# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ МЕТОДОМ ОПТИМИЗАЦИИ

В системе КРЕДО ДОРОГИ продольный профиль можно запроектировать с помощью интерактивного конструирования либо автоматизированным созданием проектной линии – оптимизацией, либо комбинируя эти возможности.

**Интерактивное конструирование** подразумевает непосредственное участие проектировщика на всем протяжении процесса проектирования продольного профиля и включает создание, редактирование, сопряжение геометрических элементов, которые и образуют проектную линию.

Оптимизация позволяет получить наилучший вариант продольного профиля с максимальной автоматизацией процесса проектирования. По сути этот метод выполняет подбор оптимального положения проектной линии относительно заданного эскиза и с соблюдением критериев, которые определил пользователь. Поэтому прежде чем начать оптимизацию, проектировщик должен выполнить ряд действий: создать эскиз профиля (линию руководящих отметок (ЛРО) или эскизную линию (ЭЛ)); создать контрольные точки (КТ); определиться с ограничениями, налагаемыми на профиль. В каждом из этих действий предусмотрены рычаги влияния на конечный результат оптимизации. О них подробнее будет сказано ниже, с демонстрацией конкретных примеров.

Сразу остановимся на самом процессе оптимизации.

## ОПТИМИЗАЦИЯ. ОПИСАНИЕ ОСНОВНЫХ ПРОЦЕССОВ

Поиск наилучшего решения в процессе оптимизации основан на принципах динамического программирования. Это позволяет за короткий промежуток времени просчитать огромное количество возможных вариантов профиля, постепенно, с определенным шагом, добиваясь максимального приближения к эскизной линии и оптимального сочетания требуемых параметров профиля. Очевидно, что получить такой же или хотя бы близкий вариант проектной линии, используя интерактивные методы создания и редактирования элементов, довольно трудоемко.

В системе CREDO ДОРОГИ представлены два метода оптимизации: Экспресс-Оптимизация и Сплайн-Оптимизация. Применение того или иного метода зависит от решаемых задач на различных стадиях разработки проекта.

### ЭКСПРЕСС-ОПТИМИЗАЦИЯ

Главным преимуществом метода Экспресс-Оптимизация является быстрота, с которой система определяет положение проектной линии с минимальным отклонением от эскиза и с учетом всех требований и ограничений. В результате работы этого метода создается продольный профиль в виде непрерывной цепочки коротких отрезков прямых и параболических кривых с гладкостью сопряжения G<sup>1</sup> (рис. 1).



Рис. 1. Проектный профиль получен методом Экспресс-Оптимизация

**На заметку** Гладкость  $G^{l}$  подразумевает наличие общих касательных в точках стыковки сопрягаемых элементов.

Гладкость  $G^{I}$  обеспечивает непрерывность изменения только уклонов проектной линии продольного профиля (далее *проектного профиля* или *ПП*). При этом кривизна элементов в точках их сопряжения, как правило, изменяется скачкообразно.

Для уменьшения числа таких точек служит параметр  $\pm \Delta G^1$  (*допустимое отклонение от*  $G^1$ -гладкого проектного профиля) в окне параметров команды Экспресс-Оптимизации. Параметр  $\pm \Delta G^1$  позволяет программе применять более длинные прямые или квадратичные кривые в тех случаях, когда это не ведет к существенным отклонениям от решения с наилучшим приближением проектного профиля к эскизной линии.

Экспресс-оптимизацию рекомендуется использовать для решения следующих задач:

- ✓ предварительное определение оптимального положения проектного профиля,
- ✓ проверка самой возможности выполнить все заданные ограничения,
- ✓ предварительный анализ и оценка объемов работ, необходимых для ремонта или строительства дороги.

Недостатками метода Экспресс-Оптимизация можно считать несоблюдение формальных требований к длинам вертикальных кривых, а также меньшую (по сравнению с результатом работы метода Сплайн-Оптимизация) геометрическую плавность проектной линии, которая обусловлена гладкостью сопряжения G<sup>1</sup>.

**На заметку** Степень соблюдения формальных требований к минимальным длинам кривых G<sup>1</sup>-гладкой проектной линии зависит от заданных ограничений, а также от качества обоснования и предварительной проработки пользователем очертаний эскизной линии.

#### СПЛАЙН-ОПТИМИЗАЦИЯ

Данный метод, как правило, работает дольше, чем Экспресс-Оптимизация. Это связано с затратами времени на поиск оптимального решения, которое обеспечивает высокую геометрическую плавность проектной линии и, как следствие, эксплуатационную ровность покрытия.

В результате работы метода Сплайн-Оптимизация продольный профиль создается в виде непрерывной цепочки G<sup>2</sup>–гладкосопряженных *V\_Spline* (рис. 2).



Рис. 2. Проектный профиль получен методом Сплайн-Оптимизация

**На заметку** V\_Spline (вариационный сплайн, англ: variational spline) представляет собой плоскую параметрическую бикубическую  $G^2$ -гладкую кривую, которая при заданных отметках, уклонах и кривизне в ограничивающих ее точках позволяет оптимизировать закономерность кривизны и координат по критерию близости к множеству ( $n \ge 0$ ) заданных точек с учетом ограничений.

