

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

2021, №1, Том 8 / 2021, N 1, Vol. 8 <https://t-s.today/issue-1-2021.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS121.pdf>

DOI: 10.15862/05SATS121 (<https://doi.org/10.15862/05SATS121>)

Моделирование и оптимизация технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути с применением генетического алгоритма

Полянский А.В.

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», Москва, Россия

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

Аннотация. Статья посвящена теоретическим и практическим исследованиям в области применения эволюционного моделирования к решению задач планирования строительных работ при формировании технологических процессов железнодорожного строительства. Исследование является частью разрабатываемой подсистемы инженерно-технического сопровождения железнодорожного строительства – инженерно-интеллектуального обеспечения технологических процессов строительства объектов железнодорожного пути. В основе данной подсистемы лежит 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. Учитывая динамичность железнодорожного строительства, применение новых материалов и технологий, в рамках исследования выявлены новые тенденции в области оперативной разработки технологических процессов и определения оптимальной последовательности работ при строительстве объектов железнодорожного пути. В частности, возникновение в ходе производства строительных работ отклонений от плановых требований,

вследствие стохастичности железнодорожного строительства, требует оперативного пересмотра уже принятых решений. Это вынужденная мера, позволяющая обеспечивать выполнение плановых показателей. Существующие методики позволяют осуществлять коррекцию организации строительных работ, однако, технология, в частности технологический процесс, остаются неизменными. Статичность технологического процесса во многом продиктована требованиями проектной документации и безопасности ведения работ. Но современные достижения в области информационных и интеллектуальных технологий с учетом вариативности структуры технологического процесса могут придать ему динамические свойства. Способность технологического процесса подстраиваться под меняющиеся условия производства работ обеспечит гибкость строительству объектов железнодорожного пути. Для решения такой задачи использован автоматизированный режим эволюционного моделирования и оптимизации технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути. Особенности существующих методов оптимизации, в части размерности решаемых задач и учета нескольких критериев вынуждают обращаться к интеллектуальным методам. В статье описана методика оптимизации технологических процессов строительства объектов железнодорожного пути с применением генетического алгоритма направленного поиска в пространстве решений.

При этом учитывается несколько проектных ограничений: ресурсных, технологических, организационных, информационных. Для этого была разработана расчетно-логическая модель, которая позволила провести оценку целевой функции (функции приспособленности) с учетом динамического характера распределения ресурсов, имеющихся у строительной подрядной организации по строительным работам. На основе результатов теоретического исследования в статье представлены практические аспекты эволюционного моделирования и оптимизации технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути с применением

генетического алгоритма на примере возведения подтопляемой насыпи железнодорожного земляного полотна.

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

Ключевые слова: технологический процесс; железнодорожное строительство; номенклатура работ; объект железнодорожного пути; методы искусственного интеллекта; генетический алгоритм; многокритериальная оптимизация

Railroad track technological construction process modeling and optimization using a genetic algorithm

Aleksey V. Polyanskiy

Russian University of Transport, Moscow, Russia

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

Abstract. The article discusses theoretical and practical research in the field of evolutionary modeling application for solving construction works planning problems in the formation of railroad track technological construction process. The study is a part of the developed engineering and technical support subsystem for railway construction: engineering and intellectual support of railroad track technological construction process. This subsystem is based on the effective use of automated systems with artificial intelligence elements. Development and implementation of these automated systems are focused on achieving a single end result, such as a finished railroad track facility with suitable functionality within the established deadlines, planned working cost and labor costs, as well as meeting modern safety requirements throughout the entire operation period. Taking into account railway construction dynamic, the use of new materials and technologies, new trends were identified within the study scope in the field of technological processes operational development, and optimal work sequence determination in the railway facilities construction. In particular, the occurrence of deviations from the planned requirements in the construction work course requires a quick reconsideration of the decisions already made, due to the railway construction stochastic behavior. This is a forced measure to ensure the fulfillment of the planned targets. The existing methods allow to correct the construction work organization, however, the technology, and in particular, the technological process remains unchanged. The static nature of the technological process is largely dictated by the project documentation requirements and work safety. But modern advances in the information and intelligent technologies field, with

the account of technological process structure variability, can give a technological process dynamic properties. The technological process's ability to adapt to changing work production conditions will provide flexibility in the railway facilities construction. To solve this problem, an automated evolutionary modeling mode and optimization of the railway facility construction technological process were used. The peculiarities of existing optimization methods, in terms of the dimension of the active task and taking into account several criteria, force us to turn to intelligent methods. The article describes a technological processes optimization method for the railway facilities construction using a genetic directed search algorithm in the space of solutions. In this case, several design constraints are taken into account: resource, technological, organizational, informational. For this, a computational and logical model was developed, which made it possible to assess the target function (fitness function), with the account of the dynamic distribution nature of the contractor's available resources for construction work. Based on the theoretical research results, the article presents the practical aspects of evolutionary modeling and optimization of the railway facilities construction technological process using a genetic algorithm on the example of the flooded railway roadbed embankment construction.

The results presented in this article were obtained during the dissertation research made by the author.

Keywords: technological process; railway construction; the nomenclature of works; railway track object; artificial intelligence methods; genetic algorithm; multicriteria optimization

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

Рентабельность работы строительной (подрядной) организации (СПО) и качество производства работ в железнодорожном строительстве (ЖДС) зависит в том числе и от принятых решений на этапе разработки технологических процессов (ТП). В то же время применение новых конструктивных решений (КР), материалов, средств механизации, развитие специализации исполнителей сильно влияет на эффективность реализации ТП. Все вышеуказанное, а также потребность в интенсификации строительства объектов железнодорожного пути (ОЖДП) вынуждает СПО искать новые возможности для оперативной разработки и последующей реализации ТП [1].

Для достижения указанных целей решаются задачи в рамках разрабатываемых положений инженерно-интеллектуального обеспечения технологического процесса (ИИОТП) строительства ОЖДП [2].

Особенностью теоретических разработок и последующего внедрения ИИОТП является эффективное использование ЭВМ и программного обеспечения с элементами искусственного интеллекта. При этом конечной целью является достижение результата в виде готового ОЖДП в установленные проектной документацией сроки, запланированными трудозатратами, себестоимостью и отвечающего современным требованиям безопасной эксплуатации.

Организация и ведение системы ИИОТП строительства ОЖДП зависят от выполнения определенного комплекса мероприятий, способствующих повышению оперативности разработки и реализации ТП строительства ОЖДП. Комплекс мероприятий предполагает интеллектуализацию расчетно-логических процедур на этапах организационно-технологического проектирования, в частности моделирования и оптимизации ТП строительства ОЖДП. Для этого необходимо дополнить (усовершенствовать) существующие автоматизированные системы (АС) проектирования ТП расчетно-логическими моделями, использующими средства искусственного интеллекта. Также будет полезным учесть опыт разработки АС организационно-технологической подготовки строительного производства и оперативного управления ЖДС [3].

В связи с этим разработку ТП с применением автоматизированного и интеллектуального режимов предлагается выполнять по следующим направлениям:

- формирование модели – организационной структуры (ОС) ТП;

- определение показателей эффективности простых технологических процессов (ПТП);
- оптимизация ТП.

В результате можно будет синтезировать структуру ТП строительства ОЖДП с учетом возможностей СПО, а также совершенствовать организацию работы трудовых и технических ресурсов, тем самым повысить производительность их труда. Для реализации решения поставленных задач необходимо разработать расчетно-логическую модель, основу которой составит генетический алгоритм.

1. Моделирование технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути

1. Railroad track technological construction process modeling

Математические модели и методы разработки ТП являются научно-методической основой различных АС, применяемых в организационно-технологическом проектировании строительного производства [4]. Часто область таких систем ограничивается представительной, но малой группой элементов ТП. При этом АС осуществляет подготовку данных для решения трудноформализуемых задач, а само решение принимается разработчиком организационно-технологической документации (ОТД) с учетом его опыта, интуитивных способностей и сложившейся производственной обстановки.

Для моделирования ТП, в частности в ЖДС, наиболее приспособлены графовые модели. При этом вершинами многовариантного графа ТП могут являться комплексные или простые технологические процессы (КТП, ПТП), а ребра будут определять последовательность их выполнения [5]. На рисунке 1 представлена графовая модель строительства объектов железнодорожного пути на уровне КТП. Данную модель можно представить и на уровне ПТП, однако количество вершин и ребер существенно увеличится. По сути, увеличится количество строительных работ, которые необходимо выполнить, и технологических связей между ними. Учитывая особенности современного строительства, в том числе железнодорожного, и возможности СПО, то один и тот же ПТП может быть реализован с использованием различных ресурсов и разными способами. Это значит, что для определенного ПТП возможны варианты исполнения.

В статье [6] рассмотрена процедура генерации строительных работ с применением экспертной системы (ЭС) продукционного типа. Результат работы ЭС был представлен в виде графовой модели, которая содержала определенные виды строительных работ. С учетом вышесказанного данные работы могут быть представлены несколькими вариантами.

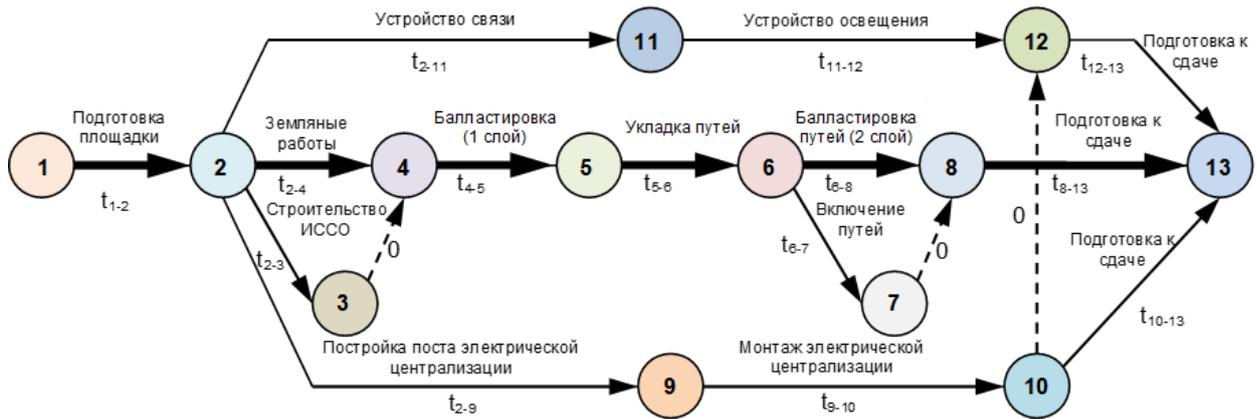


Рисунок 1. Графовая модель строительства объектов железнодорожного пути (разработано автором)

Figure 1. Graph model for the railway facilities construction (developed by the author)

Проще говоря, выбранная с помощью ЭС работа может быть выполнена различными способами с учетом имеющихся в распоряжении СПО ресурсов и технологий, а также в различных технологических режимах. Таким образом, возможно вариативное представление строительных работ в рамках графовой модели.

В результате моделирования необходимо из множества вариантов (кортежей маршрутов) ТП выбрать один, отвечающий многочисленным требованиям и ограничениям.

