) за счет применения системы инженерно-технического сопровождения (ИТС) ЖДС.

ИТС предполагает, в частности, организацию обращения рабочей документации, анализ, корректировку и выработку рекомендаций по совершенствованию конструкций, технологических процессов, обеспечению качества строительства ОЖДП. Современный этап развития ЖДС характеризуется интенсивным внедрением автоматизированных систем проектирования и управления в инженерную деятельность. Однако при всей своей привлекательности автоматизация создает новые проблемы, причиной которых является несовершенство программных решений, имеющихся сегодня в распоряжении инженерно-строительного корпуса [2].

В то же время появление в ЖДС, с одной стороны, новых, более совершенных конструктивных решений (КР), материалов и технологий, а с другой – повышение требований к качеству и безопасности исполнения ТП, вынуждает СПО внедрять автоматизированные системы в свою деятельность для обеспечения собственной рентабельности. Здесь важным элементом в рамках перечисленных требований является оперативность в разработке ТП и его адаптации к меняющимся условиям производства работ [3].

В этих условиях решающее значение приобретает эффективный контроль над технологией и организацией производства работ,

выполняемых при строительстве ОЖДП. И его можно достигнуть путем совершенствования существующей системы ИТС ЖДС за счет внедрения подсистемы инженерно-интеллектуального обеспечения ТП (ИИОТП) строительства ОЖДП [4].

Одной из задач ИИОТП является эффективное использование автоматизированных систем с элементами искусственного интеллекта (ИИ), то есть систем, использующих не только вычислительные процедуры, но и логические, близкие человеческому мышлению [4].

Основной целью использования таких систем является получение завершеного строительством ОЖДП в установленные сроки, запланированными себестоимостью и трудозатратами.

Использование методов и средств ИИ делает возможной комплексную разработку ТП в автоматизированном режиме, начиная с определения перечня строительных работ и заканчивая формированием технологических схем на их производство. Применение системотехнического подхода к процедуре технологического обоснования КР ОЖДП, позволило выделить два этапа необходимых для ее реализации: декомпозицию ОЖДП на конструктивные элементы (КЭ) и генерацию номенклатуры строительных работ [4; 5].

Интеллектуализация технологического обоснования КР ОЖДП предполагает разработку расчетно-логических моделей, основанных на методах ИИ, для решения определенного круга задач, как правило, трудноформализуемых, характеризующих творческие аспекты исследуемой проблемы [2; 6–8]. Существующие расчетные модели в большей степени ориентированы на вычислительные операции при реализации методов оптимизации, методов синтеза и принятия решений, чем на реализацию эвристических алгоритмов, функций СУБД и т. п. [9; 10]. Развитие методов обработки знаний способствовало использованию в автоматизированном режиме технологий и средств ИИ.

Сочетание расчетных и расчетно-логических моделей при решении задач разработки ТП должно лечь в основу ИИОТП строительства ОЖДП. Таким образом, для решения подобных задач имеет смысл использовать симбиоз методов обработки знаний и традиционных математических методов. Такие комплексные задачи не удастся решить только на основе аналитических методов [9; 10]. Для этих целей возможно привлечение методов ИИ, о которых будет рассказано далее.

1. Теоретические основы интеллектуализации технологического обоснования конструктивных решений объектов железнодорожного пути

1. Theoretical foundations of technological justification intellectualization of railway construction entity structural concept

1.1 Технологические особенности строительства объектов железнодорожного пути

1.1 Technological peculiarities of the railway track construction

Строительство ОЖДП является достаточно продолжительным, ресурсоемким и предполагает участие организаций и предприятий различных отраслей экономики. Перечисленное определяет принципиальные технологические особенности ОЖДП [3]:

1. неподвижность – ОЖДП территориально закреплены;
2. ресурсоемкость – рабочая сила, технические средства и материалы перемещаются от одного ОЖДП к другому, что требует дополнительных затрат на транспортировку, размещение, демонтаж и монтаж строительных конструкций;
3. многообразие – ОЖДП отличаются внешним видом, формами, размерами, расположению;
4. характер строительства – круглогодичный характер строительства ОЖДП, неблагоприятные природно-климатические и инженерно-геологические условия ведения строительных работ.

Следует учитывать, что ТП строительства ОЖДП выполняется на отдельных рабочих местах (захватках), при этом производится его деление на рабочие операции (РО). Для выполнения РО привлекаются звенья рабочих соответствующей квалификации и бригады, предназначенные для выполнения отдельных видов работ.

Технологические особенности ОЖДП требуют установления технически грамотных и эффективных методов выполнения строительных работ, их взаимоувязки в пространстве и времени, с целью обеспечения качества и экономичности строительства ОЖДП.

1.2 Декомпозиция объекта железнодорожного пути на конструктивные элементы

1.2 Railway track object decomposition into structural elements

Решение задачи технологического обоснования КР ОЖДП требует проведения его конструктивного анализа. Для этого с учетом назначения, конструктивных и технологических особенностей ОЖДП целесообразно осуществить его декомпозицию на конструктивные элементы (КЭ). Декомпозиция, как процесс расчленения, позволяет рассматривать любой ОЖДП как сложную систему, состоящую из отдельных взаимосвязанных подсистем. На рисунке 1 показаны этапы реализации процедуры разделения ОЖДП на КЭ. При формировании конструктивной схемы ОЖДП определяется перечень КЭ и структурные связи между ними.

Для реализации процедуры декомпозиции ОЖДП на КЭ достаточно автоматизированного режима, реализованного в специально разработанном программном модуле «Конструкция». Модуль дает возможность разработчику ОТД в режиме диалога определить и оценить варианты КЭ, наиболее характерные (вероятные) для рассматриваемого ОЖДП [11].

В общем случае декомпозиция на КЭ предполагает формирование информационной модели ОЖДП. Единицей информационного описания являются технические и конструктивные параметры ОЖДП. В этом случае автоматизированный анализ этих параметров определяет набор взаимосвязанных КЭ. С учетом указанного разработан метод декомпозиции ОЖДП на КЭ, основанный на поиске пути в орграфе.

Рисунок 1. Декомпозиция объекта железнодорожного пути на конструктивные элементы (разработано автором)

Figure 1. Decomposition of a railway track object into structural elements (developed by the author)

Возможные варианты конструктивно-технологического представления ОЖДП можно изобразить в виде орграфа ГОЖДП (общей графовой модели ОЖДП). Вершины орграфа ГОЖДП представляют собой множество КЭ. Вершины связаны между собой ребрами, которые отражают отношения между КЭ, обоснованные конструктивно-технологической целесообразностью (рисунок 2).

