

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ -  
МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА

**О.Д. Рубин, Н.В. Ханов, С.Е. Лисичкин, А.С. Антонов**

**МНОГОФАКТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ  
СООРУЖЕНИЙ СО СРОКОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ БОЛЕЕ 25 ЛЕТ**

Расчеты НДС и устойчивости ГТС, оценка технического состояния.  
Рекомендации по обеспечению безопасной эксплуатации

Учебное пособие

Москва  
РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева  
2023

## Оглавление

Введение .....	4
1. Расчёты устойчивости грунтовых плотин .....	5
1.1 Методика расчётов устойчивости грунтовых плотин по программе «GROT» .....	5
1.2 Методика расчётов устойчивости грунтовых плотин по программе «SLIDE» .....	8
1.3 Методика расчётов устойчивости грунтовых плотин по программе «PLAXIS» .....	18
1.4 Критерии устойчивости откосов грунтовой плотины .....	21
1.5 Общие сведения о грунтовой плотине .....	22
1.6 Расчёты устойчивости откосов грунтовой плотины по программе «GROT» .....	28
1.7 Расчёты устойчивости откосов грунтовой плотины по программе «SLIDE» .....	38
1.8 Расчёты устойчивости откосов земляной плотины по программе «PLAXIS 2D» .....	54
1.9 Сравнение результатов расчетов устойчивости откосов грунтовой плотины по различным программам .....	68
1.10 Расчеты устойчивости откосов грунтовой плотины при наличии линзы деформируемых грунтов .....	69
Выводы .....	77
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	79
Список литературы .....	81
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....	82
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....	105

УДК 626/627

ББК 38.77

М 73

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой сельскохозяйственного строительства и экспертизы объектов недвижимости ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева П. А. Михеев; канд. техн. наук, зав. отделом гидротехники и гидравлики ФГБНУ «ВНИИГиМ им. А.Н.Костякова» А.О. Щербаков

**Рубин О.Д.** Многофакторные исследования гидротехнических сооружений со сроком эксплуатации более 25 лет. Расчеты НДС и устойчивости ГТС, оценка технического состояния. Рекомендации по обеспечению безопасной эксплуатации / О.Д. Рубин, Н.В. Ханов, С.Е. Лисичкин, А.С. Антонов. Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева. – Москва: РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 2023. – 116 с.  
ISBN 978-5-9675-1970-3

Настоящее учебное пособие является завершением цикла учебных пособий на тему: «Многофакторные исследования гидротехнических сооружений со сроком эксплуатации более 25 лет» (предыдущие учебные пособия:

- 1). Многофакторные исследования гидротехнических сооружений со сроком эксплуатации более 25 лет. Программа многофакторных исследований ГТС. Проведение натурных (полевых) работ по комплексному обследованию и геодезическим измерениям;
- 2). Многофакторные исследования гидротехнических сооружений со сроком эксплуатации более 25 лет. Анализ данных натурных наблюдений за поведением гидротехнических сооружений)

В представляемом учебном пособии рассматриваются методики расчета НДС и устойчивости грунтовых гидротехнических сооружений (включая результаты расчетов грунтовой плотины) на примере Жигулевской ГЭС; оценка технического состояния и рекомендации по обеспечению безопасной эксплуатации ГТС Жигулевской ГЭС, рассмотренных в выпущенных ранее учебных пособиях цикла «Многофакторные исследования гидротехнических сооружений со сроком эксплуатации более 25 лет».

Предназначено для студентов, обучающихся по специальности Строительство уникальных зданий и сооружений (СУЗС) (специализация – Строительство ГТС повышенной ответственности, дисциплина – Эксплуатация и реконструкция гидроузлов, Эксплуатация и безопасность гидротехнических сооружений). Также Учебное пособие полезно сотрудникам проектных, научно-исследовательских и эксплуатационных организаций, занимающихся вопросами безопасности гидротехнических сооружений при длительной эксплуатации.

Рекомендовано к изданию учебно-методической комиссией Института мелиорации, водного хозяйства и строительства им. А.Н. Костякова, протокол № 2 от 27.12.2021 г.

© Рубин О.Д., Ханов Н.В., Лисичкин С.Е., Антонов А.С., 2023

© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2023

## ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений (ГТС) в рамках реализации Федерального закона №117 «О безопасности гидротехнических сооружений» от 23 июня 1997 г. [1] необходимо проводить расчётную оценку устойчивости грунтовых ГТС.