В тоже время, возникновение в ходе производства строительных работ отклонений от плановых требований, вследствие стохастичности ЖДС, требует пересмотра уже принятых решений. Это вынужденная мера, позволяющая обеспечивать выполнение плановых показателей. Существующие методики позволяют осуществлять коррекцию организации строительных работ, однако, технология, в частности ТП, остаются неизменными. Статичность ТП во многом продиктована требованиями проектной документации и безопасности ведения работ. Но современные достижения в области информационных и интеллектуальных технологий с учетом вариативности структуры ТП могут придать ему динамические свойства [7]. Возможность ТП подстраиваться под меняющиеся условия производства работ обеспечит гибкость строительству ОЖДП. Для решения такой задачи целесообразно воспользоваться автоматизированным режимом моделирования ТП строительства ОЖДП (рисунок 2).

Автоматизированный режим моделирования ТП строительства ОЖДП предполагает выполнение технологических расчетов ПТП. При расчете ПТП задаются либо принятой продолжительностью выполнения процесса, либо числом рабочих в звене (бригаде) или количеством строительных машин и достигнутым уровнем производительности труда [4; 8]. Основное содержание методики технологических расчетов таких

процессов приведено на рисунке 3. В расчете используются следующие параметры:

- $\tau_{п,дн}$ – продолжительность процесса, дни;
- $n_{п}$ – количество рабочих смен в сутки;
- $V_{п}$ – поток работы в смену;
- V – объем работы (для ПТП);
- $N_{п,р.см}$ – число рабочих в смену;
- $П_{п,р}$ – сменная выработка (производительность) рабочего;
- $N_{п,м.см}$ – количество машин в смену;
- $П_{п,м}$ – сменная производительность машины;
- $N_{п,з.р}$ – число рабочих в звене, как правило, соответствует нормативному числу рабочих в звене ($N_{н.з.р}$).



Рисунок 2. Схема реализации автоматизированного режима моделирования технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути (разработано автором)

Figure 2. Automated modeling mode implementation scheme of railroad track technological construction process (developed by the author)

Выполнение механизированных процессов планируют в две или три смены, а ручных – в одну смену.

На основе технологического расчета ПТП осуществляется (рисунок 2):

- определение объемов работ;
- определение интенсивностей работ;
- определение длительностей работ;
- установление технологических связей между работами;
- разделение на захваты.

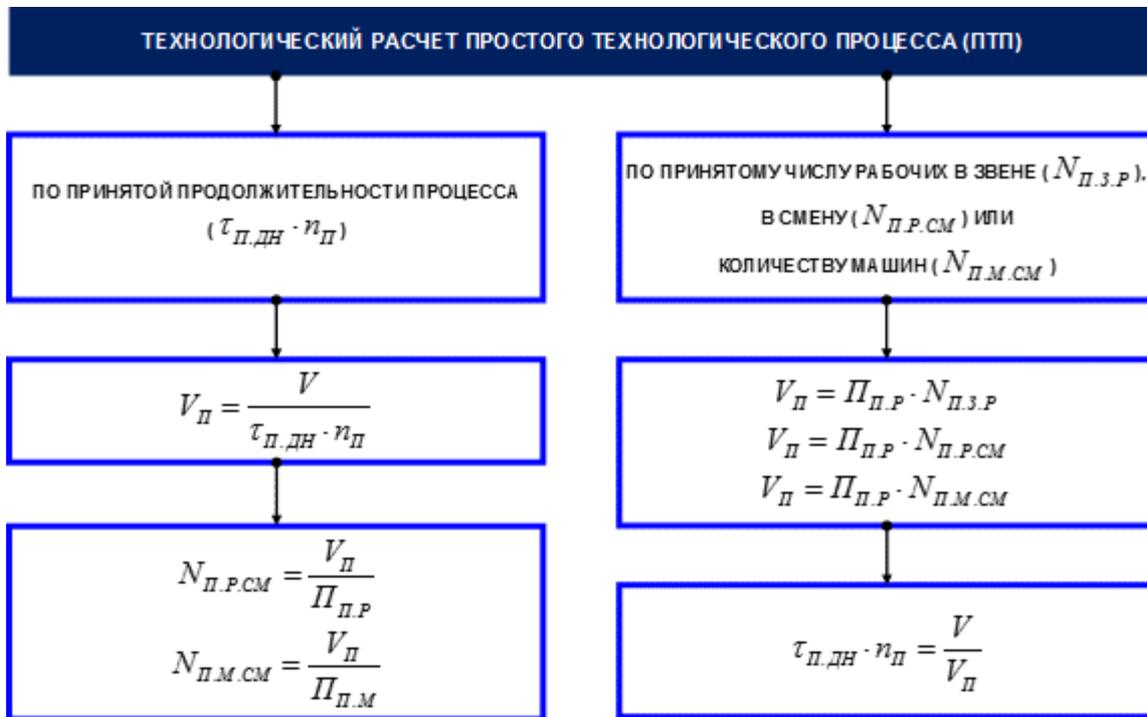


Рисунок 3. Схема технологического расчета параметров простого технологического процесса (разработано автором)

Figure 3. Technological calculation scheme of simple technological process parameters (developed by the author)

Полученные результаты позволяют сформировать организационную структуру ТП строительства ОЖДП, установив тем самым технологические связи между ПТП. Организационная структура ТП является основой для моделирования и выявления оптимального варианта реализации ТП.

На рисунке 4 представлена обобщенная графовая модель ОС ТП строительства ОЖДП. Данная модель предполагает до пяти вариантов реализации ПТП возведения определенного конструктивного элемента (КЭ). При этом максимальное количество (пять) вариантов ограничено только рамками проводимого исследования, но возможно и большее количество.

Выбор оптимального варианта ТП строительства ОЖДП зависит от показателей эффективности его элементов (ПТП): трудоемкости, себестоимости, количества рабочих. В дальнейшем эти показатели будут

являться основными критериями при осуществлении процедуры оптимизации.

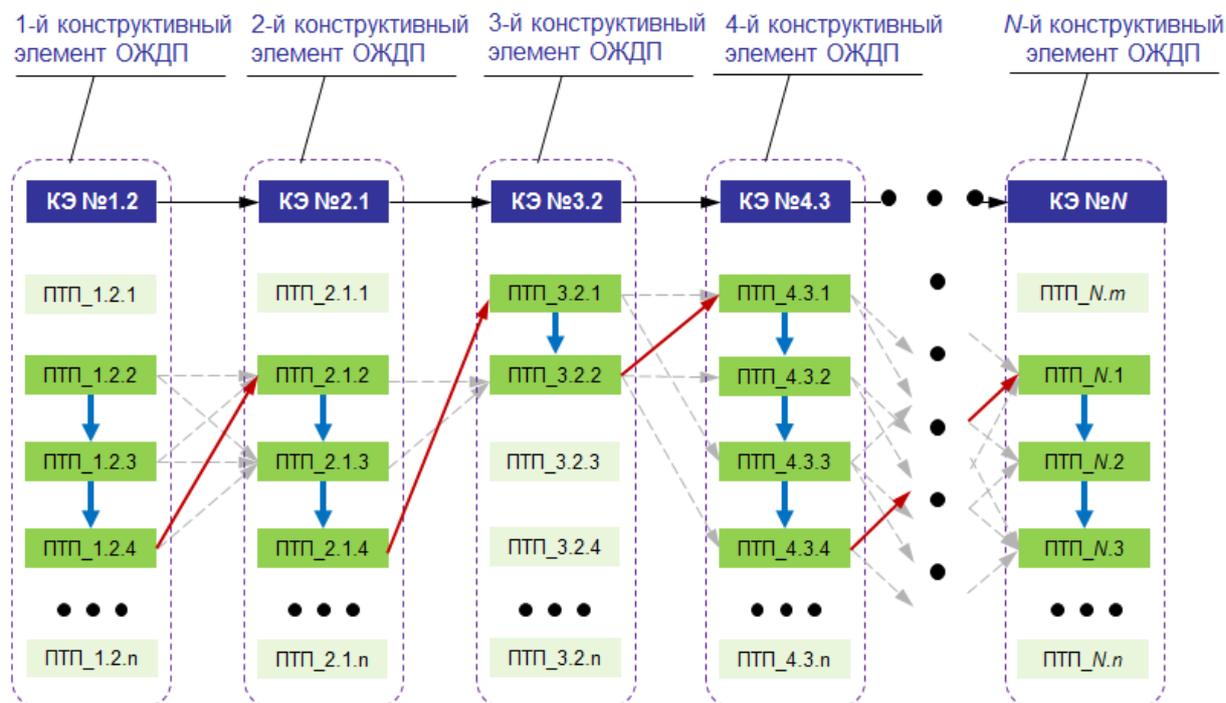


Рисунок 4. Обобщенная графовая модель организационной структуры технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути, определенная с применением экспертной системы (разработано автором)

Figure 4. Generalized graph model of the railroad track technological construction process organizational structure, determined using an expert system (developed by the author)

Для отбора наиболее перспективных элементов ТП с учетом количества ПТП можно использовать различные методы оптимизации.

2. Интеллектуализация методов оптимизации технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути

2. Intellectualization of railroad track technological construction process methods

Задача оптимизации ТП строительства ОЖДП сводится к задаче нелинейного целочисленного программирования с булевыми переменными. Учитывая количество ПТП в структуре ТП, размерность задачи может составить 10^{30} – 10^{35} допустимых вариантов. Решение задач такой размерности методами ветвей и границ, целочисленного программирования, поиском точных и приближенных решений не представляется возможным. Было бы возможным решение задачи путем ее декомпозиции на несколько простых задач до уровня приемлемой сложности с помощью методов неявного перебора, динамического

программирования, сетей Петри. Но здесь следует понимать, что указанные методы не формируют определенных алгоритмов (в отличие от линейного программирования), а всего лишь определяют стратегию оптимизации. Это значит, что для оптимизации ТП строительства ОЖДП потребуется проведение предварительного анализа его состояния (структуры). Также из практики решения оптимизационных задач известно, что вычислительные возможности метода динамического программирования могут ограничиться тремя или четырьмя такими переменными состояниями. Для большинства строительных ТП количество переменных, определяющих параметры оптимизации, может быть значительно больше [9; 10].

Наконец, учитывая комбинаторный характер задачи оптимизации ТП строительства ОЖДП, будет наблюдаться экспоненциальный рост времени вычислений, что в принципе исключает оперативность ее решения [9].

Для структурной оптимизации также применяются методы, основанные на эвристическом программировании. Для этого при обработке данных применяются способы правдоподобных рассуждений, а также универсальные методы анализа целей и средств. Разработка алгоритма решения задачи осуществляется с использованием методов извлечения из различных источников сведений, аналогий, опыта. Например, процесс выработки разработчиком ОТД варианта ТП состоит из последовательности действий по выдвижению взаимоисключающих альтернатив, их оценки и перебора. При этом перебор является не комбинаторным, а направленным. Это достигается как за счет знаний разработчиком ОТД проблемной среды, так и за счет использования «внутренней» модели проблемной ситуации, выстраиваемой системой на основе используемых эвристик [11; 12].

Другой предпосылкой для постановки и решения задачи оптимизации ТП является её многокритериальный характер.

В настоящее время сложились три основных подхода к решению многокритериальных задач: замена многих критериев единым критерием; оптимизация главного из многих критериев; последовательная оптимизация всех критериев [9; 10].