Для реализации декомпозиции ОЖДП на КЭ в автоматизированном режиме оргграф (общая графовая модель ОЖДП) представлен квадратной матрицей $\|a_{i,j}\|$, (матрицей смежности вершин) строкам и столбцам которой соответствуют вершины графа. Для определения значений элементов матрицы $a_{i,j}$ применяется правило

$$a_{i,j} = \begin{cases} a_{i,j} = 1, \text{ если } v_{i,j} \neq 0; \\ a_{i,j} = 0, \text{ иначе} \end{cases}$$

где $v_{i,j}$ – ребро, инцидентное вершинам a_i и a_j .

Тогда с учетом данных матрицы смежности, технических и конструктивных параметров ОЖДП задача декомпозиции сводится к нахождению пути в оргграфе.

Рисунок 2. Фрагмент общей графовой модели объекта железнодорожного пути с выбранной конструктивной схемой (разработано автором)

Figure 2. Overall graph model fragment of the railway track object with the structural scheme selected (developed by the author)

Результат декомпозиции ОЖДП на КЭ можно представить в виде графовой модели конструктивной схемы ОЖДП (рисунок 3)

$$G_{\text{ОЖДП}}^{KP} = \{KE, TL\},$$

где $G_{\text{ОЖДП}}^{KP}$ – математическая модель конструктивной схемы ОЖДП;

KE – множество КЭ;

TL – множество структурных связей между КЭ.

*Рисунок 3. Графовая модель конструктивной схемы
объекта железнодорожного пути (разработано автором)*

*Figure 3. Graph model of the railway track
object structural scheme (developed by the author)*

Таким образом, представление КР ОЖДП в виде графовой модели конструктивной схемы позволяет отразить взаимосвязь между всеми его КЭ.

Полученная графовая модель конструктивной схемы ОЖДП, является информационной основой для следующего этапа технологического обоснования КР ОЖДП – генерации номенклатуры строительных работ (разработки ТП) с применением экспертной системы.

1.3 Возможности применения экспертной системы для разработки технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути

1.3 Feasibility of expert system application for the technological process development of the railway track facility construction

Процесс формирования перечня строительных работ характеризуется высокой трудоемкостью для разработчика ОТД. Это объясняется проблемой неполноты оперативной информации, дефицита времени, объемами нормативно-технической документации. В таких условиях повышается вероятность возникновения «человеческих» ошибок, последствия которых могут оказаться весьма тяжелыми как для экономики, так и для безопасности строительства ОЖДП. Развитие и внедрение автоматизированных систем в строительном производстве позволяет в определенной степени решить некоторые из указанных проблем, связанных с оперативной выработкой решений при разработке ТП. Однако для этого недостаточно использования методов, реализующих формализованные аналитические модели. Но существующая практика решения подобных проблем позволяет успешно сочетать такие модели с системой эвристических правил. Такое сочетание является традиционным основанием для создания экспертных систем (ЭС) способных решать трудноформализуемые задачи или задачи, вообще не имеющие алгоритмического решения [12; 13].

Главным достоинством ЭС является способность приобретать, накапливать, сохранять, редактировать и модифицировать знания (рисунок 4). В то же время способность ЭС (в отличие от разработчика ОТД) объективно оценивать информацию существенно повышает качество проводимой экспертизы. Отсутствие предубеждений, поспешных выводов, системное рассмотрение нюансов и особенностей позволяет выбрать наилучшую альтернативу из возможных. Все это достигается за счет возможности управления процессом поиска решения и способности разъяснить принятое решение [14; 15].

Рисунок 4. Обобщенная структура функционирования экспертной системы (разработано автором)

Figure 4. Generalized expert system functioning structure (developed by the author)

Тем самым ЭС может способствовать упрощению процедуры разработки ТП в трудноформализуемых предметных областях (ПрО), улучшению качества и повышению эффективности ТП, тиражируя знания разработчика ОТД и автоматизируя некоторые рутинные направления его деятельности [13]. Очевидно, что ЭС не сможет полностью заменить разработчика ОТД в разработке ТП, но сможет стать инструментом, который позволит эффективнее и быстрее принимать решения в области ИИОТП.

В рамках проводимого исследования для разработки ТП, в частности для генерации номенклатуры строительных работ, выбрана ЭС продукционного типа. В основе такой ЭС лежит продукционная модель представления знаний (МПЗ) или модель, основанная на правилах. Отличительными особенностями продукционной МПЗ являются [12; 16]:

- наглядность (обусловлена наличием семантического содержания);
- удобство использования для вывода в дискретных областях (что характерно для ТП);
- модульность (простота внесения изменений).

В продукционной МПЗ предметные знания представляются набором продукционных правил (продукций) в виде предложений типа «ЕСЛИ (факт), ТО (следствие)». Выполненным правило (продукция) считается, когда часть правила «ЕСЛИ» удовлетворяет фактам, тогда следствие, указанное в части «ТО», выполняется. Модульность применения правил (продукций) позволяет изменять любую из них, не затрагивая содержимого других. А это способствует простому добавлению и удалению знаний в БЗ [16].

Продукционное правило записывается следующим образом:

$$\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n \Rightarrow \delta,$$

где $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ – факты (антецеденты), то есть данные, по которым осуществляется поиск в БЗ;

δ – следствие (консеквент), то есть действие, которое выполняется, если поиск завершился успешно.

ЭС, основанная на продукционной МПЗ (продукционная ЭС) состоит из трех компонентов: базы правил, рабочей памяти, механизма логического вывода (МЛВ). Типичная структура ЭС, основанной на правилах (продукциях), приведена на рисунке 5.

*Рисунок 5. Структурная схема
продукционной экспертной системы (разработано автором)*

*Figure 5. Block diagram
of the production expert system (developed by the author)*

Формирование базы правил базируется на описании ПрО в виде множества фактов и множества правил. С помощью фактов (истинных высказываний об объектах или явлениях ПрО) описывается текущее состояние ПрО. С помощью правил устанавливаются причинно-следственные связи между фактами (в общем случае и между правилами тоже), то есть устанавливается влияние истинности одних фактов на истинность других. Для сохранения множества фактов и правил, описывающих ПрО, можно использовать, например, базу правил.