На заметку Перечень ограничений, которые учитываются в методе Сплайн-Оптимизация:

а) максимальные абсолютные значения положительной и отрицательной кривизны;

б) максимальные абсолютные значения уклонов касательных;

в) максимальные абсолютные значения отклонений от эскизной линии;

г) минимальные значения плавности.

**На заметку** Гладкость  $G^2$  подразумевает общие касательные и одинаковые радиусы кривизны в точках стыковки сопрягаемых элементов.

Работа метода Сплайн-Оптимизация выполняется в две стадии: сразу определяется исходное положение проектной линии, так называемое начальное приближение, затем просчитываются варианты (итерации) с учетом всех заданных параметров. Процесс оптимизации завершается программно, когда изменения проектной линии между смежными итерациями практически отсутствуют.

Сплайн-Оптимизация может быть завершена и принудительно, по усмотрению пользователя (кнопка

**Прервать** (2)). В таком случае тоже создается проектный профиль. Его можно принять как окончательный вариант или использовать в качестве начального приближения и продолжить его оптимизацию при последующем запуске метода Сплайн-Оптимизация.

В качестве начального приближения можно также использовать проектный профиль, полученный методом Экспресс-Оптимизация либо другими командами создания профиля.

В любом случае начальное приближение должно отвечать следующим требованиям:

- непрерывность на всем участке оптимизации,
- G<sup>1</sup>-гладкость сопряжения всех элементов профиля, т.е. отсутствие изломов,
- соответствие всем геометрическим ограничениям,
- конструктивная согласованность с эскизной линией (заданный характер приближения к эскизной линии),
- согласованность по отметкам с контрольными точками.

Если нет надлежащей проектной линии в качестве начального приближения, то метод Сплайн-Оптимизация определит ее, выполняя расчеты по аналогии с методом Экспресс-Оптимизация.

Скорость метода Сплайн-Оптимизация напрямую зависит от значений параметров, при помощи которых пользователь может влиять на длины вертикальных кривых, на степень плавности проектной линии и степень ее приближения к эскизной линии.

Плавность продольного профиля зависит от параметра **Условный критерий плавности**. Он оказывает непосредственное влияние на график кривизны проектной линии, а также может воздействовать на длины выпуклых и вогнутых кривых (рис. 3).



Рис. 3. Изменение кривизны и длин выпуклых и вогнутых сегментов кривых в зависимости от заданного значения Условного критерия плавности

Критерий плавности обусловливает <u>скорость комфортного движения</u>, и метод Сплайн-Оптимизация стремится соблюсти его.

Для того чтобы управлять длинами кривых проектного профиля, в методе Сплайн-Оптимизация предусмотрен настраиваемый параметр Количество сплайнов. Данный параметр определяет, каким числом сплайнов будет образована линия проектного профиля.

Минимальное количество сплайнов равно трём, а максимальное определяется программой из расчета, что длина каждого сплайна должна быть не меньше 100 метров либо, в случае короткого интервала оптимизации (менее 300 м), длина каждого сплайна определяется из условия минимального их количества.

Следует заметить, что уменьшение количества сплайнов может привести к ускорению самого процесса оптимизации, но при этом увеличатся отклонения проектного профиля от эскизной линии. Очевидно, что короткими фрагментами сплайнов с различным направлением кривизны можно лучше приблизиться к ЭЛ, а длинные участки непрерывно выпуклых или вогнутых кривых такую гибкость утрачивают.

Увеличение длин кривых целесообразно для нового строительства или при устройстве новой дорожной одежды на участках реконструкции, а в случае ремонта покрытия такие действия неизбежно приведут к существенному увеличению объемов выравнивающих материалов.

Для максимального приближения к эскизной линии, дающего, как следствие, самые минимальные строительные и эксплуатационные затраты, значение параметра **Количество сплайнов** должно быть наибольшим.

В результате оптимизации могут получиться относительно короткие участки кривых, длины которых не соответствуют формальным требованиям к длинам кривых проектного профиля. Но при этом для заданной расчетной скорости может обеспечиваться видимость в профиле, а значит, и безопасность движения, поскольку соблюдаются требуемые радиусы вертикальных кривых и эти кривые гладко сопряжены.

Ниже показан пример сравнения продольных профилей с разным количеством (разными длинами) сплайнов (рис. 4).



Рис. 4. Варианты проектных профилей при различных значениях параметра Количество сплайнов

Следует сказать ещё об одном параметре, который влияет на скорость работы метода Сплайн-Оптимизация. Это параметр  $\pm \Delta \Im J$ , см (*допустимое отклонение от эскизной линии*).

Учет данного параметра в процессе сплайн-оптимизации временно исключает *избыточные точки* на линии эскиза (ЭЛ или ЛРО) из оценки соблюдения критериев оптимизации. *Избыточными* в данном случае считаются те точки, которые отстоят от прямой линии, соединяющей смежные точки эскиза (ЭЛ или ЛРО), на меньшую величину, чем задана через параметр ±∆ЭЛ.

