

# Совершенствование математического обеспечения оптимального трассирования железных дорог в условиях пересеченного рельефа местности



**В. А. Анисимов,**  
д-р техн. наук, профессор  
кафедры «Изыскания  
и проектирование  
железных дорог»  
Петербургского  
государственного  
университета путей  
сообщения Императора  
Александра I (ПГУПС),



**Р. Д. Пренинг,**  
аспирант ПГУПС

Современные возможности вычислительных систем и средств визуализации цифровой информации сформировали необходимые предпосылки для коренной модернизации существующих технологий автоматизированного проектирования наземных путей сообщения на основе применения методов интеллектуального анализа данных, оптимизации и трехмерного параметрического моделирования.

**П**роцесс трассирования новых железных дорог представляет собой решение сложной и важной комплексной задачи, которая заключается в определении пространственного положения трассы (продольной оси проектируемой дороги в уровне бровки земляного полотна) с учетом транспортно-экономических, строительных и эксплуатационных требований, топографических, инженерно-геологических, гидрологических, сейсмических и других природно-климатических условий.

В классической теории трассирования для определения положения трассы проектируемой дороги в пространстве используют ее плоские проекции — план и продольный профиль. От их геометрических характеристик зависят параметры капиталоёмких постоянных сооружений нижнего строения пути, которые должны обеспечить безопасную и бесперебойную работу железной дороги в течение длительного периода эксплуатации с учетом перспектив увеличения ее мощности при росте потребных объемов перевозок.

Основные принципы трассирования железных дорог разработаны в XIX в. основоположниками отечественной транспортной науки П. П. Мельниковым, его учениками и их последователями, которые в дальнейшем были развиты в методы и приемы трассирования в «местах ровных, холмистых и горных» [1, 2].

Процесс трассирования разбивается на следующие основные этапы:

- выявление возможных вариантов направления трассирования, соединяющих опорные пункты через фиксированные точки трассы;
- прокладка магистральных ходов по выявленным направлениям трассирования для их оценки, сравнения и отбора конкурентоспособных вариантов;
- проектирование плана и продольного профиля трассы по конкурентоспособным вариантам направления трассирования.

По соотношению значений ограничивающих уклонов и среднего естественного уклона местности магистральные ходы разбивают на участки вольного и напряженного ходов [3, 4]. На вольных ходах, где средний естественный уклон местности меньше ограничивающего, трассу укладывают по кратчайшему расстоянию между фиксированных точек, проектируя продольный профиль дороги. На напряженных ходах проектируют план трассы, исходя из максимального использования ограничивающего уклона.

В прошлом веке в рамках разработки и внедрения систем автоматизированного проектирования (САПР) железных и автомобильных дорог в проектных институтах СССР начались работы по созданию математического обеспечения оптимального трассирования [5–13]. Предложены математические модели и методы оптимизации продольного профиля трассы на участках вольного хода [8, 9, 12] и плана на

участках напряженного хода [10–13]. Для их реализации разрабатывались компьютерные программы, некоторые из них были применены в проектировании новых железных и автомобильных дорог.

Так, с помощью программы «Профиль» для ЭВМ БЭСМ-4 в 1970-х годах запроектировано более 1200 км продольного профиля проектными институтами Мосгипротранс, Ленгипротранс и Сибгипротранс по вариантам трассы Байкало-Амурской магистрали [9]. С применением в проектной деятельности персональных компьютеров программа «Профиль» была перекодирована для IBM PC IT-386 с операционной системой PC DOS, но после распада Советского Союза прекратилось государственное финансирование данных разработок, и научные исследования по совершенствованию математического обеспечения оптимального трассирования практически были свернуты [14].

### Текущее состояние проблемы оптимального трассирования

В конце прошлого столетия и первые десятилетия XXI в. методы поиска оптимального проектного решения и применяемые математические модели для автоматизированного трассирования железных дорог получили свое развитие в работах А. С. Понарина [15], В. И. Струченкова [14, 16], Д. А. Карпова [16], В. А. Бучкина [17], А. И. Богданова [18, 19].