Здесь важно отметить, что для технологического обоснования КР ОЖДП правила (продукции) должны быть основаны на двух закономерностях [7; 12]: технологических и системных. Первые –

Страница 10 из 33

отражают общие принципы разработки ТП строительства ОЖДП и его протекания во времени. Вторые – формируются из понимания того, что СПО, реализующая ТП, – это часть производственной системы, а ТП – системный объект.

Для реализации поиска выводимых из фактов заключений (по описанию текущего состояния ПрО) необходимо использовать интерпретатор базы правил, которому будут предъявляться факты [16; 17].

Рабочая память представляет собой структуру для обмена информацией и предназначена для хранения текущего состояния ПрО. Это значит, что, минуя рабочую память, нельзя примеру из одного правила направить какие-либо данные непосредственно в другое правило. В то же время подмножество применимых на каждом шаге вывода правил целиком определяется состоянием рабочей памяти.

МЛВ состоит из двух частей. Первая – реализует логический вывод, вторая – управляет процессом вывода результата. Таким образом, первая часть МЛВ просматривает имеющиеся правила в рабочей памяти и добавляет во вторую новые факты, если какое-либо правило выполняется [16].

Работа МЛВ во многом определяется количеством правил в БЗ, описывающих рассматриваемую ПрО. Правил может оказаться достаточно много (сотни или тысячи) и в этом случае начинает формироваться большое число цепочек вывода (вполне справедливых), но не имеющих отношения к искомому результату. В целях устранения в ходе логических рассуждений огромной лишней (в случае решения задачи установления конкретного факта) работы – имеет смысл использовать обратную стратегию вывода [2; 16].

Реализация обратной стратегии вывода основана на последовательном анализе списка правил и выполнении того правила, левая часть которого согласуется с множеством текущих фактов γ_1 . Допустим необходимо доказать существование факта a_9 . Для этого необходимо выполнить только те правила, которые относятся к установлению этого факта. Пусть

$$\gamma_1 = \{a_1, a_2, a_3, a_5, a_7, a_8\},$$

а список правил:

$$P_1 : a_6 \wedge a_2 \rightarrow a_9,$$

$$P_2 : a_3 \wedge a_4 \rightarrow a_6,$$

$$P_3 : a_1 \rightarrow a_4$$

На основании вышеуказанных данных ЭС должна установить существование факта a_9 . Сначала будет осуществлена проверка наличия a_9 во множестве γ_1 . Если его нет, то будет применено правило

$$\alpha_i \rightarrow a_9 \cup \beta_i.$$

ЭС, используя правило

$$P_1 : a_6 \wedge a_2 \rightarrow a_9,$$

подтверждает наличие фактов a_2 и a_6 , для вывода a_9 . Если будет несколько правил, то потребуются ветвление процесса подтверждения наличия фактов.

В случае, если $a_2 \in \gamma_1$, $a_6 \notin \gamma_1$, то применяется правило

$$P_2 : a_3 \wedge a_4 \rightarrow a_6$$

и подтверждаются факты a_3 , a_4 .

В случае, если $a_3 \in \gamma_1$, $a_4 \notin \gamma_1$, то применяется правило

$$P_3 : a_1 \rightarrow a_4$$

и подтверждается факт a_1 . В связи с тем, что $a_1 \in \gamma_1$, ЭС подтверждает факт a_9 .

Применение обратной стратегии вывода в продукционной ЭС позволяет получать исходные данные от разработчика ОТД и выводить результат в режиме диалога. Такой режим работы позволяет задавать только те вопросы, которые учитывают ответы от ранее заданных вопросов.

1.4 Методика генерации номенклатуры строительных работ с применением экспертной системы

1.4 Methodology for generating construction works nomenclature by the aid of an expert system

Основными этапами практической реализации интеллектуального режима генерации номенклатуры строительных работ с применением ЭС являются: определение перечня рабочих операций (РО), определение технологических связей между РО, формирование комплекта строительных работ (блоков РО).

Возведение ОЖДП предполагает определение списка связанных между собой строительных работ, зависящих от КР ОЖДП. Сама процедура определения номенклатуры строительных работ относится к категории трудноформализуемых. Более того в рамках процедуры

предполагается обработка большого количества различной информации, оказывающей прямое и существенное влияние на ТП строительства ОЖДП. Сюда относятся результаты инженерно-геологических, гидрологических, природно-климатических и др. исследований, требования строительных норм и правил. Применение традиционных способов обработки такого количества информации традиционными способами требует серьезных затрат времени и не всегда гарантирует получение оптимального результата. Для решения указанных проблем автором разработана ЭС «Технология», основанная на продукционной МПЗ [11; 13; 17].

ЭС «Технология» состоит из оболочки (интерфейса), БЗ «Технология» (хранилища знаний), МЛВ, реализующего продукционную МПЗ и БД «Технология» (хранилища результатов).

Запуск ЭС «Технология» выводит на экран диалоговое окно, в котором реализован интерфейс (рисунок 6), необходимый для работы разработчика ОТД и манипуляций со знаниями. Работа с ЭС предусматривает два режима: «Экспертиза» и «Определение рабочих операций».

Интерфейс включает в себя следующие области:

1. поле, в котором содержится перечень РО (рисунок 6, область 1);
2. поле, в котором отображаются названия КЭ, к которым относятся РО (рисунок 6, область 2);
3. поле, в котором отображается значение позиции выбранного КЭ по отношению к выбранной РО (рисунок 6, область 3);
4. поле, в котором реализуется опрос разработчика ОТД (рисунок 6, область 4);
5. поля, в которых содержатся позиции заданных вопросов и позиции выбранных ответов (рисунок 6, область 5);
6. меню управления таблицами с данными или знаниями (рисунок 6, область 6);
7. поле, в котором отображается содержание выбранной таблицы с данными или знаниями (рисунок 6, область 7).

БЗ «Технология» содержит формализованные знания (продукционные правила) устанавливающие причинно-следственные отношения между КЭ и РО и характерные для рассматриваемой области ЖДС. БЗ реализована в форме пяти связанных таблиц в реляционной системе управления базами данных *Microsoft Access*. Предполагается, что с течением времени БЗ должна обновляться данными, основанными на

успешном опыте определения номенклатуры строительных работ для возведения ОЖДП.