Каждый из методов не использует новых критериев, содержащих дополнительную информацию, позволяющую разрешить конфликт между критериями, и приводит к единственной точке, которую предлагается считать наилучшей. Все три метода нуждаются для выделения этой точки в дополнительных данных: в первом методе – это весовые коэффициенты; во втором – это номер главного критерия и критериальные ограничения; в третьем – порядок критериев (ранжирование) и величины «уступок» [9; 13].

ТП строительства ОЖДП характеризуется одновременно несколькими параметрами, по которым можно судить о его оптимальности для конкретных условий производства работ. Поэтому поиск оптимального

варианта ТП должен осуществляться в рамках многокритериальной оптимизации. В данном исследовании оптимизация ТП будет осуществляться по следующим критериям: трудоемкость, стоимость и количество рабочих, обеспечивающих максимальную производительность.

Как показал обзор методов оптимизации ТП, применяемых для его разработки при возведении ОЖДП требуется применение специального метода оптимизации. В этой связи предложено воспользоваться методом эволюционной оптимизации с применением генетического алгоритма (ГА).

Основным преимуществом эволюционной оптимизации с помощью ГА является решение задач, для которых характерно наличие нескольких локальных оптимумов. При этом само решение осуществляется путем комбинирования элементов случайности и направленности точно также, как это происходит в природной среде.

Применительно к проводимому исследованию преимуществом применения ГА для решения задачи оптимизации ТП является адаптация к изменяющейся ситуации. В реальных условиях ТП, разработанный изначально, со временем может потребовать существенных корректив, например, за счет перераспределения строительных ресурсов. В этом случае, в рамках применения традиционных методов оптимизации, возможно проведение расчетных операций сначала (заново), а это уже может потребовать существенных вычислительных мощностей и затрат времени. В случае с эволюционным подходом так называемую популяцию (представляет собой совокупность данных), можно анализировать, корректировать и видоизменять с учетом меняющихся обстановки или условий. При этом отсутствует потребность в привлечении мощных ЭВМ.

Еще одним преимуществом применения ГА для решения оптимизационных задач большой размерности является способность генерации хороших результатов за сравнительно небольшой промежуток времени [9].

Работа ГА заключается в нахождении баланса между качеством решений и эффективностью поисковых процедур. Причем в большинстве случаев это происходит в условиях неопределенности за счет «выживания» более сильных (приспособленных) вариантов решений.

Среди преимущественных отличий ГА от других оптимизационных и поисковых процедур можно выделить следующие [14–16]:

- работает с предварительно закодированным перечнем параметров задачи, который представляет собой последовательность конечной длины в некоторой форме, исключая при этом работу с натуральными параметрами;

- осуществляет поиск за счет использования одновременно нескольких вариантов в пространстве поиска решений, а не путем улучшения одного решения;
- использует специальную целевую функцию (ЦФ) – функцию приспособленности – для оценки качества принятия решений, а не ее различные приращения;
- применяет вероятностный режим анализа в процессе оптимизации, а не детерминированные правила;
- анализирует различные области пространства решений одновременно, выявляя те области, которые содержат лучшие значения ЦФ.

Работа ГА может осуществляться:

- в соответствии с заданным числом генераций (итераций алгоритма);
- до получения решения определенного качества;
- нахождения локального оптимума, в случае наступления преждевременной сходимости и отсутствии возможных выходов из этого состояния.

С учетом перечисленных особенностей и возможностей работы ГА появляется возможность формирования варианта ТП, максимально приближенного к оптимальному по заданному критерию и отвечающего другим трудноформализуемым требованиям реального строительства ОЖДП.

3. Оптимизация технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути с применением генетического алгоритма

3. Railroad track technological construction process optimization using a genetic algorithm

Оценку качества определения перечня ПТП в рамках разработки ТП можно осуществить по векторному критерию $F = (F_1, F_2)$. Тогда составляющие вектора F будут определены выражениями:

$$F_1 = \sum_{i=1}^n K_{1i} b_i, \quad (1)$$

$$F_2 = \sum_{i=1}^n K_{2i} b_i, \quad (2)$$

где K_{1i} – коэффициент, определяющий степень механизации i -го ПТП, (механизированный (0,7), ручной (0,3));

K_{2i} – коэффициент, определяющий назначение i -го ПТП (основной (0,4), вспомогательный (0,1), заготовительный (0,2), транспортный (0,3));

n – количество ПТП, включенных в ТП;

b_i – дискретная переменная, принимающая два значения: 1 – если i -ый ПТП включается в ТП, 0 – в противном случае, т. е.

$$b_i = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}.$$

При решении задачи

$$F_1 \rightarrow \max ,$$

$$F_2 \rightarrow \max .$$

Оптимизация осуществляется в пространстве допустимых вариантов ТП с учетом следующих ограничений:

$$\sum_{i=1}^n t_i b_i \leq T , \quad (3)$$

где T – затраты труда на реализацию ТП, чел.-час;

t_i – затраты труда на реализацию i -го ПТП, чел.-час.

$$\sum_{i=1}^n c_i b_i \leq C , \quad (4)$$

где C – стоимость реализация ТП, дни;

c_i – стоимость реализации i -го ПТП, дни.

$$\forall j \in [1, P] \sum_{i=1}^n w_i^j b_i \leq W_j , \quad (5)$$

где W_j – количество рабочих, задействованных в j -м виде ПТП, чел.;

w_i^j – количество рабочих, задействованных в j -м виде работ i -го ПТП, чел.;

P – количество видов работ в рамках ТП (управление машиной, монтаж конструкций и т. п.), чел.

Наличие нескольких ограничений в рассматриваемой задаче определяет необходимость проведения многокритериальной оптимизации ТП. Для этого будет использован известный способ решения многокритериальных оптимизационных задач, основанный на замене

критериев F_m , $m = \overline{1, M}$ единым $F = \sum_{m=1}^M \beta_m F_m$. При этом весовые коэффициенты $\beta_m \geq 0$ и $\sum_{m=1}^M \beta_m = 1$. Критерий F «аккумулирует» все требования критериев F_1, \dots, F_M . При этом β_m показывает значимость критерия F_m . Значимость некоторых критериев зависит от значений, которые эти критерии принимают. Поэтому в разных частях допустимого множества решений разумно указывать разные значения β_m [9].

Для решения поставленной задачи по формированию оптимального перечня ПТП в рамках ТП строительства ОЖДП, воспользуемся сверткой критериев вида:

$$F = \gamma_1 \cdot F_1 + \gamma_2 \cdot F_2 \rightarrow \max, \quad (6)$$

где γ_1, γ_2 – коэффициенты, показывающие значимость критериев F_1, F_2 соответственно и устанавливаются разработчиком ОТД на этапе оптимизации ТП.

Оптимизацию по обобщенному критерию F в области ограничений (3)–(5) проведем с помощью эволюционного моделирования.

С учетом вышеизложенного была разработана методика оптимизации ТП с применением ГА. Она предполагает реализацию процедуры отбора наиболее перспективных элементов ТП, в частности ПТП (рисунок 5). В ходе отбора учитываются требования ЦФ, ограничения на использование ресурсов и критерии оптимальности ТП: минимумы трудоемкости, стоимости, количества рабочих. Результатом оптимизации является проектный технологический процесс (ТПП), то есть ТП соответствующий проектным требованиям.

Оптимизация ТП осуществляется в автоматизированном режиме. Для этого разработаны программный модуль, являющийся частью интеллектуальной автоматизированной системы (ИАС), и база данных (БД) предназначенная для хранения, накопления и обработки исходных данных и результатов решений [2].

ГА начинает работу на основе исходной информации, которая может быть представлена популяцией альтернативных вариантов решения (рисунок 6). Сама популяция содержит множество элементов решения. Элементы популяции представляют собой перечень хромосом (вариантов последовательных или непоследовательных решений). В свою очередь хромосомы содержат гены (части закодированного решения), которые могут быть представлены числовыми или функциональными значениями. Позиция гена в хромосоме называется – локусом, а значение гена – аллелем.

Кодирование генетического материала осуществляется в бинарной форме $\{0,1\}$.



Рисунок 5. Схема отбора наиболее перспективных элементов (ПТП) технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути (разработано автором)

Figure 5. The most promising elements of the simple technological process (STP) selection scheme of the railroad track technological construction process (developed by the author)

Элементы ГА называют родителями (или особями). Используя определенные правила, из популяции выбираются родители для последующего скрещивания с целью производства потомков. Для этого используются операторы кроссовера и мутации. В итоге формируется новая популяция определенного поколения, завершая таким образом одну итерацию алгоритма [15; 16].



Рисунок 6. Схема работы генетического алгоритма (разработано автором)

Figure 6. Genetic algorithm scheme (developed by the author)

Для сравнения решений между собой и выбора лучшего из них в работе ГА применяется ЦФ (функция приспособленности – *fitness function*), которая позволяет оценить каждый элемент в популяции. Оценка хромосом осуществляется путем анализа популяции (например, комбинации ПТП) и последующей оптимизации ЦФ. Случайное отклонение значения ЦФ от наиболее вероятного среднего значения является показателем наследственной изменчивости популяции. Если наследственные признаки обеспечивают популяции лучшие условия для дальнейшего существования и размножения, то они закрепляются (приспосабливаются к текущим условиям) [16; 17].

Для решения задачи оптимизации ТП с применением ГА предлагается воспользоваться непрямым методом представлением исходных данных. Это характерно для представлений на основе перечня ПТП, которые в дальнейшем требуют преобразования хромосомы в ТП, а в некоторых случаях используется отдельный блок формирования ТП. Такой подход позволит с помощью ГА формировать перечень ПТП, который затем с помощью эвристических правил преобразуется в ТП.

Оптимизации ТП строительства ОЖДП предшествует процедура генерации ПТП, описанная в статье [6]. Полученная графовая модель организационной структуры ТП является основой для оптимизации (см. рисунок 4). Следует отметить, что для каждого КЭ может быть запланировано несколько ПТП. В то же время каждый из нескольких ПТП может быть реализован различными способами. То есть для каждого ПТП подразумевается несколько вариантов исполнения. Как уже было отмечено ранее в рамках данного исследования будет рассматриваться до пяти вариантов исполнения ПТП (рисунок 7).

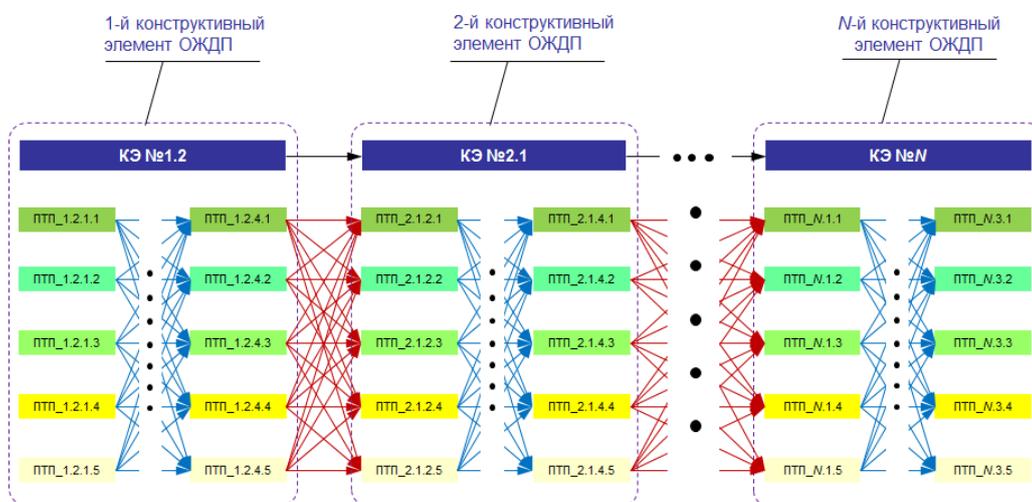


Рисунок 7. Схема представления способов исполнения технологического процесса строительства объекта железнодорожного пути (разработано автором)

Figure 7. Execution methods representational scheme of the railroad track technological construction process (developed by the author)

Оптимизация ТП с применением генетического алгоритма включает три этапа, которые будут описаны далее.