А. С. Понариным выполнена модификация методов «ручного» трассирования [15] для их применения в автоматизированном проектировании железных дорог. Разработанная им сплайновая модель рельефа [15] использовалась при оценке его сложности, поиске характерных точек и линий, а также при автоматизированной укладке на напряженном ходу линии нулевых работ, ее аппроксимации параметрическим сплайном, обеспечивающим соблюдение норм проектирования, с последующим построением продольного профиля земли по полученному плану трассы.

Для решения задач оптимального трассирования железных дорог А. С. Понариным применены метод сгущения трехзвенной модели проектного профиля и модифицированный метод двумерного наискорейшего спуска с использованием параболической интерполяции и экстраполяции. Также предложен и реализован алгоритм тяговых расче-

тов, основанный на численном интегрировании уравнения движения поезда методом Эйлера — Коши.

В работах В. И. Струченкова и Д. А. Карпова поиск оптимального положения трассы линейного сооружения осуществляется в пределах полосы варьирования, заданной проектировщиком на цифровой модели местности (ЦММ). Оптимальный или улучшенный вариант трассы отыскивается от заданного начального приближения ее плана, который вместе с проектной линией представлен дискретными моделями в виде ломаных линий с заданным числом элементов [14]. Полученные после оптимизации ломаные аппроксимируют с учетом норм проектирования в соответствующие сплайны.

В [14, 16] описан алгоритм оптимизации проектной линии при заданном плане трассы и линейных ограничениях, разработанный на основе методов нелинейного программирования и реализованный с помощью компьютерных проектирующих программ. Он применяется на вольных и напряженных ходах трассы, а также на участках со сложным пересеченным рельефом местности.

Поиск лучшего положения дороги осуществляется путем перебора и сравнения задаваемых проектировщиком вариантов плана трассы, для которых по разработанному алгоритму решается задача оптимизации проектной линии на продольном профиле [14]. На цифровой модели рельефа с помощью системы поперечников к заданному плану трассы задаются топографические, геологические, гидрологические и другие условия проектирования.

Поперечники строятся в узлах ломаной линии и в точках пересечения трассой водотоков и водоразделов. Задача решается в три этапа [14, 16]. Сначала выполняется оптимизация дискретной модели трассы в виде ломаной с короткими элементами, затем — преобразование ломаной в последовательность элементов заданного вида и на последнем этапе — оптимизация параметров элементов трассы.

Для реализации предложенного алгоритма разработана САПР «Трасса ж.д.», состоящая из 11 подсистем. С их помощью по заданным вариантам плана трассы выполняют совместное проектирование продольного профиля и поперечников земляного полотна новой железной дороги [14]. Полученные проектные решения выводятся на

экран монитора для визуального анализа и уточнения требований к проектной линии и поперечным профилям земляного полотна посредством корректировки исходных данных. Окончательное решение принимает проектировщик.

Задачи расчета стока поверхностных вод, притекающего к створу малых водопропускных сооружений, выбора их типов и размеров, а также распределения земляных масс и выбора способов производства работ решаются отдельно.

Автоматизированное трассирование железных дорог с оценкой проектных решений по укрупненным показателям в режиме реального времени реализовано в программе INVEST [17], разработанной В. А. Бучкиным. С ее помощью проектировщик, используя многооконный режим, укладывает план трассы на ЦММ, построенной по средне- или мелкомасштабным картам или аэрофото- или космическим снимкам и отображенной на экране монитора. При этом в программном окне «Профиль» автоматически «строятся совмещенные продольный профиль земли и проектная линия продольного профиля, оптимальная по выбранному критерию с учетом всех нормативных ограничений» [17].

В работах А. И. Богданова для автоматизированного поиска оптимального положения трассы новой железной дороги предложены общая модель ее плана и профиля, а также метод, основанные на формализации способов классической теории трассирования [18, 19]. Проектирование плана и продольного профиля трассы рассматривается как задача линейной аппроксимации. В качестве аппроксимируемых линий используются магистральный ход и профиль земли. План и продольный профиль трассы являются аппроксимирующими. Данные линии представлены кусочно-линейными функциями [18, 19]. Для апробации при трассировании новых железных дорог, предложенных общей модели и метода, разработаны пилотные версии программ автоматизированного проектирования, которые использованы в учебном процессе Дальневосточного государственного университета путей сообщения.