В подавляющем числе случаев применение параметра  $\pm \Delta \Im I$  позволяет существенно ускорить процесс оптимизации без ущерба его качеству. Использование этого параметра особенно актуально при проектировании по данным лазерного сканирования.

Параметр ±∆ЭЛ может быть задан и отредактирован на отдельных участках дороги (графа Генерализация эскизной линии сетки Оптимизация профиля).

О работе метода Сплайн-Оптимизация можно судить по характеру изменений "объемов" при помощи динамического графика Тренд объемов.

**На заметку** "Объем" – условная величина, численное значение которой определяется как площадь фигуры, ограниченной линией проектного профиля и линией эскиза (ЭЛ или ЛРО).

Анализируя изменения графика и отображения проектной линии в окне Продольный профиль, можно принять решение о завершении оптимизации, если эти изменения незначительны, и получить при этом качественный результат. Весь вопрос заключается только в степени приближения полученного профиля к эскизной линии. Если этот вопрос является первостепенным, как при ремонте, то логично дождаться программного завершения процесса оптимизации. А при проектировании нового строительства можно сэкономить время и завершить оптимизацию принудительно.

### ЭСКИЗНАЯ ЛИНИЯ

Наличие в проекте эскизной линии или ЛРО является обязательным условием для запуска любого из методов оптимизации.

Из двух линий: ЛРО и ЭЛ, система выбирает для оптимизации эскизную линию. Если ЭЛ отсутствует, то будет выполнятся оптимизация ЛРО.

В параметрах оптимизации задается условие приближения проектного профиля к ЭЛ или ЛРО: произвольно, не выше, не ниже.

ЭЛ или ЛРО служит прототипом проектного профиля, поэтому геометрия этой линии оказывает непосредственное влияние на результат оптимизации.

Например, если на участке пересеченной местности назначить эскизную линию на определенной высоте от черного профиля и при этом полностью сохранить его очертание (команда Эскизная линия/ По смещению), то в результате оптимизации можно получить проектный профиль, состоящий из коротких сегментов вогнутых и выпуклых кривых, которые будут повторять конфигурацию черного профиля по обертывающей линии. Очевидно, что в условиях нового строительства такой подход к проектированию продольного профиля неприемлем.

Задача проектировщика на этом этапе – продумать концепцию будущего профиля и передать ее в эскизной линии, используя свой творческий потенциал, опыт работы и широкие функциональные возможности системы ДОРОГИ.

Создать ЭЛ можно различными способами, при этом необязательно соблюдать нормативные требования, предъявляемые к продольному профилю, т.е эскизная линия может иметь любые уклоны, радиусы кривизны и переломы на стыке элементов.

Обязательным для ЭЛ является лишь одно условие – на каждом участке оптимизации она должна быть сплошной, т.е. без разрывов, как горизонтальных, так и вертикальных.

При ремонте покрытия в качестве эскиза чаще всего используется линия руководящих отметок (ЛРО), создание которой в системе ДОРОГИ полностью автоматизировано. Если требуется учесть дополнительные условия, то можно создать эскизную линию как отредактированный вариант ЛРО.

Основные команды по созданию и редактированию ЭЛ сосредоточены в меню Оси активного проекта Профили.

ЭЛ может быть создана следующими способами:

- По линии руководящих отметок (командаЭскизная линия/На полилинии).
- Используя стандартные команды создания профилей (команды По существующим элементам, С созданием элементов, Сплайнами по точкам, По смещению).
- По эскизу, который создается между смежными контрольным точкам (настройки в параметрах контрольной точки *Эскиз = Создать* и *Сохранить как ЭЛ*).
- Комбинированием методов, перечисленных выше.

Ниже остановимся подробнее на отдельных способах создания эскизной линии.

#### ЛИНИЯ РУКОВОДЯЩИХ ОТМЕТОК

ЛРО создается автоматически по рабочим отметкам от черного профиля, которые рассчитываются на заданных поперечниках по условиям нового сторительства или ремонта.

При <u>новом строительстве</u> или устройстве <u>новой дорожной одежды</u> на участках реконструкции определяется максимальная рабочая отметка по следующим критериям:

- высота насыпи, незаносимой снегом;
- возвышение покрытия над расчетным уровнем грунтовых вод (РУГВ) или уровнем стоящих поверхностных вод (УСПВ) (на участках трассы, где определен II или III тип местности по увлажнению);
- возвышение покрытия над расчетным горизонтом воды (РГВ) у водоемов и искусственных водопропускных сооружений и на подходах к ним.

Параметры для расчета отметок ЛРО задаются в графах сетки Дополнительные условия.

**На заметку** При наличии данных для расчета по трем критериям из трех рабочих отметок для ЛРО выбирается максимальное значение в каждой расчетной точке.

При <u>ремонте</u> рабочие отметки определяются из условия минимизации объемов выравнивающих материалов на каждом расчетном поперечнике, т.е. соблюдение проектных поперечных уклонов покрытия с учетом слоев усиления, без фрезерования существующего покрытия.