Рисунок 6. Интерфейс экспертной системы «Технология» (разработано автором)

Figure 6. "Tekhnologiya" expert system interface (developed by the author)

Работа МЛВ основана на реализации обратной стратегии вывода для продукционной МПЗ. Такой подход обеспечивает формализацию и применения знаний, анализ и генерацию выводов в рамках оптимального пространства поиска решения. Учитывая особенности процедуры технологического обоснования КР ОЖДП, строительства ОЖДП и логику формирования ТП, продукционные модели содержат: РО для реализации отдельных КЭ и ресурсный компонент (рисунок 7).

Рисунок 7. Ресурсный компонент рабочей операции (разработано автором)

Figure 7. Work operation resource component (developed by the author)

БД «Технология» обеспечивает накопление и хранение результатов (блоков РО), полученных с применением ЭС «Технология».

Процедура генерации номенклатуры строительных работ с применением ЭС разбита на три этапа:

- получение в диалоговом режиме исходных данных от разработчика ОТД;
- обработка полученных данных для установления принадлежности РО к КЭ;
- определение перечня РО с учетом принадлежности к КЭ и вывод результата разработчику ОТД.

Сама генерация осуществляется по схеме разветвленного диалога. Целью такого диалога является выявление у разработчика ОТД информации с использованием вопросов и нескольких вариантов ответов на них. Ответы, поступающие от разработчика ОТД, определяют порядок опроса. Это значит, что в зависимости от ответов формируются разные группы вопросов и задаются не все вопросы, а только их часть. Такой режим диалога позволяет сужать область поиска, за счет использования алгоритма принятия решения. В свою очередь процедура принятия решения предполагает использование стандартных требований, предъявляемых к расчетно-логическим системам, в данном случае к оболочке ЭС и БЗ.

Реализации методики генерации номенклатуры строительных работ с применением ЭС предшествует создание информационной модели ОЖДП в результате его декомпозиции на КЭ. При этом КЭ является единицей информационного описания КР ОЖДП. Анализ информационной модели с применением ЭС определяет набор РО с признаками, позволяющими сформировать ТП. Это позволяет представить ТП в виде орграфа. Для определения организационной структуры ТП строительства ОЖДП необходимо найти гамильтонов путь в орграфе.

Пусть с применением ЭС определено конечное множество РО $W = \{W_1, W_2, \dots, W_n\}$. Между РО могут существовать связи, которые можно описать следующими бинарными отношениями:

- непосредственное предшествование $W_i |< W_j$. Отношение непосредственного предшествования соответствует отношению следования, то есть за W_i следует W_j .

- индифферентность: $W_i >< W_j$. Отношение индифферентности соответствует вариативному следованию, то есть возможны варианты: за W_i следует W_j или за W_j следует W_i .

Отношения между РО строго заданы организационно-технологической целесообразностью. При наличии неоднозначных отношений возможно привлечение знаний разработчика ОТД. В этом случае, как и в случае с декомпозицией ОЖДП на КЭ, его знания можно использовать либо в виде эвристических правил, либо реализовать разрешение неоднозначности в автоматизированном режиме.

Множество РО $W_j = 1...m$ можно представить в виде матрицы достижимости, сформированной на основе отношения предшествования и являющейся квадратной матрицей $\|d_{i,j}\| = m \times m$, строкам и столбцам которой соответствуют РО.

Для определения значений элементов матрицы $\|d_{i,j}\|$ используется правило

$$d_{i,j} = \begin{cases} d_{i,j} = 1 \\ f_{i,j} = 0 \end{cases}$$

Матрица достижимости используется для выделения отношений следования и является основой информационной модели, обеспечивающей генерацию номенклатуры строительных работ в интеллектуальном режиме. Матрица достижимости может быть наглядно представлена в виде орграфа.

Орграф образует множество РО и отношений между ними. Вершинами орграфа являются РО. Между РО возможны отношения непосредственного предшествования $W_i < W_j$, которые отражаются ориентированными ребрами; отношения индифферентности $W_i >< W_j$, которые отражаются двумя ребрами, имеющими противоположное направление и связывающими вершины W_i, W_j .

Отношение предшествования $W_i < W_j$ на графе означает наличие пути между вершинами W_i и W_j или достижимость из вершины W_i , вершины W_j . Тогда задача генерации номенклатуры строительных работ сводится к поиску в орграфе гамильтонова пути с учетом указанных выше отношений.

В целях интеллектуализации процедуры формирования ТП строительства ОЖДП орграф может быть представлен квадратной

матрицей – матрицей смежности вершин $\|u_{i,j}\|$. При этом вершинам орграфа соответствуют строки и столбцы матрицы, а значения ее элементов $u_{i,j}$ определяются по правилу

$$u_{i,j} = \begin{cases} u_{i,j} = 1, \text{ если } y_{i,j} \neq 0; \\ u_{i,j} = 0, \text{ иначе} \end{cases}$$

где $y_{i,j}$ – ребро, инцидентное вершинам u_i и u_j .

Принимается также, что $u_{i,j} = 1$, если $i = j$. Индифферентные отношения между РО представляются как $u_{i,j} = u_{j,i} = 1$, то есть имеется симметрия относительно главной диагонали матрицы.

Применение ЭС «Технология» позволяет получить граф, разбитый на N слоёв (по количеству КЭ) (рисунок 8). Из-за большого количества технологических связей между РО, а также для удобства визуального восприятия – каждая РО выделена из слоя и для нее определены предшествующие (обязательные к исполнению) РО.

Рисунок 8. Технологические связи между рабочими операциями (разработано автором)

Figure 8. Technological relationships between work operations (developed by the author)

Матрицу смежности можно представить в виде графовой модели, вершины которой – сами РО, а ребра – технологические связи между ними (рисунок 9)

$$G_{ОЖДП}^{ТП} = \{WO, TC\},$$

где $G_{ОЖДП}^{ТП}$ – математическая модель ТП строительства ОЖДП;

WO – множество РО;

ТС – множество технологических связей между РО.

Рисунок 9. Графовая модель организационной структуры технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути, определенная с применением экспертной системы (разработано автором)

Figure 9. Organizational structure graphical model of the railway track object technological process determined by the aid of an expert system (developed by the author)

На рисунке 9 представлена графовая модель ТП строительства ОЖДП, определенная с применением ЭС. В соответствии с выявленной последовательностью РО все связи между ними в явном виде представлены в виде ребер.

Таким образом, представление ТП строительства ОЖДП в виде графовой модели позволяет отразить взаимосвязь между всеми его РО.