Как видим из рассмотренных работ, автоматизированное трассирование железных дорог с применением математически обоснованных алгоритмов оптимизации требует непосредственного участия проектировщика как при задании исходных вариантов плана трассы

[14] или магистрального хода [15, 18, 19], так и при оценке проектных решений, их сравнении, а также в управлении процессом поиска оптимального варианта и принятии решения с учетом многих критериев [20].

Такое положение в первую очередь связано с тем, что определение оптимального пространственного положения трассы железной дороги является сложной многоэкстремальной задачей с нелинейными ограничениями и целевой функцией. В теории оптимизации для решения таких задач применяются только полный перебор вариантов и динамическое программирование [14].

Также это обусловлено необходимостью в процессе трассирования решать смежные задачи: определение объемов земляных работ, выбор водопропускных сооружений, распределение земляных масс, выбор способов производства земляных работ и др. При этом некоторые из них не автоматизированы, а для других не полностью формализованы их взаимосвязи с проектированием плана и продольного профиля трассы. К таким задачам относятся: расчет стока поверхностных вод, выбор типов и размеров малых водопропускных сооружений, расчет времени хода поезда для размещения отдельных пунктов и др.

Можно сделать вывод, что автоматический поиск оптимального положения трассы в пространстве в современных САПР пока не реализован. Автоматизированное трассирование железных дорог по-прежнему выполняется в интерактивном режиме по цифровой модели местности классическими графико-аналитическими методами в проекциях плана и продольного профиля трассы.

### Совершенствование моделей и методов оптимального трассирования железных дорог

Для решения проблемы оптимального трассирования железных дорог в ПГУПС ведутся научные исследования, целью которых является создание технологичных моделей и методов автоматизированного проектирования плана и продольного профиля трассы для их реализации в САПР. На кафедре «Изыскания и проектирование железных дорог» предложена концепция новой технологии автоматизированного проектирования железных дорог в информационно-цифровой среде [21], проводятся вычислительные экспери-

менты в САПР Топоматик Robur и разработана программа формирования на участках с пересеченным рельефом местности множества допустимых вариантов трассы с расчетом технико-экономических показателей для их сравнения и выбора наилучшего [22].

Новая технология включает в себя шесть этапов:

1. Инженерные изыскания с применением современных измерительных средств и методов: спутниковые измерения, мобильное трехмерное лазерное сканирование, цифровая аэрофотосъемка, георадарная съемка.

2. Обработка методами интеллектуального анализа больших данных и цифровой фотограмметрии полевых данных инженерных изысканий.

3. Построение по результатам обработки полевых данных инженерной цифровой модели местности (ИЦММ) — информационной основы проектирования.

4. Трехмерная визуализация ИЦММ с использованием аналитических методов пространственного моделирования местности и компьютерных средств воспроизведения 3D картографических изображений.

5. Автоматизированное трассирование железной дороги на 3D ИЦММ, включающее в себя:

- укладку начальных конкурентоспособных 3D вариантов трассы с определением положения площадок отдельных пунктов по времени хода поезда;
- декомпозицию трассы на участки вольного и напряженного ходов и со сложными условиями местности;
- автоматический поиск на локальных участках трассы ее оптимального положения с учетом заданных критериев и ограничений;
- автоматизированный поиск оптимального положения всей трассы.

6. Создание цифровой информационной модели железной дороги на основе оптимальной трассы как формирующего компонента.

Из всех перечисленных этапов пятый — наиболее важный и сложный. Особые затруднения проектировщик испытывает, когда необходимо найти оптимальное положение трассы на участках со сложными условиями местности. В данном случае решается задача совместной оптимизации параметров плана и продольного профиля трассы. Кроме этого, учитывая стратегическую

и социальную значимость железных дорог, на принятие решения по выбору наилучшего варианта трассы наряду с технико-экономическими показателями существенное влияние могут оказывать политические, экологические и социальные факторы [20].