Для расчета отметок необходимо:

- В плане закодировать существующее покрытие, которое подлежит ремонту.
- В профиле:
  - создать черный профиль;
  - назначить соответствие между покрытием и закодированными в плане участками;
  - задать параметры проектного покрытия: ширины и уклоны с учетом устройства виражей;
  - создать интервал ремонта и назначить для него требуемую ширину перекрытия существующего и проектного покрытий и слои усиления;
  - рассчитать изменение ширины проектного покрытия, если требуется сохранить ширину существующего покрытия, расширив вместе с тем проектное покрытие;
  - при устройстве уширений существующего покрытия задать ширину подломки кромок.

Расчет рабочих отметок выполняется при помощи кнопки Создать точки по параметрам in на локальной панели инструментов в окне параметров графы Рабочие отметки от Черного профиля (сетка Линия руководящих отметок). Эту же операцию можно сделать при помощи команды Оси/ Данные от Линии руководящих отметок/ Рабочие отметки от Черного профиля в сетке ЛРО.

Перед расчетом отметок можно изменить значение параметра *Max расстояние*, который регулирует наибольшее допустимое расстояние между расчетными точками. Например, при ремонте этот параметр принимают равным **1** м для более точного соблюдения условий поперечного выравнивания.

После определения рабочих отметок, можно создать ЛРО. Она строится в виде ломаной линии, соеди-

няющей расчетные точки (кнопка Создать линию руководящих отметок инструментов команды Рабочие отметки от Черного профиля или команда Оси/ Линия руководящих отметок/ Рассчитать).

На заметку Чтобы выполнить создание ЛРО по рабочим отметкам, необходима настройка Пересоздавать на заданном интервале или по всей длине профиля (графа Интервалы пересоздания Эскизной линии в сетке Оптимизация профиля).

Если на момент запуска команд построения ЛРО рабочие отметки от ЧП не рассчитаны, то этот процесс запускается автоматически. Отметки определяются с учетом данных в условиях ремонта или нового строительства, которые перечислены выше, и параметров создания отметок.

#### СОЗДАНИЕ ЭСКИЗНОЙ ЛИНИИ ПО ЛРО

Для создания эскизной линии по ЛРО можно использовать команду Эскизная линия/ На полилинии: двойным щелчком курсора выбирается предварительно созданная ЛРО и применяется построение. При <u>ремонте</u> покрытия такой подход является обоснованным. Ведь главная задача в этом случае – добиться минимальных объемов выравнивания.

При <u>новом строительстве</u> линия руководящих отметок может служить только ориентиром, дополнительно должны учитываться отметки над водопропускными трубами, мостами, путепроводами, в местах примыканий и пересечений и пр.

В этом случае получить ЭЛ можно при помощи стандартных команд создания профилей C созданием элементов и Сплайнами по точкам.

**На заметку** Обратите внимание на команду **Сплайнами по точкам**, т.к. зачастую оптимизация такой ЭЛ позволяет получить вертикальные кривые достаточно большой длины.

#### СОЗДАНИЕ ЭЛ ПО ЭСКИЗУ

В системе ДОРОГИ реализован метод создания эскизной линии в виде тангенциального хода (ТХ). В вершины углов ТХ автоматически вписываются биквадратичные параболические кривые с гладкостью сопряжения G<sup>1</sup> (рис. 5).



Рис. 5. Эскиз. Редактирование через вершины углов в окне Продольный профиль

Порядок создания ЭЛ данным методом:

- 1. Вызвать команду главного меню Оси/ Параметры оптимизации/Контрольные точки;
- 2. Создать контрольные точки (КТ) в начале и в конце участка оптимизации или трассы.

На заметку Контрольные точки будут созданы автоматически при запуске команд Экспресс-Оптимизация и Сплайн-Оптимизация, если КТ не были созданы до применения этих команд.

- 3. Выбрать в окне параметров команду Редактировать элемент;
- 4. Выбрать контрольную точку в начале участка (по ходу пикетажа), на котором необходимо создать ЭЛ;
- 5. В группе параметров Эскиз установить параметр *Создать* = *Да* и уточнить количество ВУ.

В результате в окне **Продольный профиль** между двумя смежными контрольными точками создается непрерывная линия, форма которой учитывает уклоны и отметки в КТ, т.е. начало и конец данной линии зафиксированы и полностью совпадают с параметрами контрольных точек (рис. 5).

 Эскиз можно редактировать интерактивно, захватывая, добавляя и изменяя положения вершин углов в окне Продольный профиль (рис. 5) или изменяя значения настроек в окне параметров (рис. 6).