Первый этап – создание начальной популяции. Каждая особь популяции кодируется одной хромосомой (G), которая определяет перечень ПТП в рамках ТП. При этом кодирование характеризуется бинарным представлением перечня ПТП для каждого КЭ ОЖДП (рисунок 8).

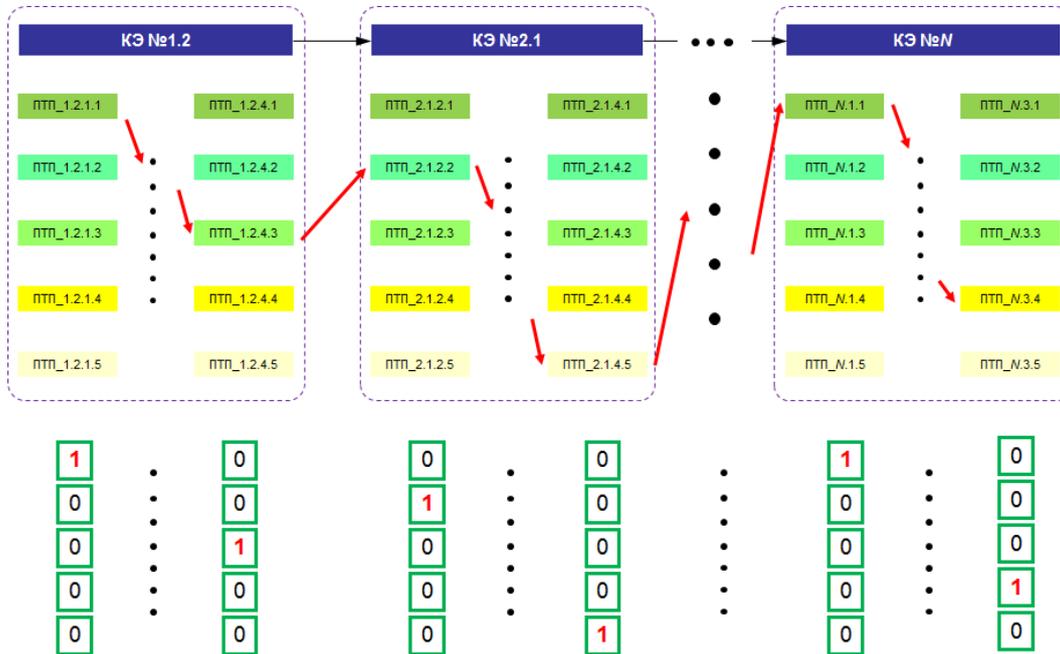


Рисунок 8. Пространство состояний и кодирование простых технологических процессов (разработано автором)

Figure 8. State space and simple technological processes coding (developed by the author)

Количество генов, образующих хромосому определяется количеством работ (ПТП) n , необходимых для возведения конкретного КЭ ОЖДП (рисунок 9) [6].

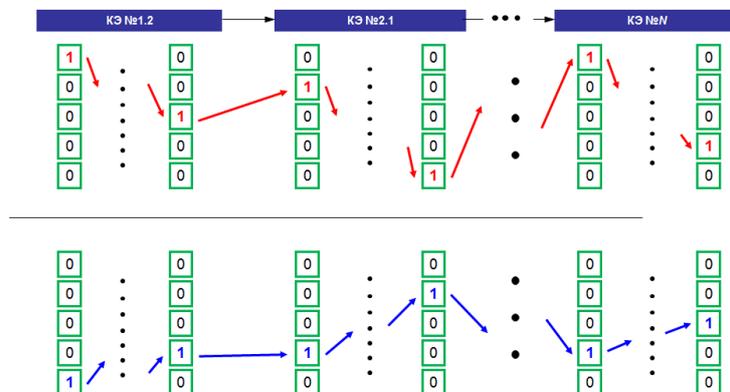


Рисунок 9. Формирование начальной популяции (разработано автором)

Figure 9. The initial population formation (developed by the author)

На рисунке 10 представлено схематичное представление хромосомы G некоторой особи $TP (G^{TP})$.

$$G^{TP}$$

Ген #1	Ген #2	Ген #n
1	0	1

Рисунок 10. Схематичное представление хромосомы G^{TP} (разработано автором)

Figure 10. A G^{TP} chromosome schematic representation (developed by the author)

Значения отдельного гена хромосомы G_i^{TP} из множества $D = \{0,1\}$ определяется выражением

$$G_i^{TP} = \begin{cases} 1 - \text{ПТП входит в ТП} \\ 0 - \text{ПТП не входит в ТП} \end{cases}, \quad (7)$$

где $i = \overline{1, n}$; $TP = \overline{1, ind_i}$ (ind_i – количество особей i -й популяции).

При создании начальной популяции в хромосому каждой особи из двоичного множества D случайным образом записывается число на позицию гена ПТП (G_i^{TP}).

Учитывая вариативность ПТП, начальная (и последующие) популяция содержат хромосомы, в которых гены образуют «блоки», состоящие из пяти элементов. При этом в каждом таком «блоке» только одному гену может соответствовать значение «1» (включение ПТП в ТП строительства ОЖДП) (рисунок 11).

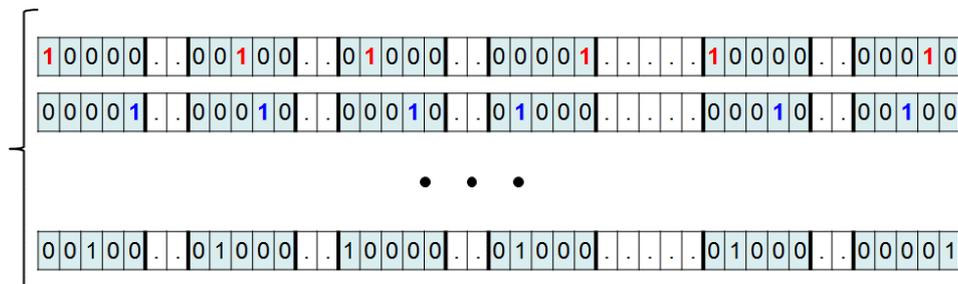


Рисунок 11. Начальная популяция с учетом вариативности простых технологических процессов (разработано автором)

Figure 11. The initial population, with the account of simple technological processes variability (developed by the author)

Далее, для каждой особи (перечня ПТП) рассчитывается, построенная по аддитивному принципу обобщенная целевая функция

$$F^{TP} = F_1^{TP} \gamma_1 + F_2^{TP} \gamma_2, \quad TP = \overline{1, ind_i}, \quad (8)$$

где γ_1, γ_2 – весовые коэффициенты, отражающие важность функций F_1^{TP} , F_2^{TP} , которые устанавливаются разработчиком ОТД, исходя из выражения $\gamma_1 + \gamma_2 = 1$;

F_1^{TP} – функция оценки, рассчитываемая для особи TP ;

F_2^{TP} – функция оценки для TP -й особи популяции.

Составляющие обобщенной целевой функции определяются, исходя из следующих выражений:

$$F_1^{TP} = \sum_{i=1}^n K_{1i} \cdot G_i^{TP}, \tag{9}$$

$$F_2^{TP} = \sum_{i=1}^n K_{2i} \cdot G_i^{TP}. \tag{10}$$

Расчет значений функций F_1^{TP} , F_2^{TP} зависит от дополнительных данных, определяющих каждый ПТП (ген хромосомы текущей популяции G_i) набором параметров:

$$x_i = \{K_{1i}, K_{2i}, t_i, c_i, w_i^j, H_{BPi}, RO_i\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, P}, \tag{11}$$

где t_i – затраты труда на реализацию i -го ПТП, чел.-час;

c_i – стоимость реализации i -го ПТП, дни;

w_i^j – количество рабочих, задействованных в j -м виде работ i -го ПТП, чел.;

H_{BPi} – норма времени для данного вида работ по i -му ПТП, чел.-час;

RO_i – количество рабочих операций в рамках i -го ПТП, чел.;

P – количество видов работ в рамках ПТП (управление машиной, монтаж конструкций и т. п.).

На рисунке 12 показана интерпретация соотношения $\forall i \in [1, n] (G_i^{TP} \rightarrow x_i)$.

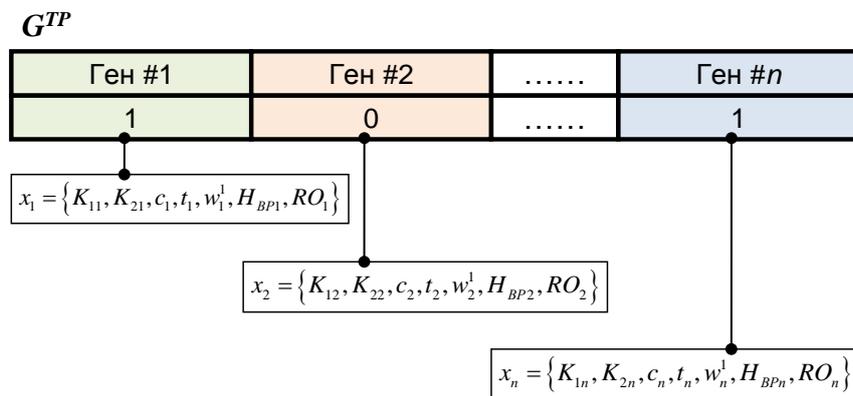


Рисунок 12. Интерпретация генома хромосомы текущей популяции G_i (разработано автором)

Figure 12. Chromosome genome interpretation of the current G_i population (developed by the author)

Помимо функции F^{TP} , с каждой особью популяции должны быть связаны следующие значения:

1. затраты труда на реализацию ПТП, чел.-час:

$$T^{TP} = \sum_{i=1}^n t_i \cdot G_i^{TP}, \forall TP \in [1, ind_i]; \tag{12}$$

2. стоимость реализация ТП, руб.:

$$C^{TP} = \sum_{i=1}^n c_i \cdot G_i^{TP}, \forall TP \in [1, ind_i]; \tag{13}$$

3. количество рабочих, задействованных в j -м виде ПТП, чел.:

$$W_j^{TP} = \sum_{i=1}^n w_i^j \cdot G_i^{TP}, \forall j \in [1, P], \forall TP \in [1, ind_i]. \tag{14}$$

Тогда будут справедливы следующие соотношения для особей популяции:

$$G^{TP} \rightarrow \begin{cases} F^{TP} (F_1^{TP}, F_2^{TP}), \forall TP \in [1, ind_i]; \\ T^{TP}, \forall TP \in [1, ind_i]; \\ C^{TP}, \forall TP \in [1, ind_i]; \\ W_j^{TP}, \forall j \in [1, P], \forall TP \in [1, ind_i]. \end{cases} \tag{15}$$

Для обеспечения эффективности работы алгоритма при различных входных параметрах в начальную популяцию особей вводятся пустые (состоящие из нулей) особи, процентное содержание которых от общего количества особей популяции определяется на основе экспериментов (путем моделирования).