Полученная графовая модель с учетом ресурсных компонентов РО представляет собой организационную структуру ТП, которая может служить основой для решения задач календарного планирования строительства ОЖДП, а также является основой для разработки технологических схем производства работ.

2. Практическая реализация технологического обоснования конструктивных решений с применением экспертной системы на примере железнодорожного земляного полотна

2. Practical realization of the structural concept technological justification by the aid of an expert system on the example of a railway roadbed

Для практической реализации технологического обоснования КР ОЖДП разработаны экспериментальные программные модули. Модуль «Конструкция» позволяет в автоматизированном режиме осуществить декомпозицию ОЖДП на КЭ. Для генерации номенклатуры строительных работ (РО) используется продукционная ЭС «Технология». ЭС состоит из оболочки, реализующей интерфейс, и БЗ «Технология». БЗ содержит продукционные правила, учитывающих специфику строительства различных ОЖДП (рисунок 10).

Процедура генерации номенклатуры строительных работ с применением ЭС учитывает:

- конструктивные особенности ОЖДП;
- логику разработки ТП (определяется общая технологическая последовательность РО для возведения отдельных КЭ и ОЖДП в целом);
- ресурсообеспечение РО с учетом объемов и фронта работ, продолжительности строительства и возможностей СПО.

Рисунок 10. Функциональная схема процедуры генерации номенклатуры строительных работ с применением экспертной системы (разработано автором)

Figure 10. Generating procedure functional diagram for the construction works nomenclature by the aid of the expert system (developed by the author)

Полученные в ходе генерации номенклатуры строительных работ результаты, сохраняются в специально созданной для них БД.

Рисунок 11. Фрагмент подробного продольного профиля с выделенным рассматриваемым участком (разработано автором)

Figure 11. A detailed profile elevation fragment with a highlighted area that is under examination (developed by the author)

В качестве примера в данной работе рассмотрен участок длиной 400 м, расположенный на однопутной железнодорожной линии

IV категории (подъездной путь к порту) проходящей в Астраханской области (рисунки 11, 12).

Рисунок 12. Увеличенный фрагмент рассматриваемого участка подтопленной насыпи высотой более 4 м на слабом основании длиной 400 м (разработано автором)

Figure 12. A magnified fragment of the flooded carn section that is under examination with a height of more than 4 m on a weak subgrade 400 m long (developed by the author)

Для технологического обоснования КР ОЖДП в автоматизированном и интеллектуальных режимах разработчиком ОТД использована информация по следующим категориям:

- характеристика рассматриваемого участка линии;
- принятые решения, полученные в результате проектирования организации строительства железнодорожной линии;
- сведения о природно-климатических условиях района строительства рассматриваемого участка линии;

- сведения об инженерно-геологических и гидрогеологических условиях района строительства рассматриваемого участка линии;
- технические параметры рассматриваемого участка продольного и профиля;
- параметры насыпи железнодорожного земляного полотна: пространственная форма, совокупность частей конструкции, характеристики материалов (грунта), параметры частей конструкции;
- возможности СПО: информация о технологических возможностях оборудования, средствах технического оснащения, сведения о трудовых ресурсах, квалификации исполнителей, составах бригад и др.

Для примера практической реализации процедуры технологического обоснования КР ОЖДП рассмотрен поперечный профиль подтопляемой насыпи железнодорожного земляного полотна (рисунок 13).

Сначала в автоматизированном режиме с применением модуля «Конструкция» была осуществлена декомпозиция конструкции насыпи. В результате были определены КЭ насыпи и их характеристики (таблица 1).

Затем с применением ЭС «Технология» была осуществлена генерация номенклатуры строительных работ. На рисунках 14–17 показаны фрагменты работы ЭС для поперечного профиля подтопляемой насыпи на участке ПК 412+50 – ПК 416+50. В режиме «Экспертиза» представлены вопросы, описывающие КР поперечных профилей ЗП, увязанные с характеристикой участка линии, и ответы на эти вопросы.

Рисунок 13. Поперечный профиль подтопляемой насыпи высотой более 4 м на слабом основании (разработано автором)

Figure 13. The lateral section of a flooded carn with a height of more than 4 m on a weak subgrade (developed by the author)

Таблица 1 / Table 1

**Конструктивные элементы подтопленной насыпи
железнодорожного земляного полотна и их характеристики**
Flooded carn structural components of a railway roadbed and its characteristics

КЭ №1. «ОСНОВАНИЕ» Constructive element No. 1. "BASE"	структура structure	слабое weak
	почвенно-растительный слой topsoil	есть available
	усиление reinforcement	геотекстиль geofabric
КЭ №2. «ТЕЛО НАСЫПИ» Constructive element No. 2. "BACK OF BALLAST BED"	грунт subsoil	дренирующий draining
	уклон откосов slope grade	1:1,5
КЭ №3. «БЕРМЫ» Constructive element No. 3. "BERME"	наличие availability	есть available
	длина length	4 м
	уклон откосов slope grade	1:2
	укрепление откосов slopes reinforcement	плита slab

Составлено автором / Compiled by the author

На первом этапе (рисунок 14) начинается опрос разработчика ОТД для уточнения КР выбранного поперечного профиля.

Рисунок 14. Фрагмент работы экспертной системы «Технология» (1 этап) (разработано автором)

Figure 14. View fragment of the expert system "Tekhnologiya" working process. (stage 1) (developed by the author)

Рисунок 15. Фрагмент работы экспертной системы «Технология» (2 этап) (разработано автором)

Figure 15. View fragment of the expert system "Tekhnologiya" working process. (stage 2) (developed by the author)

Рисунок 16. Фрагмент работы экспертной системы «Технология» (3 этап) (разработано автором)

Figure 16. View fragment of the expert system "Tekhnologiya" working process. (stage 3) (developed by the author)

Рисунок 17. Фрагмент работы экспертной системы «Технология» (4 этап) (разработано автором)

Figure 17. View fragment of the expert system "Tekhnologiya" working process (stage 4) (developed by the author)

На втором этапе (рисунок 15) формируется перечень вопросов и ответов. Также в окне «управление таблицами» разработчик ОТД может выбирать таблицы с данными и знаниями.

На третьем этапе (рисунок 16) заканчивается опрос пользователя и становится активным режим «Определение рабочих операций».