В настоящее время в соответствии с действующей нормативно-технической документацией допустимо выполнять расчётные исследования как упрощёнными классическими методами, там и с применением современных численных методов расчёта. Упрощенные методы (например, на основе круглоцилиндрических поверхностей скольжения) требуют существенно меньших трудозатрат на их проведение и в большинстве случаев дают точный результат. Однако, в отдельных частных случаях упрощенные методы могут искажать реальное состояние объектов ввиду невозможности учёта различных факторов. Выбор метода должен основываться на анализе физико-механических характеристик грунтов основания и тела плотин, а также геологического строения основания. В данном учебном пособии рассмотрены 3 метода расчёта и даны рекомендации по их применению при выполнении многофакторных исследований, курсовых и дипломных работ.

Следует отметить, что в соответствии с пп. 9.14-9.15 СП 39.13330.2012 [2] при расчете устойчивости грунтовых гидротехнических сооружений рекомендуется учитывать их напряженно-деформированное состояние (НДС). Для плотин I класса ответственности в расчетах НДС следует применять нелинейные модели поведения грунтов, учитывающие пластические деформации грунта. Сегодня с этой целью возможно применять специализированные программные комплексы такие как MIDAS, PLAXIS и др., в которых на базе численных методов реализована возможность учета различных моделей поведения грунтового массива. При этом Приложение И СП 39.13330.2012 позволяет выполнять расчётные

исследования по проверенным практикой упрощенным методам (программные комплексы GROT, SLIDE).

Также выполнена оценка технического состояния и даны рекомендации по обеспечению безопасной эксплуатации ГТС Жигулевской ГЭС, рассмотренных в выпущенных ранее учебных пособиях цикла «Многофакторные исследования гидротехнических сооружений со сроком эксплуатации более 25 лет». 1) Многофакторные исследования гидротехнических сооружений со сроком эксплуатации более 25 лет. Программа многофакторных исследований ГТС. Проведение натурных (полевых) работ по комплексному обследованию и геодезическим измерениям; 2) Многофакторные исследования гидротехнических сооружений со сроком эксплуатации более 25 лет. Анализ данных натурных наблюдений за поведением гидротехнических сооружений).

Представляемое учебное пособие полезно студентам, обучающимся по специальности Строительство уникальных зданий и сооружений (СУЗС) (специализация – Строительство ГТС повышенной ответственности, дисциплина – Эксплуатация и реконструкция гидроузлов, Эксплуатация и безопасность гидротехнических сооружений). Также учебное пособие полезно сотрудникам проектных, научно-исследовательских и эксплуатационных организаций, занимающихся вопросами безопасности гидротехнических сооружений при длительной эксплуатации.

## **1. РАСЧЁТЫ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН**

### **1.1 Методика расчётов устойчивости грунтовых плотин по программе «GROT»**

Комплекс программ «GROT» реализует методы расчёта, рекомендованные СНиП [3] и СП [2], действующими на территории Российской Федерации. Методы расчёта учитывают последние изменения в нормативных документах и прошли апробацию путём сравнения результатов

работы программы с аналогичными зарубежными программными комплексами.

Программа «GROT» выполняет расчёты устойчивости откосов грунтовых плотин по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения, по плоской и пространственной схемам методами ВНИИГ-Терцаги, А.В.Бишоп, Р.Р.Чугаева на статические и сейсмические воздействия с учётом присоединённой массы воды, сосредоточенных сил, распределённых нагрузок.

Во всех применяемых в программе методиках призма обрушения делится на отсеки, в основании которых подсчитываются напряжения, пьезометрические напоры, сопротивление грунта сдвигу и т.д. Наиболее рационально представление поверхности скольжения в форме дуги окружности, хотя в общем случае она может быть произвольной. Во всех методах расчёта поведение грунта соответствует модели Кулона-Мора.

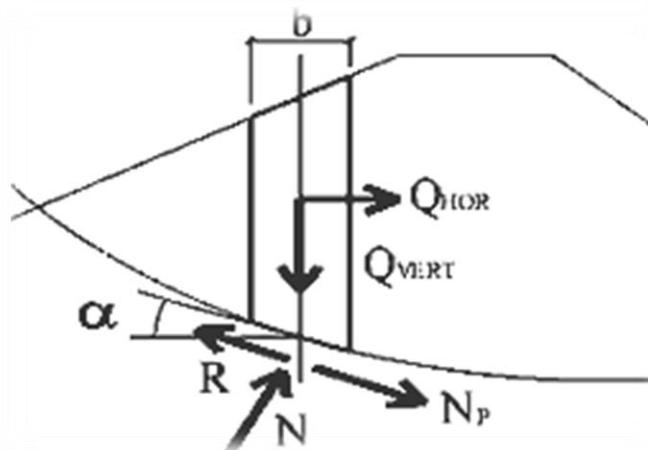


Рисунок 1.1.1. Схема к расчёту устойчивости откоса по круглоцилиндрической поверхности скольжения