Второй этап – скрещивание. После создания исходной популяции начинается ее развитие и размножение, то есть ее движение к оптимуму. Скрещивание особей популяции предполагает случайный выбор из текущего поколения двух различных особей [18]. Далее с одинаковой вероятностью ($p = 0,5$) каждый ген хромосомы потомка может получить значение соответствующего гена первого или второго родителя. Процедура скрещивания особей популяции представлена в виде схемы на рисунке 13.

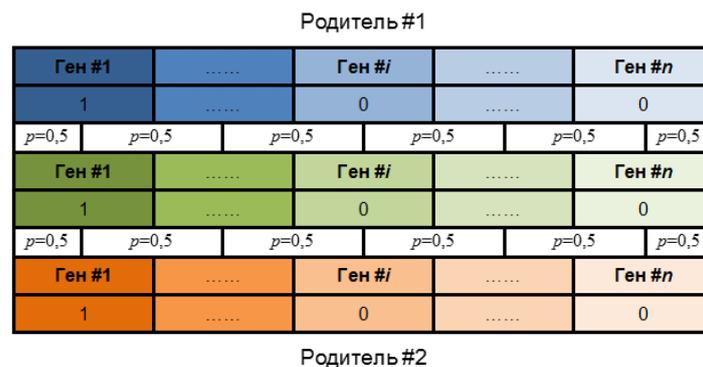


Рисунок 13. Процедура скрещивания особей популяции (разработано автором)
Figure 13. The crossing procedure of the population individuals (developed by the author)

Из схемы видно, что первый и n -й гены потомок унаследовал от одного родителя, а i -й ген – от другого родителя.

На следующем этапе для потомка вычисляются:

$$\begin{aligned} T_{des} &= \sum_{i=1}^n t_i \cdot G_{ides}, \\ C_{des} &= \sum_{i=1}^n c_i \cdot G_{ides}, \\ W_{jdes} &= \sum_{i=1}^n w_i^j \cdot G_{inom}, \forall j \in [1, P]. \end{aligned} \quad (16)$$

Выполнение условий «жизнепригодности» $T_{des} \leq T$, $C_{des} \leq C$, $W_{jdes} \leq W_j, j \in [1, P]$ будет означать, что потомок выживает и тогда решение представленное в потомке считается удовлетворительным, иначе потомок погибает – решение считается неудовлетворительным.

Выполнение условий для полученного потомка сопровождается сравнением его оценочной функции F_{des} с усредненной функцией $\bar{F} = \frac{1}{ind_i} \sum_{i=1}^{ind_i} F^i$ по всему текущему поколению особей. В то же время такое сравнение, которое является принципиальным условием поиска оптимума для задачи формирования оптимального ТП, может привести к далеко не оптимальным результатам [18].

С целью повышения эффективности данного метода предлагается производить сравнение функции F_{des} , определяемой выражением

$$F_{des} = \gamma_1 \sum_{i=1}^n K_{1i} \cdot G_{ides} + \gamma_2 \sum_{i=1}^n K_{2i} \cdot G_{ides}, \quad (17)$$

с функцией наихудшей особи G^H текущего поколения. Для этого необходимо определить оценочную функцию

$$F^H = \min_{i \in [1, \lambda_i]} \{F^i\}. \quad (18)$$

В связи с тем, что по условию задачи $F^{TP} \rightarrow \max$, то в случае $F_{des} < F^H$ полученный потомок погибает (отдаляет от оптимального решения), иначе выживает и сохраняется в следующее поколение (поколение потомков).

В этом случае в пространстве параметров происходит движение по направлению к оптимуму.

Таким образом, обобщенная целевая функция F^{TP} в сущности является оценочной функцией каждой особи. А оценочная функция текущего поколения представляет собой среднее значение функции \bar{F} по всей популяции.

В случае если потомок G_{des} выживает, то это приводит к ликвидации наихудшей особи G^H (с наибольшей оценочной функцией F^H) в текущем поколении родителей. Таким образом, размножении подразумевает убывание текущего поколения родителей и возрастание следующего поколения потомков.

Третий этап – мутация. В ходе эволюционной оптимизации может возникнуть ситуация, когда в популяции среди всех генов особей не окажется гена, соответствующего оптимальному решению. Это значит, что в условиях случайного заполнения хромосом конкретный ген для всех особей популяции может оказаться равным нулю, а для достижения оптимального решения он должен быть равен единице или наоборот [18].

Во избежание такой ситуации выполняется процедура мутации. Для этого:

- случайным образом из текущего поколения выбирается некоторая особь G^{RND} , $RND = rand\{1, \dots, ind_i\}$;
- параметры этой особи ($T^{RND}, C^{RND}, W_j^{RND}, G_i^{RND}$, $j = \overline{1, P}$, $i = \overline{1, n}$) сохраняются;
- случайным образом из хромосомы данной особи выбирается ген, значение которого путем инвертирования меняется, то есть $G_i^{RND} = \overline{G_i^{RND}}$, $i = rand\{1, \dots, n\}$;
- в итоге образуется особь G^{RND*} – мутант особи G^{RND} ;
- производится расчет параметров мутанта ($T^{RND*}, C^{RND*}, W_j^{RND*}, F^{RND*}$) и, если выполняется система условий

$$\begin{cases} T^{RND*} \leq T, \\ C^{RND*} \leq C, \\ W_j^{RND*} \leq W_j, \\ F^{RND*} \leq F^{RND} \end{cases}, \quad \forall j \in [1, P], \quad (19)$$

то это значит, что состоялась «хорошая» мутация и тогда особь G^{RND} остается в текущем поколении особей с параметрами полученного мутанта, способствуя улучшению поколения.

Но мутация может и не состояться, если условия (18) не будут выполняться, тогда «плохая» мутация отменяется, а на место сохраненных параметров особи вернуться ее исходные значения.

Последовательное применение операторов кроссовера (скрещивания) и мутации способствует формированию качественно новых поколений

особей по отношению к поколениям предыдущим, приближая таким образом оптимальное решение.

Для задачи оптимизации ТП строительства ОЖДП каждое новое поколение будет содержать перечни выбранных ПТП, позволяющих сформировать оптимальный ТП

$$\bar{F}_{i-1} \leq \bar{F}_i, i = \overline{2, ng}, \tag{20}$$

где i – индекс поколения; TP – индекс особи в поколении; ng – количество поколений, полученных в процессе эволюции; \bar{F}_i – усредненная обобщенная целевая функция по i -му поколению [18].

Представленный алгоритм предполагает, что развитие текущего поколения при наблюдении последовательности определенной длины из подряд идущих неудачных скрещиваний прекращается и начинается обработка следующего поколения. Такой подход способствует выявлению качественно лучших поколений потомков, уменьшению их размерности, обеспечивая при этом удовлетворительные результаты работы алгоритма. К тому же существенно снижается время поиска оптимального решения, учитывая большую размерность задачи.

Таким образом, для данного алгоритма справедливо

$$ind_{i-1} \geq ind_i, i = \overline{2, ng}, \tag{21}$$

где ind_i – количество особей (перечней ПТП) i -го поколения.

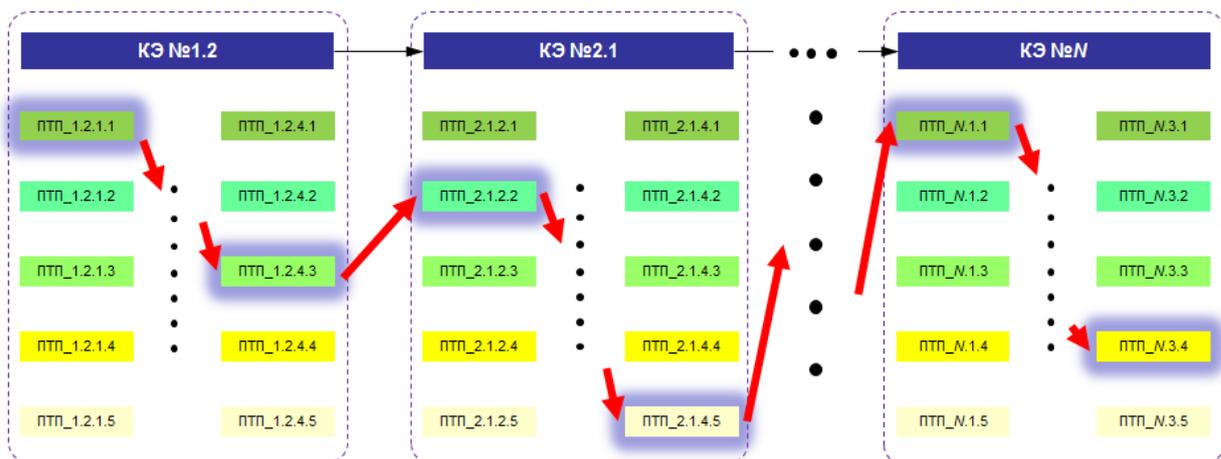


Рисунок 14. Результат оптимизации: фрагмент проектного технологического процесса (разработано автором)

Figure 14. Optimization result: project's technological process fragment (developed by the author)

Если в процессе оптимизации появится популяция одинаковых особей, то возникнет ситуация исключающая появление особей, улучшающих поколение, а это значит, что оптимальное решение найдено.

Тогда условие завершения работы ГА можно представить следующим выражением

$$G^{TP-1} = G^{TP}, TP = \overline{2, ind_{ng}}. \quad (22)$$

В итоге результат оптимизации будет представлен отдельной особью популяции, соответствующей перечню ПТП в рамках ТП строительства ОЖДП (рисунок 14).

Полученный в результате оптимизации ТП в дальнейшем будет являться ориентиром (основой) для наблюдения, оценки и прогноза (мониторинга) производственной ситуации. Поэтому в рамках разработки подсистемы ИИОТП строительства ОЖДП он получил название проектного технологического процесса (ТПП).

4. Практическая реализация методики оптимизации организационной структуры технологического процесса возведения насыпи железнодорожного земляного полотна с применением генетического алгоритма

4. Optimization methodology practical implementation for the railway roadbed embankment erection technological process organizational structure using a genetic algorithm

Для практической реализации методики оптимизации организационной структуры ТП строительства ОЖДП разработаны экспериментальные программные модули. Модуль ИАС «Оргструктура» позволяет в автоматизированном режиме формировать модель ТП. Для этого используется программная оболочка, реализующая интерфейс, и БД «Оргструктура». БД предназначена для накопления и хранения результатов моделирования ТП.

Модуль ИАС «Оптимизация» позволяет в автоматизированном режиме выполнить многокритериальную оптимизацию ТП с применением ГА. Модуль состоит из программной оболочки, реализующей интерфейс, и БД «Оптимизация», назначением которой является накопление и хранение исходных данных и результатов оптимизации ТП.