□ -*   <mark>-</mark> *   <del>•</del> X <i>o</i> X   <b>′</b> <u>+</u>   ⊠ <sup>1</sup>		
– Контрольная точка		
Отметка, м	113,82	
ПК	ΠK 0 + 0,00 0	
Рабочая от Черного профиля, м	0,13	
Рабочая от Эскизной линии, м	0,00	
Уклон, о/оо	-9,1	
Разность уклона с Эскизной л	0,0	
По кривизне	Не ограничивать	
Хранится в слое	Контрольные точки	
- Эскиз		
Создать	Да	
Количество ВУ	2	
Эскиз	Сохранить как ЭЛ	
Актуализировать	Да	
<ul> <li>Текущая Эскизная линия</li> </ul>		
🗖 Параметры ВУ		
ПК	ΠK 3 + 7,30 0	
Отметка Н, м	114,70	
Тангенс Т1, м	60,00	
Уклон I1, о/оо	8,6	
Тангенс Т2, м	100,00	
Уклон I2, o/oo	2,6	
R min, м	12034,77	
Длина L, м	160,00	
<ul> <li>Предыдущая ВУ</li> </ul>		
<ul> <li>Следующая ВУ</li> </ul>		
Перемещение ВУ		
Способ	Произвольно 💌	
Смещение по вертикали, м	Вертикально	
Смещение по горизонтали, м	Горизонтально	
	Произвольно	
	По тангенсу Т2	
	Удалить	

Рис. 6. Редактирование параметров эскиза

- В режиме курсора Указание точки + <*Alt+1>* можно создать новую вершину угла, в которую будет вписано закругление.
- В режиме курсора Захват точки ⊕ <Alt+2> можно:
- ✓ переместить существующие ВУ;
- ✓ изменить длину тангенсов закруглений, вписанных в ВУ;
- ✓ отредактировать параметры (местоположение и уклон) контрольной точки.
- Способ перемещения ВУ настраивается в окне параметров (рис. 6).
- При выборе значение параметра Эскиз = Сохранить, эскиз сохраняется и будет в дальнейшем доступен для редактирования.

С эскизом можно продолжить работу при вызове команды Оси/ Параметры оптимизации/ Контрольные точки, после захвата КТ в начале участка оптимизации.

- Созданную линию можно сохранить в качестве ЭЛ, установив значение параметра **Эскиз** = *Сохранить как ЭЛ* (рис. 6).

#### РЕДАКТИРОВАНИЕ ЭСКИЗНОЙ ЛИНИИ

Эскизую линию, созданную любым способом, можно редактировать всеми доступными командами редактирования продольных профилей, добиваясь более гладкого очертания ЭЛ.

Пример зависимости результата оптимизации от очертания эскизной линии показан на рис. 7.



Рис. 7. Влияние формы ЭЛ на результат оптимизации

Редактирование может понадобиться на участках ЭЛ с частыми изломами и большими перепадами высот, а также на затяжных подъемах или спусках с постоянным (или близким к таковому) уклоном.

На заметку Отметим, что интерактивное редактирование ЭЛ, которая была создана на полилинии ЛРО, может нарушить условия расчета руководящих отметок. Например, на участках ремонта может появиться фрезерование существующего покрытия, хотя изначально, при расчете ЛРО, такой вид работ исключается. Это же замечание справедливо при использовании параметра ±ДЭЛ (допустимое отклонение от эскизной линии).

## КОНТРОЛЬНЫЕ ТОЧКИ

Контрольные точки – особый тип точек, характерный только для проекта профилей. Они используются при создании продольного профиля по оси дороги методами Экспресс-Оптимизация и Сплайн-Оптимизация.

Предусмотрено автоматизированное (при запуске команд Оси/ Проектный профиль/ Экспресс-Оптимизация и Сплайн-Оптимизация) и интерактивное создание КТ (команда Оси/ Параметры оптимизации/ Контрольные точки).

<u>Автоматически</u> КТ создаются только по границам участков оптимизации (длина участка должна быть не менее 100 м). Отметка и уклон КТ определяются по ЭЛ или ЛРО. При этом контролируются значения уклонов КТ: если уклон ЭЛ или ЛРО в данной точке больше заданного максимально допустимого значения, то для контрольной точки принимается заданный уклон.

<u>Интерактивно</u> КТ можно создавать с любыми отметками и уклонами (в разрешенном диапазоне) и на любом расстоянии друг от друга.

Но не следует создавать КТ часто, только для того, чтобы закрепить высотное положение будущего профиля без обязательного соблюдения уклонов в этих точках. Многократное использование КТ мешает выполнению оптимизации, т.к. накладывает жесткие ограничения на профиль в каждой КТ.

При необходимости зафиксировать высотное положение профиля рекомендуется использовать следующие возможности:

- ✓ создание ЭЛ по точкам с заданными отметками или по ЛРО (при ремонте покрытия);
- ✓ увеличение значения коэффициента весомости на выделенном участке, где требуется максимально возможное приближение к ЭЛ;
- ✓ использование настроек для приближения к эскизной линии **Не выше** или **Не ниже**.

В общем случае КТ состоит из элементов, которые определяют высотное положение (точка привязки), уклон (линия и точки уклона) и кривизну (линия и точки кривизны) продольного профиля в этой точке (рис. 8).

Кривизну для КТ допускается не настраивать (по усмотрению пользователя), все остальные параметры обязательны и без них контрольная точка не может быть создана.



Рис. 8. Параметры КТ

Наличие контрольных точек в начале и в конце проектируемого профиля является необходимым условием для выполнения оптимизации. Если предполагается выполнить оптимизацию на нескольких участках по длине трассы, то КТ должны быть созданы по границам каждого из участков

Методы интерактивного создания и редактирования параметров КТ расположены на локальной панели окна параметров для команды Контрольные точки – кнопки Создать элемент по курсору • и Редак-

тировать элемент 🖄. Здесь же расположены команды удаления КТ.