В рамках научно-исследовательской работы кафедры с привлечением студенческих научных коллективов проводится вычислительный эксперимент по совершенствованию математических моделей и методов оптимального трассирования железных дорог в условиях пересеченного рельефа местности [23]. Разработан алгоритм эксперимента [24] (рис. 1 и 2).

На начальной стадии эксперимента для формирования множества допустимых проектных решений по плану и продольному профилю трассы новой железной дороги используется TIN-модель рельефа участков местности с продольным водоразделом, поперечными водоразделами и логами (рис. 3). Вершины углов поворота (ВУ) назначаются на пересечения горизонтальных проекций трассы, соединяющей фиксированные точки по прямой, и структурных линий поперечных водоразделов (ВУ2 и ВУ4) и лога (ВУ3).

При формировании множества проектных решений по каждому допустимому варианту плана трассы проектируется ее продольный профиль. В зависимости от уклонов рельефа местности и норм проектирования<sup>1</sup> определяются параметры условий применения расчетных схем поиска оптимальной проектной линии (рис. 4–7):

$$i_{cp} = \frac{(H_2^3 + h_{min}^{ch}) - (H_1^3 + h_{min}^{bc})}{L}, n_{\Delta i} = \left\lceil i_{cp} / \Delta i_n \right\rceil,$$

$$\Delta H = H_2 - H_1 - n_{\Delta i} (n_{\Delta i} + 1) l_n \Delta i_n,$$

$$\Delta L = L - n_{\Delta i} (n_{\Delta i} + 1) l_n,$$

$$i_{max} = \Delta H / \Delta L,$$

где  $i_{cp}$  — средний уклон между точками пересечения трассой структурных линий водораздела и тальвега с учетом минимальной высоты насыпи для предотвращения снежных или песчаных заносов и размещения водопропускного сооружения;

$\Delta i_n$  — наибольшая алгебраическая разность уклонов смежных элементов профиля;

$l_n$  — наименьшая длина элементов профиля.

Первая расчетная схема (рис. 5) применяется при выполнении условий:

<sup>1</sup> СП 119.13330.2024. Железные дороги колеи 1520 мм.