Для примера практической реализации процедуры эволюционного моделирования ТП рассмотрен участок подтопленной насыпи железнодорожного земляного полотна (ЖДЗП) с устройством полуобоймы из геотекстиля. В статье [6] описана процедура технологического обоснования КР указанной насыпи. Для этого был рассмотрен участок длиной 400 м, расположенный на однопутной железнодорожной линии IV

категории (подъездной путь к порту) проходящей в Астраханской области. В результате была получена графовая модель организационной структуры ТП и сформирована калькуляция затрат труда на сооружение насыпи. При этом графовая модель и калькуляция затрат не содержит вариации ПТП. Это обусловлено тем, что при технологическом обосновании КР насыпи с применением ЭС «Технология» были использованы такие исходные данные, которые исключили появление вариантов выполнения строительных работ. Прежде всего, это касается возможностей СПО – ее ресурсной оснащенности. В статье [6] ресурсная оснащенность СПО сознательно упрощена, что было продиктовано особенностями демонстрации практического применения результатов исследования. Однако, на практике ресурсная, технологическая и организационная оснащенности СПО в ЖДС значительно шире.

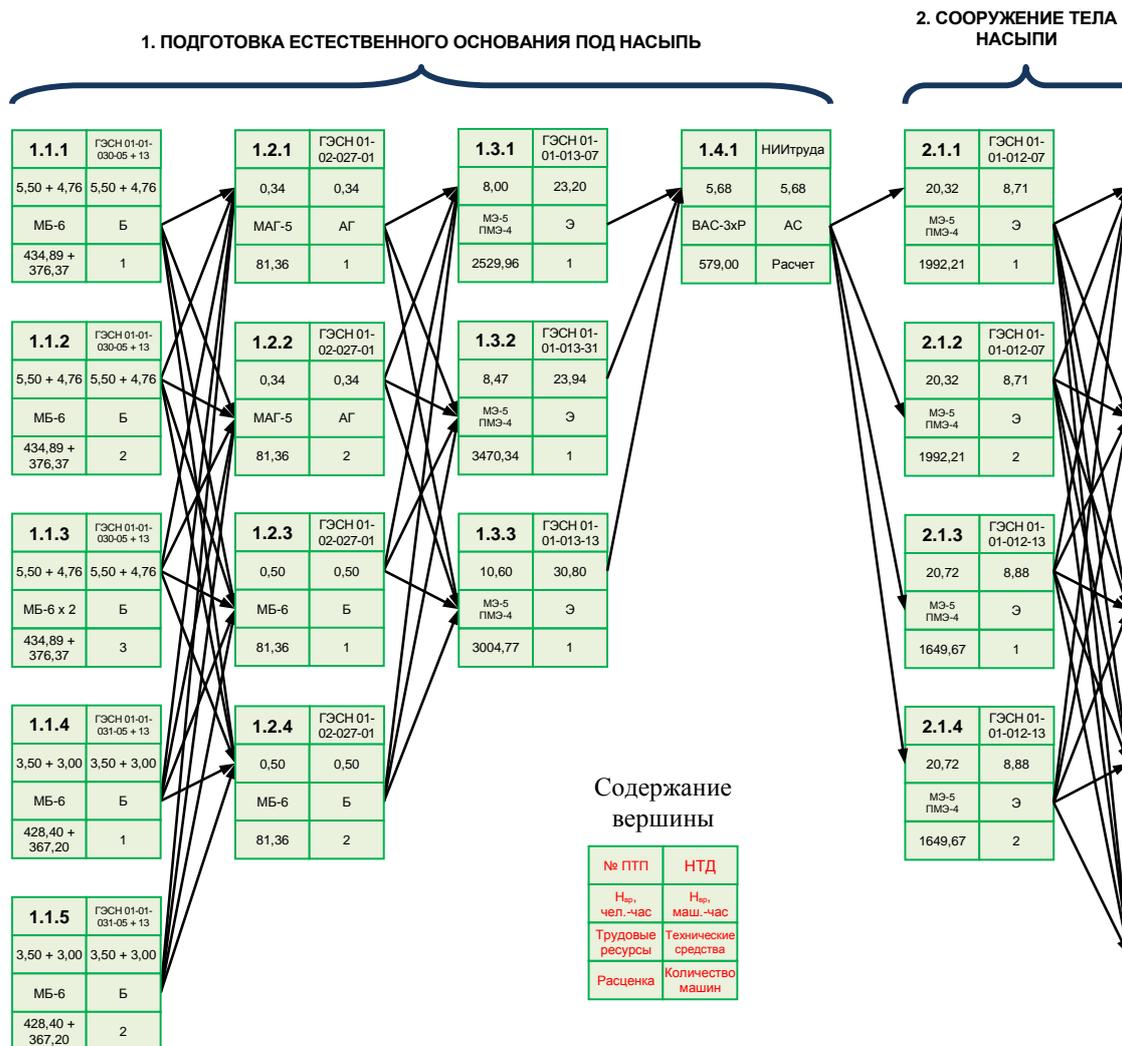


Рисунок 15. Фрагмент графовой модели организационной структуры технологического процесса возведения насыпи железнодорожного земляного полотна (разработано автором)

Figure 15. Graph model fragment of the railway roadbed embankment erection technological process organizational structure (developed by the author)

На рисунке 15 представлен фрагмент модели ТП (графовой модели организационной структуры) возведения насыпи, полученная с помощью программного модуля ИАС «ЭС «Технология», с учетом расширенных ресурсных возможностей СПО. Параметры ПТП, входящих в структуру ТП были использованы в решении практической задачи оптимизации ТП строительства ОЖДП. Для этого был использован специально разработанный программный модуль «Оптимизация».

На рисунках 16–19 показаны фрагменты работы разработанного автором программного модуля ИАС «Оптимизация», которые содержат исходные данные (ресурсную оснащенность СПО, объемы и условия производства работ), параметры ГА и начальную популяцию решений задачи. Для решения задачи в соответствии с установленными критериями определены следующие ограничения: трудоемкость – 7700 чел.-час, стоимость строительства – 1100 тыс. руб., количество рабочих – 85 чел.

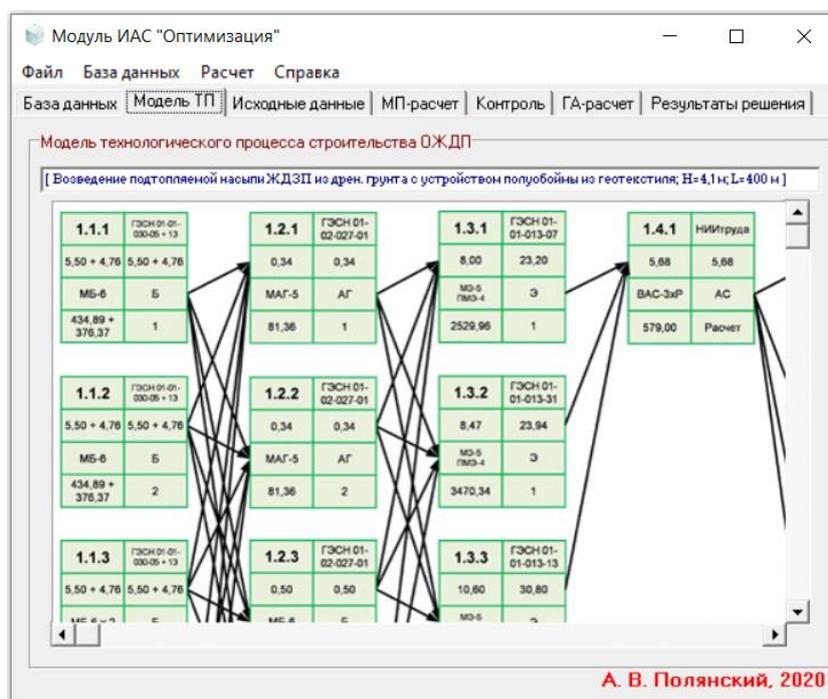


Рисунок 16. Фрагмент работы программного модуля ИАС «Оптимизация», вкладка «Модель ТП» (разработано автором)

Figure 16. Work fragment of the intelligent automated systems (IAS) software module "Optimization", "TP Model" tab (developed by the author)

Оценка ЦФ решения задачи формирования оптимального ТП возведения насыпи по формуле (6) была осуществлена с учетом динамического распределения ресурсов СПО по ПТП. Для ГА в ходе оптимизации были заданы следующие параметры: (1) размер популяции – 100 особей; (2) размер особи – 175 генов (5 генов на кодирование каждого из 35 рассматриваемых ПТП); (3) применяемые генетические операторы – репродукция на основе рулетки, пятиточечный кроссовер, пятиточечная

мутация с вероятностью 10 %, инверсия с вероятностью 5 %; (4) критерий останова алгоритма – смена 10 поколений; (5) генерация случайной начальной популяции.

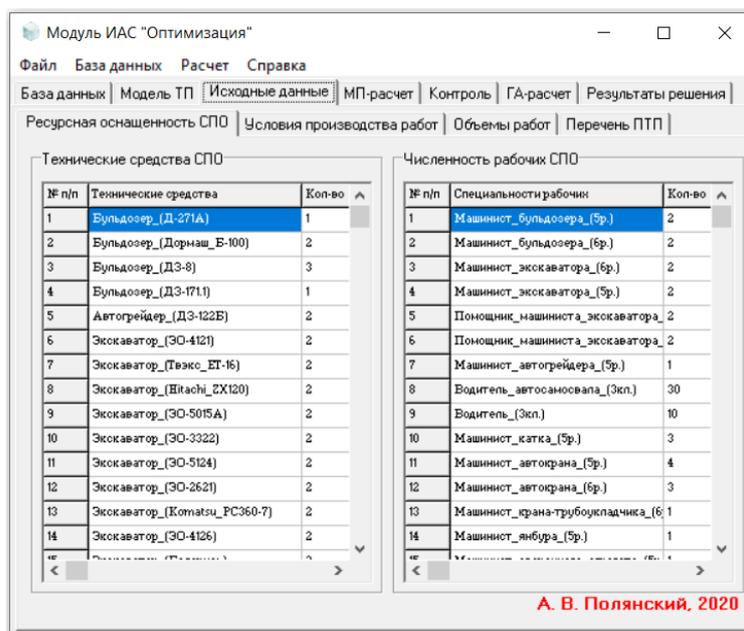


Рисунок 17. Фрагмент работы программного модуля ИАС «Оптимизация», вкладка «Исходные данные – Ресурсная оснащенность СПО» (разработано автором)

Figure 17. Work fragment of the intelligent automated systems (IAS) software module "Optimization", the tab "Initial data – contractor's resource equipment" (developed by the author)

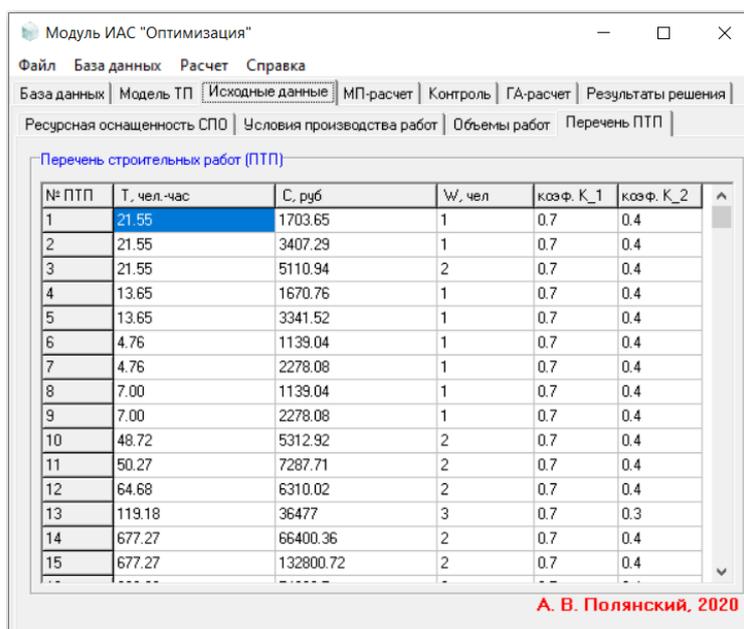


Рисунок 18. Фрагмент работы программного модуля ИАС «Оптимизация», вкладка «Исходные данные-Перечень ПТП» (разработано автором)