Регулировать параметры КТ можно в графическом окне продольного профиля при помощи управляющих точек (точки привязки, уклона и кривизны (рис. 8)) и в окне параметров.

**На заметку** Доступность ввода и редактирования отдельных параметров КТ зависит от наличия Эскизной линии и Черного профиля.

Следует помнить, что при изменении параметров контрольных точек будет меняться и результат оптимизации, т. к. проектный профиль должен пройти строго через КТ с соблюдением заданных параметров.

## ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

Геометрические ограничения – характеристики, налагаемые на проектный профиль и непосредственно влияющие на итоговый результат оптимизации. Это минимальные радиусы выпуклых и вогнутых кривых, максимальные продольные уклоны, условия приближения проектной линии к ЭЛ (или ЛРО), допустимое отклонение от эскизной линии, коэффициенты весомости, условный критерий плавности. Они задаются в графах сетки Оптимизация профиля, а большинство характеристик продублировано через команды меню Оси/ Параметры оптимизации/ Геометрические ограничения.

Вариант ввода данных через графы сетки предпочтительнее, если требуется определить различные параметры на отдельных участках профиля, границы которых удобно определять захватом характерных точек в окнах План, Продольный профиль, Развернутый план и Сетки.

Обращайте внимание на то, чтобы геометрические ограничения не конфликтовали с параметрами контрольных точек.

Например, если максимальный уклон задан 30‰, то уклон КТ не может быть 35‰; если задано условие приближения *Не выше*, то отметка КТ не может быть выше отметки эскизной линии или ЛРО в этой точке и т.д. В случае несогласованности параметров об этом сообщается в протоколе при запуске оптимизации или при обновлении интервалов оптимизации.

Также следует обратить внимание на то, что при увеличении минимальных радиусов, увеличиваются и длины вертикальных кривых проектной линии. Но при этом снижается степень приближения проектного профиля к эскизной линии. В результате увеличиваются рабочие отметки и, как следствие, необходимые объемы работ для выполнения ремонта либо строительства.

Параметр Условия приближения к Эскизной линии служит для контроля характера приближения проектного профиля к эскизу (ЭЛ или ЛРО). Для него предусмотрены настройки *Произвольно, Не вы-ше, Не ниже.* По умолчанию выбрано значение *Произвольно*, т.е. приближение к эскизу возможно и сверху и снизу. Такая настройка снимает ограничение на взаимное расположение проектной и эскизной линий или ЛРО.

Тем самым обеспечивается максимальное сближение проектной и эскизной линий. Рекомендуется применять ее при первом запуске оптимизации, чтобы в полной мере оценить возможности процесса.

Высока вероятность, что настройки *Не выше*, *Не ниже* применять не понадобится вовсе или, как вариант, использовать их на отдельных интервалах профиля. Эти значения обеспечивают только отрицательное или только положительное отклонение проектной линии от ЭЛ или ЛРО.

ВНИМАНИЕ ! Использование параметра ±ΔЭЛ (*допустимое отклонение от эскизной линии*) может нарушить заданное условие *Не выше*, *Не ниже* в заданном диапазоне значений ±ΔЭЛ.

Параметр **Коэффициент весомости** позволяет задавать высотные ограничения для проектной линии, не прибегая к использованию контрольных точек. Для этого выделяются участки трассы, на которых значение коэффициента весомости назначается на несколько порядков выше, чем на смежных участках. Если же коэффициент весомости увеличен в равной степени по всей длине профиля, то это не будет иметь никакого эффекта. Например, на участках ремонта можно задавать значение коэффициента **1000**, а на участках нового строительства **1**.

Добавление параметра Условный критерий плавности обусловлено тем, что гибкость кубических VGV Spline, которая наилучшим образом слуцелям Сплайн-Оптимизации, жит может приводить к высокому темпу изменения кривизны dk/dl и, соответственно, к более высокой скорости изменения центробежных ускорений. Безусловно, это менее пагубно сказывается на удобстве и плавности движения автомобилей. чем скачкообразное изменение кривизны на дороге с гладкостью профиля G<sup>1</sup>. Но для гарантированного обеспечения плавности проектного профиля желательно исключать участки VGV Spline с высоким темпом изменения кривизны dk/dl.

Предельные значения этой характеристики задаются через параметр, который ассоциируется с низкой, средней, большой, очень большой, очень очень большой и т.д. плавностью. Поэтому возможные градации плавности обозначены символами *S*, *M*, *L*, *XL*, *2XL* ÷ 8*XL* (рис. 9).