Заключительным этапом работы ЭС является обработка ответов (рисунок 17). Из обработанных ответов в соответствии с заданными правилами определяются РО (строительные работы), соответствующие выбранному КЭ (в данном примере «тело насыпи»).

В итоге с применением ЭС «Технология» была определена номенклатура строительных работ для возведения насыпи железнодорожного земляного полотна. Далее в ходе автоматизированного расчета были установлены технологические связи между РО, определены пооперационные объемы работ, интенсивность и длительности РО.

На основе результатов расчета была сформирована организационная структура (ОС) ТП возведения насыпи железнодорожного земляного полотна (рисунок 18).

Рисунок 18. Графовая модель организационной структуры технологического процесса возведения насыпи железнодорожного земляного полотна (разработано автором)

Figure 18. Organizational structure graph model of the erection carn technological process of a railway roadbed (developed by the author)

При этом каждая вершина ОС ТП содержит: номер РО, нормативное обоснование РО (ГЭСН и др.), норму времени на единицу измерения для трудовых ресурсов и технических средств (чел.-час, маш. час), единицу измерения объема работ (m^2 , m^3 , шт. и др.), обеспечение РО трудовыми ресурсами и техническими средствами (состав бригад, квалификация исполнителей).

Полученная ОС ТП по сути является основой для разработки календарного плана в рамках проекта производства работ (ППР) на возведение насыпи железнодорожного земляного полотна.

Результаты, полученные в рамках технологического обоснования КР железнодорожного земляного полотна, являются основой для реализации ИИОТП строительства ОЖДП, в части составления калькуляции затрат труда на строительство (таблица 2). Также они могут быть использованы для, оптимизации организационной структуры ТП, разработки технологических схем и календарного планирования строительства ОЖДП в рамках разработки ППР.

Применение ЭС, представленной в данной работе, предоставляет СПО новые возможности в технологическом обосновании КР ОЖДП. Прежде всего, это касается эффективной интеллектуальной разработки ТП, обеспечения качества и безопасности производства работ при строительстве ОЖДП. Внедрение ЭС (и других интеллектуальных средств организационно-технологического проектирования) будет способствовать повышению рентабельности СПО при реализации ТП строительства ОЖДП. Более того, доработка ЭС и ее дальнейшее развитие могут предоставить СПО возможность поиска новых (инновационных) ТП, учитывающих условия и сложность строительства ОЖДП.

Заключение

Conclusion

В работе были представлены теоретические результаты исследования и возможности практического применения ЭС к решению задач технологического обоснования КР ОЖДП.

Внедрение средств интеллектуализации в разработку ТП при проектировании и строительстве ОЖДП способствует оперативной разработке и корректировке ТП с учетом различных производственных, природных, геологических и других условий. Здесь появляются новые возможности для повышения качества и безопасности при реализации ТП строительства ОЖДП. А СПО получает новый инструмент, направленный

на обеспечение производственной и экономической эффективности своей деятельности.

Таблица 2 / Table 2

**Калькуляция затрат труда на сооружение
насыпи железнодорожного земляного полотна**

Calculation cost of labour for the carn construction of a railway roadbed

№ п/ п	Обоснование, шифр Justification, code	Наименование работ Jobs name	Ед. изм. Unit rev.	Объем работ Amount of works	Н _{вр} на единицу измерения Time norm per unit		Затраты труда на весь объем Labor costs for the entire volume		Состав бригады Staff content
					чел.-час manhour	маш.-час machine- hour	чел.-час manhour	маш.-час machine- hour	
1. Подготовка естественного основания под насыпь 1. Preparation of the natural carn foundation									
1.	ГЭСН 01-01-031-5	Срезка плодородно-растительного слоя бульдозером	1000 м³	2,10	0,00	3,85	0,00	8,09	Машинист бульдозера 6 р. – 1
2.	ГЭСН 01-01-031-13	Добавлять на каждые последующие 10 м к ГЭСН 01-01-031-5	1000 м³	2,10	0,00	3,30	0,00	6,93	Машинист бульдозера 6 р. – 1
3.	ГЭСН 01-02-027-1	Планировка естественного основания бульдозером	1000 м²	14,00	0,00	0,55	0,00	7,70	Машинист бульдозера 6 р. – 1
4.	ГЭСН 01-01-13-7	Погрузка плодородно-растительного грунта в автосамосвалы экскаватором с ковшом вместимостью 0,65 м³	1000 м³	2,10	9,28	20,53	19,49	43,11	Водитель автосамосвала 3 кл. – 3 Машинист экскаватора 5 р. – 1 Помощник маш. экскаватора 4 р. – 1
5.	НИИтруда	Транспортирование ПРС автосамосвалами	100 м³	21,00	0,00	5,68	0,00	119,18	Водитель автосамосвала 3 кл. – 4
2. Сооружение тела насыпи 2. Back of ballast bed construction									
1.	ГЭСН 01-01-012-7	Разработка грунта из штабеля гидронамыва с погрузкой на автомобили-самосвалы экскаватором с ковшом вместимостью 1,6 м³	1000 м³	33,33	4,86	10,28	161,98	342,63	Машинист экскаватора 5 р – 1 Помощник маш. экскаватора 4 р. – 1
2.	НИИтруда	Транспортирование песчаного грунта автосамосвалами	100 м³	333,30	0,00	5,68	0,00	1891,48	Водитель автосамосвала 3 кл. – 23
3.	ГЭСН 01-01-031-5	Разравнивание грунта бульдозером	1000 м³	33,33	0,00	3,85	0,00	128,32	Машинист бульдозера 6 р. – 1
4.	ГЭСН 01-01-36-3	Планировка поверхности грунта бульдозером перед уплотнением	1000 м²	204,99	0,00	0,19	0,00	38,95	Машинист бульдозера 6 р. – 1
5.	ГЭСН 01-02-006-1	Полив водой уплотняемого грунта насыпей	1000 м³	33,33	0,00	13,91	0,00	463,62	Водитель 3 кл. – 2