Figure 18. Work fragment of the intelligent automated systems (IAS) software module "Optimization", the tab "Initial data – simple technological process (STP)" (developed by the author)

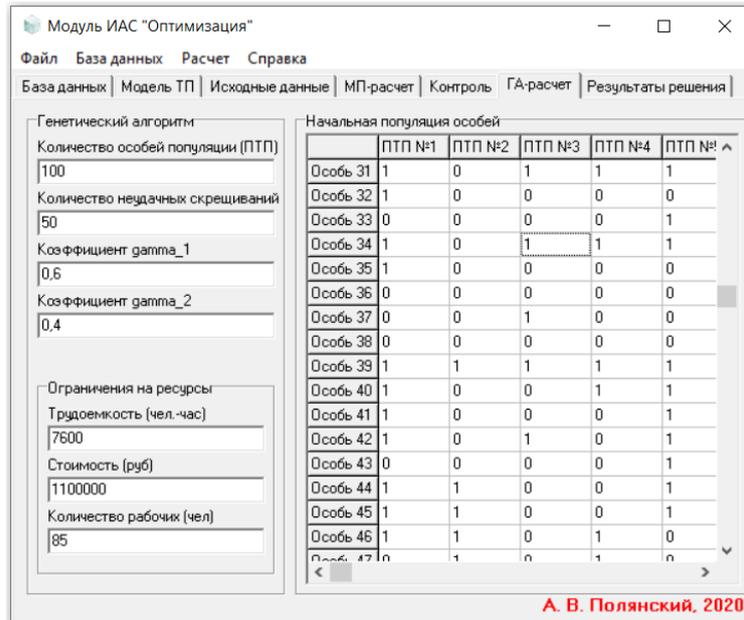


Рисунок 19. Фрагмент работы модуля ИАС «Оптимизация», вкладка «ГА-расчет» (разработано автором)

Figure 19. Fragment of the intelligent automated systems (IAS) "Optimization" module, the "genetic algorithm (GA)-calculation" tab (developed by the author)

На рисунке 20 представлены результаты расчета с применением ГА – оптимальный вариант ТП возведения насыпи, параметры решения задачи и график изменения целевой функции. ТП представлен в виде перечня ПТП в бинарной форме.

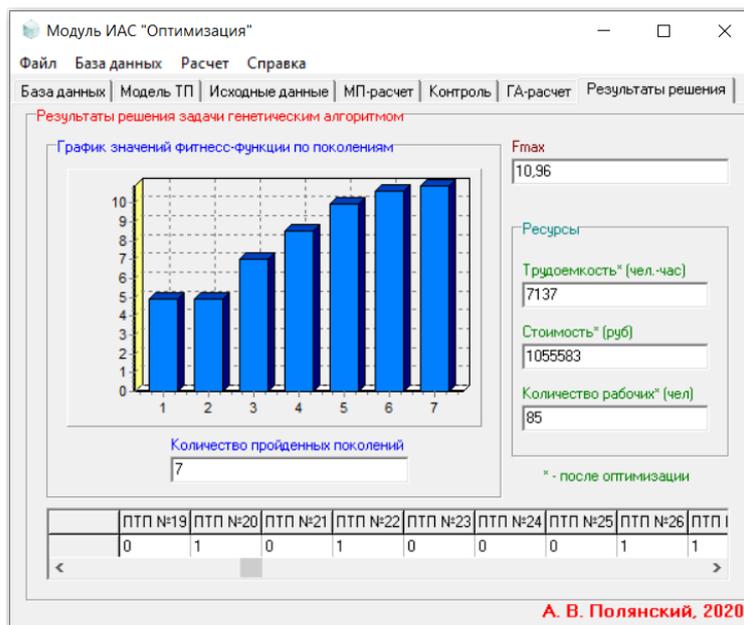


Рисунок 20. Фрагмент работы модуля ИАС «Оптимизация», вкладка «Результаты решения» (разработано автором)

Figure 20. Fragment of the intelligent automated systems (IAS) "Optimization" module, the "Solution Results" tab (developed by the author)

В таблице 1 представлен фрагмент калькуляции затрат труда на сооружение насыпи ЖДЗП с результатами оптимизации. Выделенные цветом строки таблицы указывают на выбранные с применением ГА виды работ (ПТП).

Таблица 1 / Table 1

Фрагмент калькуляции затрат труда и расчета стоимости работ на сооружение насыпи железнодорожного земляного полотна с результатами оптимизации

Labor costs calculation and the work cost calculation fragment for the railway roadbed embankment construction with the optimization results

№ п/п	Обоснование, шифр	Наименование работ	Ед. изм.	Объем работ	Н _{вр} на единицу измерения		Затраты труда на весь объем		Состав бригады	Потребные машины		Расценка ФЭР, ФССЦпг, руб.	Стоимость работ, руб.
					чел.- час	маш.- час	чел.- час	маш.- час		наименование	кол-во		
1. Подготовка естественного основания под насыпь													
1.1	ГЭСН 01-01-030-05 + 13	Срезка плодородно-растительного слоя бульдозером 108 кВт (79 л.с.) + добавлять на каждые последующие 10 м	1000 м ³	2,10	5,50 + 4,76	5,50 + 4,76	21,55	21,55	Машинист бульдозера 6 р. – 1	Бульдозер ДЗ-8	1	434,89 + 376,37	1703,65
1.2	ГЭСН 01-01-030-05 + 13	Срезка плодородно-растительного слоя бульдозером 108 кВт (79 л.с.) + добавлять на каждые последующие 10 м	1000 м ³	2,10	5,50 + 4,76	5,50 + 4,76	21,55	21,55	Машинист бульдозера 6 р. – 1 x 2	Бульдозер ДЗ-8	2	434,89 + 376,37	3407,29
1.3	ГЭСН 01-01-030-05 + 13	Срезка плодородно-растительного слоя бульдозером 108 кВт (79 л.с.) + добавлять на каждые последующие 10 м	1000 м ³	2,10	5,50 + 4,76	5,50 + 4,76	21,55	21,55	Машинист бульдозера 6 р. – 1 x 3	Бульдозер ДЗ-8	3	434,89 + 376,37	5110,94
1.4	ГЭСН 01-01-031-05 + 13	Срезка плодородно-растительного слоя бульдозером 121 кВт (165 л.с.) + добавлять на каждые последующие 10 м	1000 м ³	2,10	3,50 + 3,00	3,50 + 3,00	13,65	13,65	Машинист бульдозера 6 р. – 1	Бульдозер Б-100	1	428,40 + 367,20	1670,76
1.5	ГЭСН 01-01-031-05 + 13	Срезка плодородно-растительного слоя бульдозером 121 кВт (165 л.с.) + добавлять на каждые последующие 10 м	1000 м ³	2,10	3,50 + 3,00	3,50 + 3,00	13,65	13,65	Машинист бульдозера 6 р. – 1 x 2	Бульдозер Б-100	2	4428,40 + 367,20	3341,52

№ п/п	Обоснование, шифр	Наименование работ	Ед. изм.	Объем работ	Н _{вр} на единицу измерения		Затраты труда на весь объем		Состав бригады	Потребные машины		Расценка ФЭР, ФССЦпг, руб.	Стоимость работ, руб.
					чел.-час	маш.-час	чел.-час	маш.-час		наименование	кол-во		
2.1	ГЭСН 01-02-027-01	Планировка естественного основания автогрейдером 99 кВт (135 л.с.)	1000 м ²	14,00	0,34	0,34	4,76	4,76	Машинист автогрейдера 5 р. – 1	Автогрейдер ДЗ-122Б	1	81,36	1139,04
2.2	ГЭСН 01-02-027-01	Планировка естественного основания автогрейдером 99 кВт (135 л.с.)	1000 м ²	14,00	0,34	0,34	4,76	4,76	Машинист автогрейдера 5 р. – 1 х 2	Автогрейдер ДЗ-122Б	2	81,36	2278,08
2.3	ГЭСН 01-02-027-01	Планировка естественного основания бульдозером 108 кВт (79 л.с.)	1000 м ²	14,00	0,50	0,50	7,00	7,00	Машинист бульдозера 6 р. – 1	Бульдозер ДЗ-8	1	81,36	1139,04
2.4	ГЭСН 01-02-027-01	Планировка естественного основания бульдозером 108 кВт (79 л.с.)	1000 м ²	14,00	0,50	0,50	7,00	7,00	Машинист бульдозера 6 р. – 1 х 2	Бульдозер ДЗ-8	2	81,36	2278,08
3.1	ГЭСН 01-01-013-07	Погрузка плодородно-растительного грунта в автосамосвалы экскаватором одноковшовым дизельным на гусеничном ходу, емкость ковша 0,65 м ³	1000 м ³	2,10	8,00	23,2	16,8	48,72	Машинист экскаватора 5 р. – 1, Пом. маш. экскаватора 4 р. – 1	Экскаватор ЕТ-16	1	2529,96	5312,92
3.2	ГЭСН 01-01-013-31	Погрузка плодородно-растительного грунта в автосамосвалы экскаватором импортного производства одноковшовым дизельным на гусеничном ходу, емкость ковша 0,5 м ³	1000 м ³	2,10	8,47	23,94	17,79	50,27	Машинист экскаватора 5 р. – 1 Пом. маш. экскаватора 4 р. – 1	Экскаватор ZX120	1	3470,34	7287,71
3.3	ГЭСН 01-01-013-13	Погрузка плодородно-растительного грунта в автосамосвалы экскаватором одноковшовым дизельным на гусеничном ходу, емкость ковша 0,5 м ³	1000 м ³	2,10	10,6	30,8	22,26	64,68	Машинист экскаватора 5 р. – 1 Пом. маш. экскаватора 4 р. – 1	Экскаватор ЭО-5015А	1	3004,77	6310,02
4	НИИтр уда	Транспортирование плодородно-растительного слоя автосамосвалами (ФССЦпг 03-21-01), объем кузова 6 м ³	100 м ³	21,00	5,68	5,68	119,18	119,18	Водитель автосамосвала 3 кл. х 3	Автосамосвал КрАЗ 256Б1	3	579,00	36477,00

№ п/п	Обоснование, шифр	Наименование работ	Ед. изм.	Объем работ	Н _{вр} на единицу измерения		Затраты труда на весь объем		Состав бригады	Потребные машины		Расценка ФЭР, ФССЦпг, руб.	Стоимость работ, руб.
					чел.-час	маш.-час	чел.-час	маш.-час		наименование	кол-во		
2. Сооружение тела насыпи													
1.1	ГЭСН 01-01-012-07	Разработка грунта из штабеля гидронамыва с погрузкой на автосамосвалы экскаватором одноковшовым дизельным на гусеничном ходу, емкость ковша 1,6 м ³	1000 м ³	33,33	4,19	20,32	139,65	677,27	Машинист экскаватора 5 р. – 1 Пом. маш. экскаватора 4 р. – 1	Экскаватор РС360-7	1	1992,21	66400,36
1.2	ГЭСН 01-01-012-07	Разработка грунта из штабеля гидронамыва с погрузкой на автосамосвалы экскаватором одноковшовым дизельным на гусеничном ходу, емкость ковша 1,6 м ³	1000 м ³	33,33	4,19	20,32	139,65	677,27	Машинист экскаватора 5 р. – 1 х 2 Пом. маш. экскаватора 4 р. – 1 х 2	Экскаватор РС360-7	2	1992,21	132800,72
1.3	ГЭСН 01-01-012-13	Разработка грунта из штабеля гидронамыва с погрузкой на автосамосвалы экскаватором одноковшовым дизельным на гусеничном ходу, емкость ковша 1,25 м ³	1000 м ³	33,33	4,27	20,72	142,32	690,60	Машинист экскаватора 5 р. – 1 Пом. маш. экскаватора 4 р. – 1	Экскаватор ЭО-4126	1	1649,67	54983,50
1.4	ГЭСН 01-01-012-13	Разработка грунта из штабеля гидронамыва с погрузкой на автосамосвалы экскаватором одноковшовым дизельным на гусеничном ходу, емкость ковша 1,25 м ³	1000 м ³	33,33	4,27	20,72	142,32	690,60	Машинист экскаватора 5 р. – 1 х 2 Пом. маш. экскаватора 4 р. – 1 х 2	Экскаватор ЭО-4126	2	1649,67	109967,00

Составлено автором / Compiled by the author

В дальнейшем результаты, полученные в ходе эволюционного моделирования ТП возведения насыпи ЖДЗП, могут быть использованы для разработки технологических схем и календарного планирования строительства при разработке проекта производства работ.