– Графа сетки		
Проект сетки	Оптимизация про	
Графа	Условный критери	
– Выбранный интервал		
Выбор интервала	ПК 0+0,000 - ПК 5	
Начало интервала	ΠK 0 + 00,00 0	
Конец интервала	ΠK 5 + 48,00 0	
Длина интервала, м	548,00	
Условный критерий плавнос	ти S 💌	
<ul> <li>Интервал под курсором</li> </ul>	M	
	L	
	XL	
	2XL	
	3XL	
	4XL	
	5XL	
	6XL	
	7XL	
	8XI -	

Рис. 9. Выбор критерия плавности на интервале

Алгоритм *Сплайн-Оптимизации* расценивает несоблюдение требуемой плавности проектного профиля так же, как и несоблюдение минимальных радиусов кривизны или максимальных уклонов. Вместе с этим, по объективным законам геометрии, соблюдение плавности возможно далеко не всегда, в результате чего *Сплайн-Оптимизация* может завершаться преждевременно или с недостаточным приближением к функции цели по критерию минимума объёмов дополнительных работ. Поэтому к требуемой плавности ПП следует относится обоснованно, с пониманием сути возможных последствий.

В таблице приведены значения требуемой плавности для автомобильных дорог разных категорий, которые могут быть рекомендованы в качестве начальных (рис. 10).

Минимальная плавность *S* практически не окажет влияния на разницу результатов *Сплайн-Оптимизации* между её предыдущей и новой версиями, при условии что значение  $\pm \Delta \Im \Pi$  задано 0 см.

Вместе с этим значение комфортной скорости движения, которое мы видим по ходу выполнения *Сплайн-Оптимизации*, позволяет понять, соответствует ли плавность заданной категории дороги и надо ли её повышать.

На заметку Плавность выше 2XL может быть востребована при проектировании продольных профилей обычных, скоростных (СМ) и высокосортных рельсовых магистралей (ВСМ) или при проектировании продольных профилей автомобильных дорог высоких категорий в равнинной или слабопересечённой местности.

por pasinin	x Karciopin,
Категория	Требуемая
	плавность
v	S
IV	S-M
ш	M-L
П	L-XL
I	XL-2XL

Рис. 10. Категория дороги и плавность ПП

В зависимости от установленного значения, параметр **Условный критерий плавности** может приводить к увеличению минимальных радиусов вертикальных кривых, а также менять длины прямых и непрерывно вогнутых или выпуклых участков проектного профиля.

## РАСЧЕТ ЭКСПРЕСС-ОПТИМИЗАЦИИ

После подготовки исходных данных выполняется автоматизированный расчет проектной линии методом Экспресс-Оптимизация. Его можно запустить из проекта Профили (меню Оси/ Проектный профиль) или из проекта сетки Оптимизация профиля (меню Сетка оптимизации профиля).

При выборе метода оптимизации система выполняет проверку исходных данных:

- 🖌 если КТ нет, то они будут созданы автоматически;
- ✓ если требования к созданию ЭЛ (ЛРО) или КТ нарушены или вступают в противоречие с геометрическими ограничениями хотя бы на одном из интервалов оптимизации, то на экране появляется Протокол создания интервалов оптимизации с указанием состояния интервалов (Выбран или Нельзя выбрать) и причин, по которым оптимизация не может быть запущена.

В окне параметров метода Экспресс-Оптимизация (рис. 11) в поле параметра Выбор участка можно выбрать следующий интервал (если их несколько), на котором будет выполняться оптимизация. В этот список попадают интервалы только в состоянии *Выбран*.

Выбор участка	ΠΚ 0+00,00 0-ΠΚ 5+	
±∆ G1, cм	3,0	
ритерии оптимизации		
Геометрические ограничения	0,00000E+00	
Конструктивные ограничения	0,00000E+00	
Общий "объем"	2,78429E+00	
Динамика изменения "объемов", %	-2,22045E-14	
Іараметры варьирования		
% начального приближения	100	

Рис. 11. Окно параметров метода Экспресс-Оптимизация

Можно изменить значение для параметра  $\pm \Delta G1$ , см (*допустимое отклонение от G<sup>1</sup>-гладкого проектного профиля*) в диапазоне от 1 до 10 см (рис. 11).

Напомним, что параметр  $\pm \Delta G1$ , см позволяет программе применять более длинные прямые или квадратичные кривые, если при этом соблюдается заданное допустимое отклонение от решения с наилучшим приближением проектного профиля к эскизной линии.

При корректных исходных данных расчет запускается кнопкой Выполнить оптимизацию 🖄

В процессе оптимизации создаваемая линия проектного профиля отображается в окне **Продольный профиль**, для которого возможно применение команд визуализации (панорамирование и масштабирование). Изменение различных характерных величин процесса оптимизации можно видеть в окне параметров команды (рис. 11).

Группа параметров Критерии оптимизации:

- **Геометрические отклонения** данный параметр указывает на соблюдение заданных радиусов вертикальных кривых и максимально допустимых уклонов.
- Конструктивные ограничения данный параметр указывает на соблюдение заданных условий приближения проектной линии к ЭЛ или ЛРО.
- Общий «объем» условная величина, которая характеризует степень приближения (совпадения) проектной и эскизной линий.
- Динамика изменение «объемов» параметр отображает состояние отклонений на текущий момент оптимизации.

Группа Параметры варьирования:

– % начального приближения – отображается процент выполнения начального приближения.

По окончании оптимизации можно задать свойства созданного профиля и, при необходимости, выбрать настройки сохранения проектной линии, которая была до оптимизации.