№ п/п	Обоснование, шифр Justification, code	Наименование работ Jobs name	Ед. изм. Unit rev.	Объем работ Amount of works	Н _{вр} на единицу измерения Time norm per unit		Затраты труда на весь объем Labor costs for the entire volume		Состав бригады Staff content
					чел.-час manhour	маш.-час machine-hour	чел.-час manhour	маш.-час machine-hour	
6.	ГЭСН 01-02-001-2	Уплотнение грунта прицепными катками на пневмоколесном ходу	1000 м ³	33,33	0,00	1,38	0,00	46,00	Машинист катка 6 р. – 1
7.	ГЭСН 01-02-001-8	На каждый последующий проход по одному следу ×6	1000 м ³	0,60	0,00	1,38	0,00	0,83	Машинист катка 6 р. – 1
8.	ГЭСН 27-04-016-5	Устройство прослойки из геотекстиля (полубоймы) с учетом нахлестов	1000 м ²	13,68	79,75	0,00	1090,98	0,00	Дорожные рабочие 2 бр. по: 3 р. – 1 2 р. – 3
9.	ГЭСН 01-02-27-1	Планировка откосов насыпей автогрейдером	1000 м ²	5,44	0,00	1,45	0,00	7,89	Машинист автогрейдера 5 р. – 1
10.	ГЭСН 01-02-27-17	Планировка откосов насыпей экскаватором-планировщиком	1000 м ²	4,40	0,00	4,89	0,00	21,52	Машинист экскаватора 6 р. – 1 Помощник маш. экскаватора 5 р. – 1 Водитель автосамосвала 3 кл. – 2
3. Укрепление откосов бERM плитами 3. Berm slopes reinforcement with slabs									
1.	ГЭСН 01-02-047-02	Устройство упоров при укреплении откосов земляного полотна бетонными плитами	100 м упора	8,00	221,27	20,38	1770,16	163,04	Машинист экскаватора 5 р. – 1 Помощник маш. экскаватора 4 р. – 1 Водитель автосамосвала 3 кл. – 4 Землекоп 3 р. – 1 Землекоп 2 р. – 2 Землекоп 1 р. – 1 Машинист автокрана 5 р. – 1 Монтажник конструкций 4 р. – 1 Монтажник конструкций 3 р. – 1 Монтажник конструкций 2 р. – 1
2.	ГЭСН 27-04-016-1	Раскатка полотен геотекстиля на откосе	1000 м ²	5,04	20,60	0,00	103,82	0,00	Дорожные рабочие: 3 р. – 1 2 р. – 3
3.	ГЭСН 01-02-046-3	Укрепление откосов земляного полотна бетонными плитами	100 м ²	48,00	32,00	10,36	1536,00	497,28	Машинист автокрана 6 р. – 1×2 Монтажник 4 р. – 1×2 Монтажник 2 р. – 2×2 Рабочий 4 р. – 1×2
4.	По расчету	Соединение плит шарнирными хомутами	1 плита	640,00	0,40	0,00	256,00	0,00	Рабочий 4 р. – 1
5.	ГЭСН 01-01-031-5	Засыпка обочин и разравнивание грунта бульдозером	1000 м ³	1,11	0,00	3,85	0,00	4,27	Машинист бульдозера 5 р. – 1
6.	ГЭСН 01-01-36-3	Планировка поверхности грунта бульдозером перед уплотнением	1000 м ²	2,44	0,00	0,19	0,00	0,46	Машинист бульдозера 5 р. – 1

№ п/ п	Обоснование, шифр Justification, code	Наименование работ Jobs name	Ед. изм. Unit rev.	Объем работ Amount of works	Н _{вр} на единицу измерения Time norm per unit		Затраты труда на весь объем Labor costs for the entire volume		Состав бригады Staff content
					чел.-час manhour	маш.-час machine- hour	чел.-час manhour	маш.-час machine- hour	
7.	ГЭСН 01-02-001-2	Уплотнение грунта прицепными катками на пневмоколесном ходу	1000 м ³	1,11	0,00	1,38	0,00	1,53	Машинист катка 6 р. – 1
8.	ГЭСН 01-02-001-8	На каждый последующий проход по одному следу ×4	1000 м ³	4,44	0,00	1,38	0,00	6,13	Машинист катка 6 р. – 1

Составлено автором / Compiled by the author

Существенным отличием предлагаемых решений является интеллектуализация процесса определения номенклатуры строительных работ для строительства ОЖДП. Таким образом обеспечивается многовариантный отбор при автоматическом задании пространства поиска оптимального решения.

Разработанные в рамках исследования теоретические положения позволили создать ЭС, основанную на производственной МПЗ. Ее применение позволило обеспечить интеллектуальную поддержку формирования номенклатуры строительных работ из большого числа имеющихся видов и типов РО для различных КР ОЖДП.

Практическое применение ЭС было осуществлено в рамках технологического обоснования КР подтопленной насыпи железнодорожного земляного полотна. При этом были учтены сложные инженерно-геологические и природно-климатические условия, а также дополнительные усиливающие элементы в конструкции насыпи. В результате на основе сгенерированного перечня РО (номенклатуры строительных работ) была установлена их технологическая последовательность и составлена калькуляция затрат труда.