Заключение

Conclusion

В работе были представлены теоретические результаты исследования и возможности практического применения эволюционного моделирования и многокритериальной оптимизации к решению задач планирования строительных работ при формировании ТП ЖДС.

Особенности существующих методов оптимизации, в части размерности решаемых задач и учета нескольких критериев, потребовали применения ГА направленного поиска в пространстве решений. В связи с этим была разработана процедура и описана расчетно-логическая модель оптимизации ТП с целью выявления оптимальной последовательности работ при строительстве ОЖДП. При этом учитывалось сразу несколько проектных ограничений: ресурсных, технологических, организационных, информационных. Расчетно-логическая модель, позволила провести оценку ЦФ (функции приспособленности) с учетом динамического характера распределения ресурсов, имеющихся у СПО по строительным работам.

Практическая реализация моделирования и оптимизации ТП с применением ГА осуществлена в автоматизированном режиме на примере возведения подтопляемой насыпи ЖДЗП.

Внедрение средств эволюционного моделирования в разработку ТП ЖДС способствует оперативному планированию строительных работ. Таким образом, СПО получает новый инструмент, направленный на обеспечение производственной и экономической эффективности своей деятельности.

Список сокращений:

АС – автоматизированная система;

БД – база данных;

ГА – генетический алгоритм;

ЖДЗП – железнодорожное земляное полотно;

ЖДС – железнодорожное строительство;

ИАС – интеллектуальная автоматизированная система;

ИИОТП – инженерно-интеллектуальное обеспечение технологического процесса;

КТП – комплексный технологический процесс;

КЭ – конструктивный элемент;

ОЖДП – объект железнодорожного пути;

ОС – организационная структура;

ОТД – организационно-технологическая документация;

ПТП – простой технологический процесс;

СПО – строительная (подрядная) организация;

ТП – технологический процесс;

ТПП – проектный технологический процесс;

ЦФ – целевая функция;

ЭС – экспертная система.

ЛИТЕРАТУРА

1. **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: 15.10.2020).
2. **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: 04.12.2020). – Рез. англ.
3. Интеллектуальные системы управления организационно-техническими системами / под редакцией А.А. Большакова. – 2-е изд. – М.: «Горячая линия-Телеком», 2016. – 160 с.
4. Автоматизированное проектирование организации строительства железных дорог / под редакцией С.П. Першина. – М.: Транспорт, 1991. – 261 с.
5. **Небритов Б.Н.** Организационно-технологическое проектирование в строительстве / Б.Н. Небритов. – М.: Вузовская книга, 2011. – 144 с.
6. **Полянский А.В.** Теория и практика технологического обоснования конструктивных решений объектов железнодорожного пути с применением экспертной системы / А.В. Полянский. – DOI <https://doi.org/10.15862/01SATS320> // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». – 2020. – Т 7, №3. – URL: <https://t-s.today/01SATS320.html> (дата обращения: 14.01.2021).
7. **Lin L.** Network modeling and evolutionary optimization for scheduling in manufacturing / L. Lin, X-C. Hao, M. Gen, J-B. Jo. – DOI <https://doi.org/10.1007/s10845-011-0569-6> // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2011. – Т 23, №6. – С. 2237–2253. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10845-011-0569-6> (дата обращения: 27.11.2020).
8. **Полянский А.В.** Интеллектуальные подходы к разработке рациональных организационно-технологических решений в транспортном строительстве / А.В. Полянский // Транспортное строительство. – 2013. – №10. – С. 13–15.
9. **Zavadskas E.K.** Mehrkriterielle Entscheidungen im Bauwesen: Monografija / E.K. Zavadskas. – Vilnius: Technika, 2000. – 207 с.
10. **Каклаускас А.** Биометрическая и интеллектуальная поддержка решений: монография / А. Каклаускас, Э.К. Завадскас. – Вильнюс: Техника, 2012. – 344 с.
11. **Селиванов С.Г.** Системотехника инновационной подготовки производства в машиностроении / С.Г. Селиванов, М.Б. Гузаиров. – М.: Машиностроение, 2012. – 568 с. – URL: <http://innovatics-tm.ru/wp-content/uploads/2014/05/Innovacionnaya-podgotovka-proizvodstva.pdf> (дата обращения: 18.11.2020).
12. **Buitrago M.** Designing construction processes in buildings by heuristic optimization / M. Buitrago, J.M. Adam, Y.A. Alvarado, J.J. Moragues, I. Gasch, P.A. Calderón. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.12.009> // Engineering Structures. – 2016. – Т 111. – С. 1–10. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029615007737> (дата обращения: 17.11.2020).

13. **El-Abbasy M.S.** Finance-based scheduling multi-objective optimization: Benchmarking of evolutionary algorithms / M.S. El-Abbasy, A. Elazouni, T. Zayed. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103392> // Automation in Construction. – 2020. – Т 120. – С. 103392. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580520309729> (дата обращения: 21.12.2020).
14. **Полянский А.В.** Эволюционная оптимизация продолжительности строительства транспортных объектов поточным методом / А.В. Полянский // Наука и техника транспорта. – 2018. – №2. – С. 78–85. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35128158> (дата обращения: 21.12.2021).
15. **Fung I.W.H.** Application of GA Techniques for Solving Precedent Relationship Problem in Project Scheduling Optimization / I.W.H. Fung, C. Huang, V.W.Y. Tam. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.318> // Procedia Engineering. – 2011. – Т 14. – С. 2527–2534. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811013956> (дата обращения: 27.12.2020).
16. **Faghihi V.** Construction scheduling using Genetic Algorithm based on Building Information Model / V. Faghihi, K.F. Reinschmidt, J.H. Kang. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.05.047> // Expert Systems with Applications. – 2014. – Т 41, №16. – С. 7565–7578. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417414003340> (дата обращения: 11.11.2020).
17. **Cengiz Toklu Y.** Application of genetic algorithms to construction scheduling with or without resource constraints / Y. Cengiz Toklu. – DOI <https://doi.org/10.1139/102-034> // Canadian Journal of Civil Engineering. – 2002. – Т 29, №3. – С. 421–429. – URL: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/102-034> (дата обращения: 26.10.2020).
18. **Васильев Д.А.** Алгоритм выбора схемы электроснабжения потребителей в аварийных и предаварийных ситуациях / Д.А. Васильев // Вестник СГТУ. – 2010. – Т 3, №1. – С. 123–127. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15559861> (дата обращения: 03.07.2020).

Сведения об авторах:

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: <http://orcid.org/0000-0001-6190-0481>
РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=412433

Статья получена: 01.03.2021. Принята к публикации: 03.05.2021. Опубликована онлайн: 17.05.2021.

REFERENCES

1. Zaval'nyuk S.I., Rybitskiy V.A., Altynov 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 15th October 2020). (In Russ.).
2. 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).
3. Bol'shakov A.A. ed. [*Intelligent management systems for organizational and technical systems*]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom; 2006. (In Russ.).
4. 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.).
5. Nebritov B.N. [*Organizational and technological design in construction*]. Moscow: Vuzovskaya Kniga; 2011. (In Russ.).
6. Polyanskiy A.V. Theory and practice of constructive solutions technological justification for railway objects via the use of an expert system. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2020; 7(3). (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/01SATS320>.
7. Lin L., Hao X-C., Gen M., Jo J-B. Network modeling and evolutionary optimization for scheduling in manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2011; 23(6): 2237–2253. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-011-0569-6>.
8. 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.).
9. Zavadskas E.K. [*Multi-criteria decisions in construction: Monograph*]. Vilnius: Technika; 2000. (In German).
10. Kaklauskas A., Zavadskas E. [*Biometric and Intelligent Decision Support: Monograph*]. Vilnius: Technika; 2012. (In Russ.).
11. Selivanov S.G., Guzairov M.B. [Systems engineering for innovative preparation of production in mechanical engineering]. Moscow: Mashinostroyeniye; 2012. Available at: <http://innovatics-tm.ru/wp-content/uploads/2014/05/Innovacionnaya-podgotovka-proizvodstva.pdf> (accessed 18th November 2020). (In Russ.).
12. Buitrago M., Adam J.M., Alvarado Y.A., Moragues J.J., Gasch I., Calderón P.A. Designing construction processes in buildings by heuristic optimization. *Engineering Structures*. 2016; 111: 1–10. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.12.009>.
13. El-Abbasy M.S., Elazouni A., Zayed T. Finance-based scheduling multi-objective optimization: Benchmarking of evolutionary algorithms. *Automation in Construction*. 2020; 120: 103392. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103392>.
14. Polyanskiy A.V. [Evolutionary optimization of the duration of the construction of transport facilities by the flow method]. *Science and Technology in Transport*. 2018; (2): 78–85. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35128158> (accessed 21st December 2020). (In Russ.).

15. Fung I.W.H., Huang C., Tam V.W.Y. Application of GA Techniques for Solving Precedent Relationship Problem in Project Scheduling Optimization. *Procedia Engineering*. 2011; 14: 2527–2534. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.318>.
 16. Faghihi V., Reinschmidt K.F., Kang J.H. Construction scheduling using Genetic Algorithm based on Building Information Model. *Expert Systems with Applications*. 2014; 41(16): 7565–7578. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.05.047>.
 17. Y Cengiz Toklu Application of genetic algorithms to construction scheduling with or without resource constraints. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2002; 29(3): 421–429. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1139/102-034>.
 18. Vasiliyev D.A. Selection algorithm schemes for electricity consumers in emergency and prior emergency situations. *Vestnik Saratov State Technical University*. 2010; 3(1): 123–127. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15559861> (accessed 3rd July 2020). (In Russ., abstract in Eng.).
-

Information about the authors:

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

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

РИИЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=412433

Submitted: 1st March 2021. Revised: 03rd May 2021. Published online: 17th May 2021.