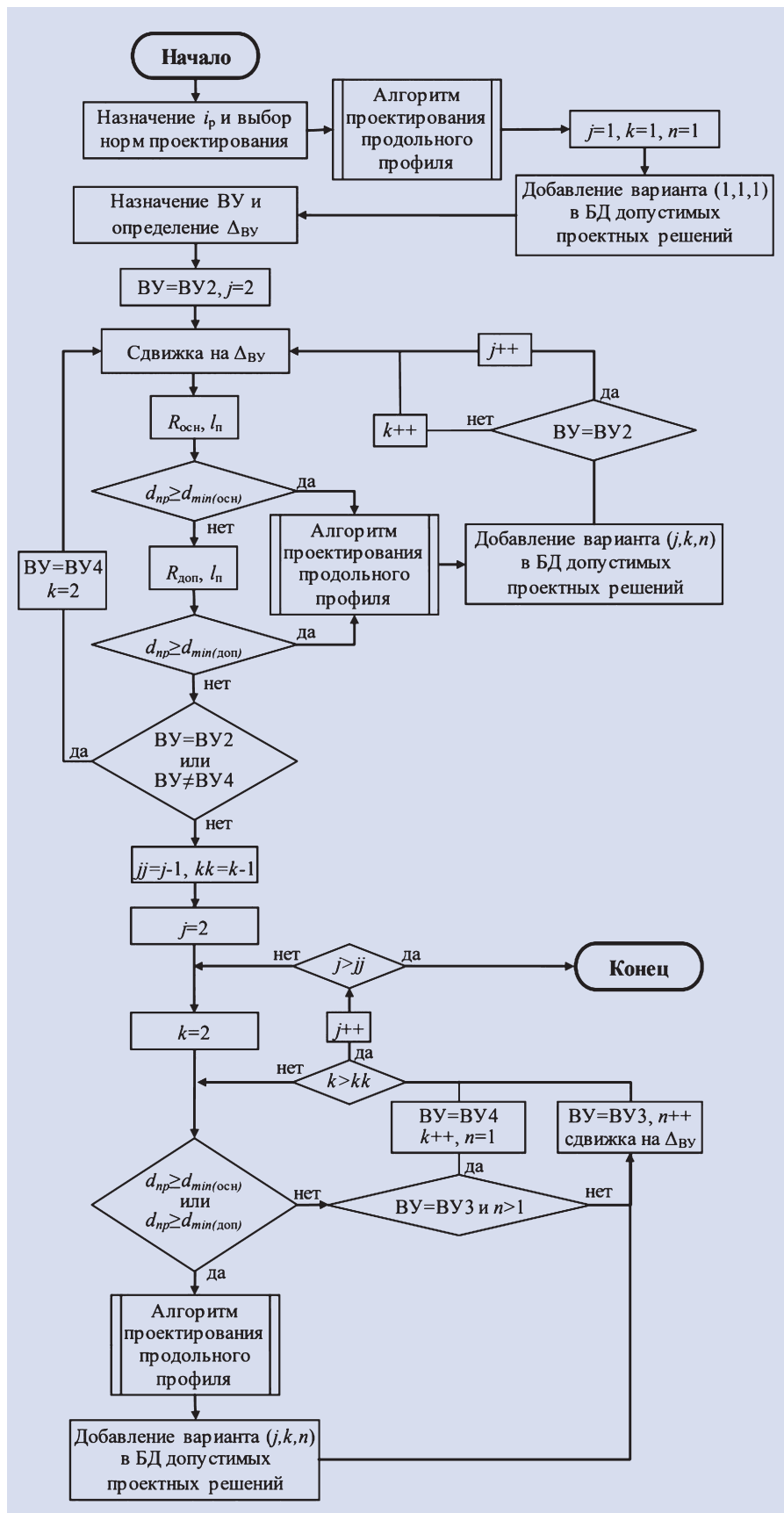


Рис. 1. Алгоритм вычислительного эксперимента

$$i_{\max} \leq i_{тр} = i_p - i_s, \\ \Delta L \geq l_n,$$

где  $i_{тр}$  — уклон трассирования;

$i_p$  — руководящий уклон;

$i_s$  — эквивалентный уклон.

На участках трассы с расчетной схемой № 1 поиск оптимальной проектной линии выполняется методами аппроксимации продольного профиля земли с обеспечением минимальных допуска-

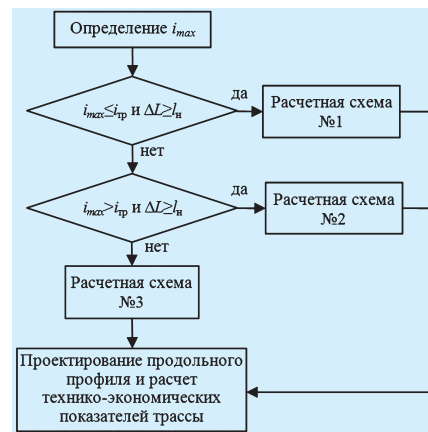


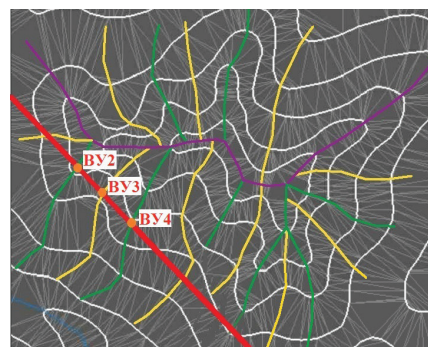
Рис. 2. Алгоритм проектирования продольного профиля

емых высот насыпи и норм проектирования.