Величина коэффициента запаса по методу круглоцилиндрических поверхностей определяется как отношение сдвигающих и удерживающих сил. Поскольку в используемых методах применяется способ дробления призмы обрушения на отдельные вертикальные отсеки, то выражение для коэффициента запаса имеет универсальный вид для всех возможных расчётов, так как удерживающий и сдвигающий моменты после деления на

радиус представляют собой силы, подсчитанные как геометрическая сумма сил для каждого из отсеков. Вследствие этого численные значения полученных величин коэффициента запаса по круговым и плоским поверхностям скольжения можно сопоставлять. Фактически круговая поверхность заменяется поверхностью, образованной рядом плоскостей, для которых используется не уравнение  $\Sigma M=0$ , а уравнение  $\Sigma X=0$ .

Программа позволяет учитывать не только взвешивание грунта основания и противодействие, действующее на подошву жёстких сооружений, но и фильтрационные силы, а также поровое давление.

Определение положения и формы наиболее опасной поверхности не имеет однозначного теоретического решения, поэтому рассчитывается большое количество произвольных поверхностей сдвига, охватывающих область, в пределах которой может произойти обрушение откоса.

Расчёты устойчивости грунтовых сооружений Жигулёвской ГЭС проводились по схеме глубинного сдвига и круглоцилиндрической поверхности обрушения. Методами: ВНИИИГ – Терцаги, Р.Р. Чугаева (аналог метода Г. Крея) с весовым способом учёта фильтрационных сил, и по методу А.В. Бишопа, на основное сочетание нагрузок.

Формула, для определения устойчивости откоса по методу ВНИИГа-Терцаги:

$$K = \frac{\sum \left[ (G - U \cdot b) \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi + \frac{cb}{\cos \alpha} \right] - \sum S_{\text{зоп}} \sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi - \sum S_{\text{верт}} \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\sum G \sin \alpha + \sum S_{\text{зоп}} \cos \alpha - \sum S_{\text{верт}} \sin \alpha} \quad (1.1.1)$$

Формула, для определения устойчивости откоса по методу А.В.Бишопа:

$$K = \frac{\sum \left[ \frac{((G - U \cdot b) \cdot \operatorname{tg} \varphi + cb - S_{\text{зоп}} \sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi - S_{\text{верт}} \operatorname{tg} \varphi)}{(1 + \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi)} \right]}{\sum G \sin \alpha + \sum S_{\text{зоп}} \cos \alpha + \sum S_{\text{верт}} \sin \alpha} \quad (1.1.2)$$

Формула, для определения устойчивости откоса по методу Р.Р.Чугаева:

$$K = \frac{\sum \left[ (G - U \cdot b) \operatorname{tg} \varphi + \frac{cb}{\cos \alpha} - S_{гор} \sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi - S_{верт} \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi \right]}{\sum G \sin \alpha + \sum S_{гор} \cos \alpha - \sum S_{верт} \sin \alpha} \quad (1.1.3)$$

где:  $G$  – собственный вес грунта элементарного отсека призмы с учётом водонасыщения и вертикальной распределённой по контуру нагрузки;

$U$  – пьезометрический напор в основании отсека и избыточное поровое давление, соответствующее расчётному моменту времени;

$b$  – ширина элементарного отсека;

$\operatorname{tg} \varphi$  – расчётный коэффициент трения;

$c$  – расчётное сцепление грунта;

$\alpha$  – угол, между вертикалью и радиусом дуги сдвига (для удерживающих сил принимается по модулю);

$S_{гор}$  и  $S_{верт}$  – горизонтальная и вертикальная составляющие сейсмической нагрузки, с учётом места приложения сейсмических ускорений и присоединённой массы воды.

## 1.2 Методика расчётов устойчивости грунтовых плотин по программе «SLIDE»

Программа «SLIDE» выполняет расчёты устойчивости откосов грунтовых плотин по круговым поверхностям скольжения по плоской и пространственной схеме методами *Bishop simplified*, *Janbu corrected*, *Spence* на статические и сейсмические воздействия с учетом присоединенной массы воды, сосредоточенных сил, распределенных нагрузок, инженерных мероприятий.