## РАСЧЕТ СПЛАЙН-ОПТИМИЗАЦИИ

Подготовка исходных данных для Сплайн-Оптимизации во многом идентична Экспресс-Оптимизации. Но есть и отличия:

- в качестве начального приближения можно выполнить экспресс-оптимизацию (настройка *Pac-считать*) или выбрать существующий проектный профиль;

На заметку Требования к такому профилю изложены выше в разделе «Сплайн-Оптимизация».

 в процессе сплайн-оптимизации будут дополнительно учитываться параметры Условный критерий плавности и ±ΔЭЛ (допустимое отклонение от эскизной линии), а также заданное количество сплайнов.

**На заметку** Описание дополнительных параметров дано выше в разделах «Сплайн-Оптимизация» и «Геометрические ограничения».

Процесс автоматизированного создания проектной линии запускается при помощи команды Сплайн-Оптимизация, которую можно вызвать из проекта Профили (меню Оси /Проектный профиль) или из проекта сетки Оптимизация профиля.

Последовательность действий:

- 1. В графах сетки Оптимизация профиля уточнить дополнительные параметры, влияющие на окончательный результат оптимизации: Условный критерий плавности и ±ΔЭЛ (графа Генерализация эскизной линии).
- 2. Активизировать команду Сплайн-Оптимизация и уточнить настройки в окне параметров:
- выбрать участок, на котором будет выполняться оптимизация. Список интервалов в состоянии
   Выбран открывается в поле параметра Выбор участка;
- настроить параметр Начальное приближение;
- уточнить количество сплайнов.
- 3. Запустить расчет кнопкой Выполнить оптимизацию .

**На заметку** В процессе оптимизации создаваемая линия проектного профиля отображается в окне **Продольный профиль**, для которого возможно применение команд визуализации (панорамирование и масштабирование).

Изменение различных характеристик в процессе оптимизации можно видеть в окне параметров команды (рис. 12).

	0-00   ·
Параметры оптимизации	
Выбор участка	ΠK 0 + 00,00
Начальное приближение	Рассчитать
Количество сплайнов	3
Длина сплайна, м	182,67
Критерии оптимизации	
Геометрические ограничения	0,00000E+00
Конструктивные ограничения	0,00000E+00
Общий "объем"	1,20109E+01
Динамика изменения "объемов", %	1,23457E+00
Скорость комфортного движения V до	210
Параметры варьирования	
% начального приближения	100
% завершения	0
№ итерации	6

Рис. 12. Окно параметров метода Сплайн-Оптимизация

Дадим краткое описание параметров процесса (за исключением аналогичных параметров экспрессоптимизации, о которых было сказано выше).

Группа параметров Критерии оптимизации:

- Скорость комфортного движения V до – параметр отображает текущую скорость комфортного движения на данной итерации и характеризует плавность проектируемого профиля.

Группа параметров Параметры варьирования:

- % завершения – параметр отображает процент выполнения оптимизации.

- № итерации –количество итераций, которые программа выполнила на текущий момент.

Анализ графика Тренд объемов помогает принять обоснованное решение о принудительном завершении процесса оптимизации.

Ось ординат графика отображает общий «объем», а ось абсцисс – количество итераций (рис. 13).



Рис. 13. График «Тренд объемов»

Проектный профиль в точках итераций зеленого цвета удовлетворяет геометрическим ограничениям, а в точках красного цвета – нет (рис. 13).

По окончании оптимизации можно задать свойства созданного профиля и, при необходимости, выбрать настройки сохранения проектной линии, созданной ранее.

## АНАЛИЗ ПРОЕКТНОГО ПРОФИЛЯ

Первая оценка проектного решения должна выполняться уже на основе информации в окне параметров метода Оптимизация профиля после выполнения расчета.

Затем следует проверить, имеются ли участки с отклонениями от требований к проектной линии. Для этого служат команды Обновить интервалы несоответствия или Интервалы несоответствия (меню Оси/ Параметры оптимизации проекта Профили), а также аналогичная графа сетки Оптимизация профиля. Критерии, по которым участок профиля не соответствует ограничениям, можно увидеть в специальном протоколе.

Помимо сказанного выше, результаты проектного решения оцениваются визуально и на основе анализа данных граф Отметки, Вертикальная кривая, График кривизны профиля и График отклонения от норм сетки Проектный профиль (рис. 14).

**График отклонения от норм** показывает места, где встречается несоответствие заданным ограничениям по следующим параметрам:

- 1. Минимальные и максимальные уклоны.
- 2. Максимальные значения переломов элементов профиля.
- 3. Минимальные и максимальные рабочие отметки.
- 4. Минимальные радиусы и длины выпуклых и вогнутых кривых.
- 5. Минимальные длины прямых участков профиля.
- 6. Минимальное расстояние видимости поверхности дороги и встречного автомобиля.

**График кривизны** помогает выявить участки профиля с отклонением значений по минимальным радиусам выпуклых и вогнутых кривых, а также оценить плавность созданного проектного профиля. При оценке проектной линии продольного профиля рекомендуется использовать также различные измерения: уклон по линии, расстояние между точками, радиус и отметка в точке (команды меню **Размеры** проекта **Профили**).



Рис. 14. Графы сетки Проектный профиль