Условия применения расчетной схемы № 2 (рис. 6):

$$i_{\max} > i_{тр}, \\ \Delta L \geq l_n.$$

Поиск оптимального варианта во второй расчетной схеме осуществляется в коридоре варьирования. Его верхней границей является положение проектной линии, при котором ее продольный профиль на водоразделе запроектирован насыпью с минимальной высотой, обеспечивающей предотвращение снежных или песчаных заносов. Рабочая отметка на линии тальвега в этом случае будет больше минимальной высоты насыпи для размещения водопропускного сооружения. Нижней границей коридора будет положение проектной линии, при котором ее продольный профиль запроектирован с минимально допустимой высотой насыпи в логу, обеспечивающей необходимые условия размещения водопропускного сооружения. В этом случае трасса будет пересекать водораздел выемкой.



— план трассы  
— продольный водораздел  
— поперечный водораздел  
— лог  
— вершины углов поворота

Рис. 3. TIN-модель рельефа участка местности

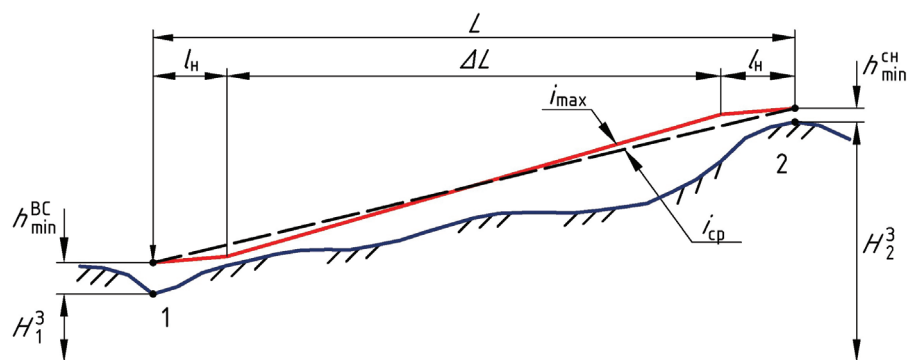


Рис. 4. Определение параметров условий применения расчетных схем

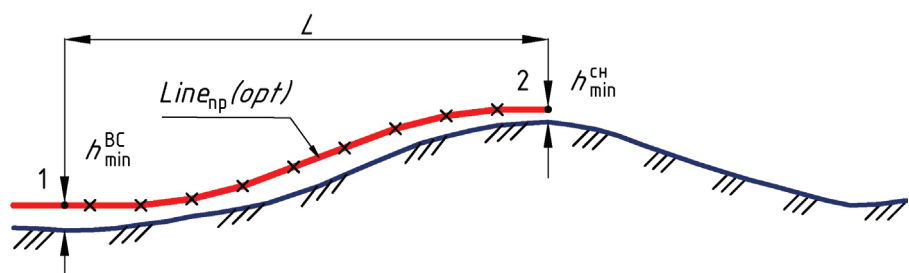


Рис. 5. Расчетная схема продольного профиля № 1

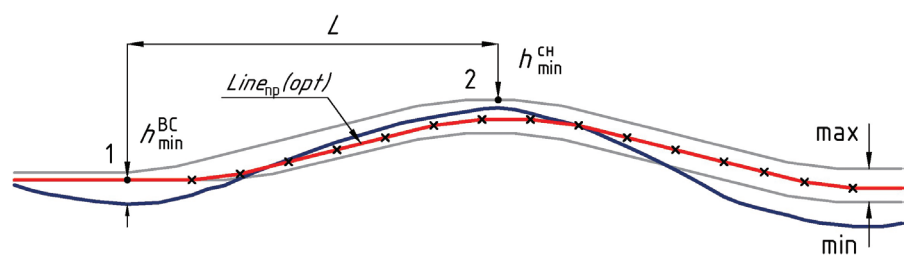


Рис. 6. Расчетная схема продольного профиля № 2

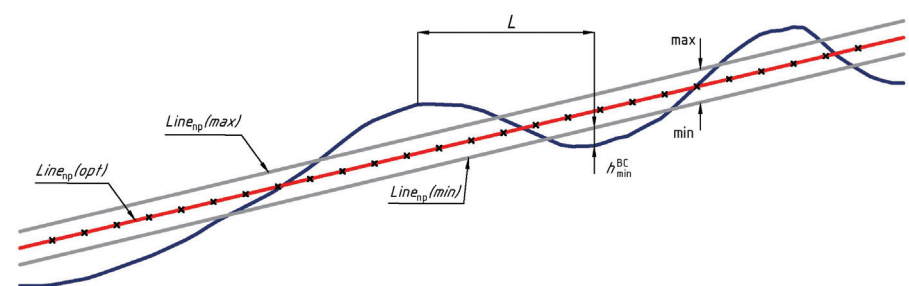


Рис. 7. Расчетная схема продольного профиля № 3

Оптимальная проектная линия при использовании второй расчетной схемы определяется аппроксимацией продольного профиля земли с обеспечением норм проектирования и минимальной строительной стоимости.

Расчетная схема № 3 (рис. 7) применяется при следующих условиях:

$$i_{\max} > i_{\text{тр}}, \\ \Delta L < l_{\text{н}}.$$

Нижняя и верхняя границы коридора варьирования будут устанавливаться соответственно с учетом минимальной и максимальной допускаемых высот насыпи в логу. Оптимальная проектная линия находится аппроксимацией про-

дольного профиля земли с обеспечением норм проектирования и минимальной строительной стоимости, но с уклонами одного знака.