Все методы предельного равновесия допускают, что массив грунта над поверхностью скольжения делится на блоки (разделяющие плоскости между блоками всегда вертикальны). Силы, действующие на отдельные блоки, представлены на рисунке 1.2.1.

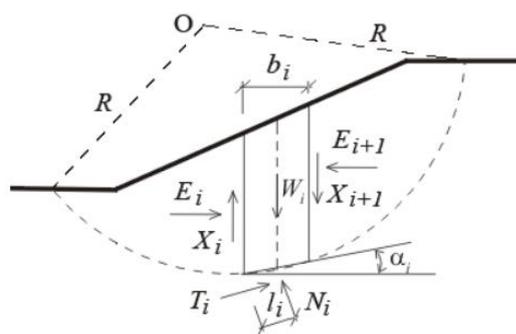


Рисунок 1.2.1 – Схема расчета методом *Bishop*

где:

$E_i, X_i$  - сдвигающие и нормальные силы между отдельными блоками;

$N_i, T_i$  - сдвигающие и нормальные силы на отдельных сегментах поверхности скольжения;

$W_i$  - вес отдельных блоков.

Отдельные методы различаются допущениями и удовлетворением уравнений сил равновесия и уравнений момента равновесия по отношению к центру O.

Метод *Bishop* [1] допускает нулевые силы  $X_i$  между блоками. Метод основан на удовлетворении уравнения момента равновесия и уравнения вертикальной силы равновесия. Коэффициент устойчивости  $FS$  вычисляется путем последовательной итерации следующего выражения:

$$FS = \frac{1}{\sum_i W_i \cdot \sin \alpha_i} \cdot \sum_i \frac{c_i \cdot b_i + (W_i - u_i \cdot b_i) \cdot \tan \varphi_i}{\cos \alpha_i + \frac{\tan \varphi_i \cdot \sin \alpha_i}{FS}} \quad (1.2.1)$$

где:  $U_i$  – поровое давление в блоке;

$C_i, \varphi_i$  – эффективные значения параметров грунта;

$W_i$  – вес отдельных блоков;

$\alpha_i$  – наклон сегмента поверхности скольжения;

$b_i$  – горизонтальная ширина блока.

Метод *Spencer* [2] - общий метод отсеков предельного равновесия. Он требует удовлетворения условия равновесия сил и моментов, действующих

на отдельные блоки. Блоки создаются путем деления участка грунта над потенциальной поверхностью скольжения плоскостями. Силы, действующие на отдельные блоки, представлены на следующем рисунке 1.2.2.

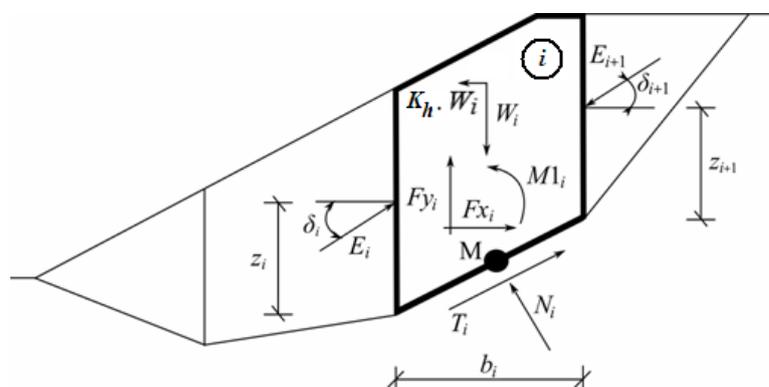


Рисунок 1.2.2 - Статическая схема: метод *Spencer*

где:  $W_i$  - вес блока, включая напряжение материала, имеющего свойства блока, в т.ч. воздействия коэффициента вертикального землетрясения  $K_y$ ;

$K_h * W_i$  - горизонтальная инерционная сила, представляющая действие землетрясения;

$K_h$  - коэффициент горизонтального ускорения во время землетрясения;

$N_i$  - нормальная сила на поверхности скольжения;

$T_i$  - сила сдвига на поверхности скольжения;

$E_i, E_{i+1}$  - силы, приложенные соседними блоками, наклонены от горизонтальной поверхности на угол  $\delta$ ;

$F_{xi}, F_{yi}$  - другие горизонтальные и вертикальные силы, действующие на блок;

$M_i$  - момент сил  $F_{xi}, F_{yi}$ , вращающихся вокруг точки  $M$ , которая является центром  $i$ -го сегмента поверхности скольжения;

$U_i$  - равнодействующая порового давления на  $i$ -ом сегменте поверхности скольжения.