Проведенное исследование позволило установить, что применение средств интеллектуализации, в частности ЭС, дополняет, а в некоторых случаях существенно расширяет возможности «естественного» интеллекта для решения задач технологии ЖДС.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Небритов Б.Н.** Организационно-технологическое проектирование в строительстве / Б.Н. Небритов. – М.: Вузовская книга, 2011. – 144 с.
2. Интеллектуальные системы управления организационно-техническими системами / под редакцией А.А. Большакова. – 2-е изд. – М.: «Горячая линия-Телеком», 2016. – 160 с.
3. **Завальнюк С.И.** Интенсификация строительства нового двухпутного электрифицированного железнодорожного участка Журавка–Миллерово: монография / С.И. Завальнюк, В.А. Рыбицкий, Д.С. Алтынов. – Киров: Изд-во МЦИТО, 2019. – 482 с. – URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37233767_36013924.pdf (дата обращения: 05.06.2020).
4. **Полянский А.В.** Интеллектуализация инженерно-технического сопровождения железнодорожного строительства / А.В. Полянский. – DOI [10.15862/12SATS120](https://doi.org/10.15862/12SATS120) // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». – 2020. – № 1. – URL: <https://t-s.today/PDF/12SATS120.pdf> (дата обращения: 01.06.2020). – Рез. англ.
5. **Гусаков А.А.** Системотехника и новые направления строительной науки / А.А. Гусаков // Промышленное и гражданское строительство. – 2005. – № 1. – С. 82–83.
6. **Мастаченко В.Н.** Искусственный интеллект в контексте транспортной науки / В.Н. Мастаченко // Мир транспорта. – 2004. – № 3. – С. 12–17.
7. **Полянский А.В.** Адаптация интеллектуальных технологий к решению задач календарно-ресурсного планирования строительства транспортных объектов / А.В. Полянский // Механизация строительства. – 2014. – № 4. – С. 12–17.
8. **Rooney M.** Artificial intelligence in engineering design / M. Rooney, S.E. Smith. – DOI [10.1016/0045-7949\(83\)90167-0](https://doi.org/10.1016/0045-7949(83)90167-0) // Computers & Structures. – 1983. – №1–4. – С. 279–288. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0045794983901670> (дата обращения: 27.05.2020).
9. Автоматизированное проектирование организации строительства железных дорог / под редакцией С.П. Першина. – М.: Транспорт, 1991. – 261 с.
10. **Zavadskas E.K.** Mehrkriterielle Entscheidungen im Bauwesen: Monografija / E.K. Zavadskas. – Vilnius: Technika, 2000. – 207 с.
11. **Полянский А.В.** Интеллектуальные подходы к разработке рациональных организационно-технологических решений в транспортном строительстве / А.В. Полянский // Транспортное строительство. – 2013. – № 10. – С. 13–15.
12. Экспертные системы в проектировании и управлении строительством / под редакцией А.А. Гусакова. – М.: Стройиздат, 1995. – 296 с.
13. **Kapliński O.** Expert systems for construction processes / O. Kapliński, E. Zavadskas. – DOI [10.1080/13921525.1997.10531367](https://doi.org/10.1080/13921525.1997.10531367) // Statyba. – 1997. – № 12. – С. 49–61. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13921525.1997.10531367> (дата обращения: 22.05.2020).
14. **Каклаускас А.** Биометрическая и интеллектуальная поддержка решений: монография / А. Каклаускас, Э.К. Завадскас. – Вильнюс: Техника, 2012. – 344 с.

15. **Zavadskas E.** Sustainable Decision-Making in Civil Engineering, Construction and Building Technology / E. Zavadskas, J. Antucheviciene, T. Vilutiene, H. Adeli. – DOI [10.3390/su10010014](https://doi.org/10.3390/su10010014) // Sustainability. – 2017. – № 1. – С. 14. – URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/1/14> (дата обращения: 17.06.2020).
16. **Ручкин В.Н.** Универсальный искусственный интеллект и экспертные системы / В.Н. Ручкин, В.А. Фулин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 240 с.
17. **Джарратано Д.** Экспертные системы. Принципы разработки и программирование / Д. Джарратано, Г. Райли. – М.: Вильямс, 2007. – 1147 с.

Сведения об авторе:

Полянский Алексей Викторович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Проектирование и строительство железных дорог», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия, e-mail: polal_82@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6190-0481>
РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=412433

Статья получена: 08.07.2020. Принята к публикации: 17.08.2020. Опубликовано онлайн: 28.08.2020.

REFERENCES

1. Nebritov B.N. [*Organizational and technological design in construction*]. Moscow: Vuzovskaya Kniga; 2011. (In Russ.).
2. Bol'shakov A.A. ed. [*Intelligent management systems for organizational and technical systems*]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom; 2006. (In Russ.).
3. Zaval'nyuk S.I., Rybitskiy V.A., Altyonov D.S. [*Intensification of the construction of a new double-track electrified railway section Zhuravka – Millerovo: monograph*]. Kirov: MCITO; 2019. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37233767_36013924.pdf (accessed 5th June 2020). (In Russ.).
4. Polyanskiy A.V. Intellectualization of engineering and technical support of railway construction. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2020;7(1). (In Russ., abstract in Eng.) DOI: [10.15862/12SATS120](https://doi.org/10.15862/12SATS120).
5. Gusakov A.A. [Systems engineering and new directions of construction science]. *Industrial and Civil Engineering*. 2005; (1): 82–83. (In Russ.).
6. Mastachenko V.N. [Artificial intelligence in the context of transport science]. *World of Transport and Transportation*. 2004; 2(3): 12–17. (In Russ.).
7. Polyanskiy A.V. [Adaptation of intelligent technologies to solving problems of scheduling and resource planning for the construction of transport objects]. *Mechanization of Construction*. 2014; (4): 58–61. (In Russ.).
8. Rooney, M., Smith S.E. Artificial intelligence in engineering design. *Computers & Structures*. 1983; 16(1–4): 279–288. (In Eng.) DOI: [10.1016/0045-7949\(83\)90167-0](https://doi.org/10.1016/0045-7949(83)90167-0).

9. Pershin S.P., Ivanov M.I., Akuratov A.F. et al. [Computer-aided design of the organization of construction of railways]. Moscow: Transport Publ.; 1991. (In Russ.).
10. Zavadskas E.K. [*Multi-criteria decisions in construction: Monograph*]. Vilnius: Technika; 2000. (In German).
11. Polyanskiy A.V. [Intelligent approaches to the development of rational organizational and technological solutions in transport construction]. *Transport construction*. 2013; (10): 13–15. (In Russ.).
12. Gusakov A.A., Il'in N.I., Edeli Kh. et al. [*Expert systems in design and construction management*]. Moscow: Stroyizdat; 1995. (In Russ.).
13. Kapliński O, Zavadskas E. Expert systems for construction processes. *Statyba*. 1997; 3(12): 49–61. (In Eng.) DOI: [10.1080/13921525.1997.10531367](https://doi.org/10.1080/13921525.1997.10531367).
14. Kaklauskas A., Zavadskas E. [*Biometric and Intelligent Decision Support: Monograph*]. Vilnius: Technika; 2012. (In Russ.).
15. Zavadskas E., Antucheviciene J., Vilutiene T., Adeli H. Sustainable Decision-Making in Civil Engineering, Construction and Building Technology. *Sustainability*. 2017; 10(1). (In Eng.) DOI: [10.3390/su10010014](https://doi.org/10.3390/su10010014).
16. Ruchkin V.N., Fulin V.A. [*Universal artificial intelligence and expert systems*]. St. Petersburg: BKHV-Peterburg Publ.; 2009. (In Russ.).
17. Dzharratano D., Rayl G. [*Expert systems. Design principles and programming*]. Moscow: Williams Publ.; 2007. (In Russ.).

Information about the author:

Aleksey V. Polyanskiy – Russian University of Transport, Moscow, Russia, e-mail: polal_82@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6190-0481>

РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=412433

Submitted: 8th July 2020. Revised: 17th August 2020. Published online: 28th August 2020.