В ходе проведения вычислительного эксперимента для различных участков местности с пересеченным рельефом формируется множество допустимых проектных решений по плану и продольному профилю трассы железной дороги [22, 24], которое послужит основой базы знаний для разработки технологических моделей и методов оптимального трассирования на участках со сложными рельефными условиями.

## Заключение

Одной из основных задач, проводимых на кафедре «Изыскания и проектирование железных дорог» ПГУПС научных исследований по совершенствованию математических моделей и методов оптимального трассирования, является создание математического и программного обеспечения новой технологии автоматизированного проектирования железных дорог, использование которой повысит качество проектных решений и существенно сократит затраты времени на их разработку на основе применения методов интеллектуального анализа данных, оптимизации и трехмерного параметрического моделирования.

Т

## Источники

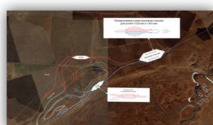
1. Воронин М. И. К истории изысканий и проектирования Петербурго-Московской железной дороги // Сборник Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта. М.: Трансжелдориздат, 1960. Вып. 143. С. 3–82.
2. Штукенберг Л. А. Производство железнодорожных изысканий. 2-е изд. СПб., 1904.
3. Изыскания и проектирование железных дорог. В 2 т. / А. В. Горинов, И. И. Кантор, А. П. Кондратченко, И. В. Турбин. М.: Транспорт, 1979. Т. 1. 320 с.
4. Изыскания и проектирование железных дорог / В. А. Копыленко. М.: УМЦ ЖДТ, 2021. 690 с.
5. Ляховский В. Н., Михалевич В. С., Быков В. И. Определение на ЭВМ наивыгоднейшего положения красной линии продольного профиля на вольном ходу // Транспортное строительство. 1962. Т. 4. С. 41–43.
6. Аккерман Г. Л. Выбор оптимальной трассы в намеченной полосе варьирования с помощью ЭЦВМ // Труды МИИТа. Совершенствование методов проектирования железных дорог с применением электронных цифровых вычислительных машин. 1964. Вып. 181. С. 43–61.
7. Полосин Ю. К. Методы оптимального проектирования трассы железных дорог. Л., 1965. 171 с.
8. Турбин И. В. Оптимизация проектной линии продольного профиля на основе численного решения вариационной задачи // Транспортное строительство. 1970. № 4. С. 9–11.
9. Струченков В. И., Баранов М. А., Рабинович В. С. Использование математи-

- ческих методов оптимизации и ЭВМ при проектировании продольного профиля железных дорог / под ред. Б. К. Малявского. М.: Транспорт, 1977. Вып. 101. 169 с. (Серия: Труды Всесоюзного научно-исследовательского института транспортного строительства).
10. Турбин И. В. Основы системы машинного трассирования на кособорных участках напряженного хода // Труды МИИТа. Вопросы повышения качества и эффективности проектных решений железных дорог. 1978. Вып. 614. С. 21–25.
  11. Анисимов В. А. Трассирование на участках напряженных ходов с применением математических методов // Труды МИИТ. 1980. Вып. 668. С. 135–157.
  12. Струченков В. И. Основы теории и методы оптимизации трасс железных дорог и других линейных объектов: дис. ... д-ра техн. наук. М.: ВНИИ трансп. стр-ва, 1985. 405 с.
  13. Шейдвассер Д. М. Оптимизация трасс железных дорог на напряженных ходах // Автоматизация проектирования объектов транспортного строительства. М.: Транспорт, 1986. С. 16–29.
  14. Струченков В. И. Методы оптимизации трасс в САПР линейных сооружений. М.: СОЛОН-Пресс, 2013. 272 с.
  15. Понарин А. С. Сплайновые математические модели в трассировании железных дорог. Екатеринбург: Диамант, 1996. 229 с.
  16. Карпов Д. А., Струченков В. И. Двухэтапная сплайн-аппроксимация в компьютерном проектировании трасс линейных сооружений // Российский технологический журнал. 2021. Т. 9. № 5. С. 45–56.
  17. Бучкин В. Программные разработки компании Real Geo Project // САПР и графика. 2008. № 9. С. 42–44.
  18. Богданов А. И. Общая модель плана и профиля для автоматизированного проектирования новых и реконструируемых железных дорог // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. Т. 63. № 3. С. 142–148.
  19. Bogdanov A. I. General model and method of computer-aided design of the plan and profile of new and reconstructed railways // Scientific research of the SCO countries: synergy and integration. Proceedings of the International Conference. Beijing, 2024. P. 194–206.
  20. Казарина В. В., Подвербный В. А. Принятие решения по выбору варианта трассы железнодорожной линии // Мир транспорта. 2019. Т. 17. № 3 (82). С. 140–151.
  21. Анисимов В. А., Булакаева О. С., Шкурников С. В. Функциональная модель системы автоматизированного проектирования железных дорог в информационно-цифровой среде // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. Вып. 4. С. 117–130.
  22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025610833 Российская Федерация. Программа формирования множества вариантов трассы железной дороги на участках с пересеченным рельефом местности / Р. Д. Пренинг, Р. В. Виноградов, А. Ш. Баткаева, А. М. Лазарева. Заявл. 28.12.2024, опубл. 14.01.2025. EDN: TRFEEI.
  23. Пренинг Р. Д., Виноградов Р. В., Баткаева А. Ш., Лазарева А. М. О совершенствовании математических моделей и методов трассирования участков железных дорог в условиях пересеченной местности // Вестник транспорта Поволжья. 2025. № 1 (109). С. 128–135.
  24. Анисимов В. А., Пренинг Р. Д., Ильин Н. Ю., Стрехнин Г. А. Формирование множества вариантов допустимых проектных решений при трассировании железной дороги в условиях пересеченного рельефа местности // Бюллетень результатов научных исследований. 2025. Вып. 3. С. 149–158.



## Общероссийская общественная организация РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ ТРАНСПОРТА

### Основные направления деятельности



**Разработка концепций, технико-экономических обоснований строительства объектов транспортной инфраструктуры**



**Проведение комплексных научно-исследовательских работ**



**Научно-техническая, экспертная и методическая поддержка проектов строительства и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры**



**Разработка предложений по повышению перерабатывающей способности станций, разработка имитационной модели**



**Разработка нормативно-технических документов и научно-технических обоснований (СП, ГОСТ, НТО, СТО)**



**Разработка комплексных схем организации улично-дорожной сети**



**Разработка схем транспортного планирования и комплексных планов развития транспортной инфраструктуры регионов**