Для расчета предельного равновесия сил и моментов на отдельных блоках по методу *Spencer* используются следующие допущения:

- плоскости раздела между блоками всегда вертикальны;
- линия действия веса блока  $W_i$  проходит через центр  $i$ -ого сегмента поверхности скольжения, представленного точкой  $M$ ;
- нормальная сила  $N_i$  действует в центре  $i$ -ого сегмента поверхности скольжения, в точке  $M$ ;
- наклонение сил  $E_i$ , действующих между блоками, является постоянной величиной для всех блоков и равно  $\delta$ , только на крайних точках поверхности скольжения  $\delta = 0$ .

Решение принимает следующие выражения:

$$N_i = N'_i + U_i \quad (1.2.2)$$

$$T_i = (N_i - U_i) \tan \varphi_i + c_i \frac{b_i}{\cos \alpha_i} = N'_i \tan \varphi_i + c_i \frac{b_i}{\cos \alpha_i} \quad (1.2.3)$$

$$N'_i + U_i - W_i \cos \alpha_i + k_r W_i \sin \alpha_i + Fy_i \cos \alpha_i - Fx_i \sin \alpha_i + E_{i+1} \sin(\alpha_i - \delta_{i+1}) - E_i \sin(\alpha_i - \delta_i) = 0 \quad (1.2.4)$$

$$N'_i \frac{\tan \varphi_i}{SF} + \frac{c_i}{SF} \frac{b_i}{\cos \alpha_i} - W_i \sin \alpha_i - k_r W_i \cos \alpha_i + Fy_i \sin \alpha_i + Fx_i \cos \alpha_i - E_{i+1} \cos(\alpha_i - \delta_{i+1}) + E_i \cos(\alpha_i - \delta_i) = 0 \quad (1.2.5)$$

$$E_{i+1} \cos \delta_{i+1} \left( z_{i+1} - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) - E_{i+1} \sin \delta_{i+1} \frac{b_i}{2} - E_i \cos \delta_i \left( z_i - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) - E_i \sin \delta_i \frac{b_i}{2} + M1 - k_r W_i (y_M - y_{g_i}) = 0 \quad (1.2.6)$$

где:  $\varphi_i$  – угол внутреннего трения грунта на сегменте поверхности скольжения;

$C_i$  – удельное сцепление грунта на сегменте поверхности скольжения;

$\alpha_i$  – угол наклона сегмента поверхности скольжения.

Уравнение (1.2.2) представляет отношение между эффективным и общим значением нормальной силы, действующей на поверхность скольжения.

Уравнение (1.2.3) соответствует условию Мора-Кулона, представляющего отношение между нормальной и сдвиговой силами на данном сегменте поверхности скольжения. Уравнение (1.2.4) представляет уравнение равновесия силы в направлении под прямым углом к  $i$ -ому сегменту поверхности скольжения, а уравнение (1.2.5) представляет силу равновесия вдоль  $i$ -ого сегмента поверхности скольжения.

$SF$  - коэффициент надежности, который используется для приведения параметров грунта.

Уравнение (1.2.6) соответствует уравнению момента равновесия вокруг точки  $M$ , где  $y_{gi}$  - вертикальная координата точки приложения веса блока, а  $y_M$  - вертикальная координата точки  $M$ . Изменяя уравнения (1.2.4) и (1.2.5), получаем следующую рекурсивную формулу:

$$E_{i+1} = \frac{[(W_i - Fy_i)\cos\alpha_i - (K_R W_i - Fx_i)\sin\alpha_i - U_i + E_i \sin(\alpha_i - \delta_i)] \frac{\tan\varphi_i}{SF} + \frac{c_i}{SF} \frac{b_i}{\cos\alpha_i} - (W_i - Fy_i)\sin\alpha_i - (K_R W_i - Fx_i)\cos\alpha_i + E_i \cos(\alpha_i - \delta_i)}{\sin(\alpha_i - \delta_{i+1}) \frac{\tan\varphi_i}{SF} + \cos(\alpha_i - \delta_{i+1})} \quad (1.2.7)$$

На основе этого отношения можно для  $\delta$  и  $SF$  постепенно вычислить все силы  $E_i$  между блоками, исходя при этом из факта, что в начале поверхности скольжения значение  $E$  известно:  $E_1 = 0$ .

Из уравнения момента равновесия (1.2.7) выводится дополнительная рекурсивная формула:

$$z_{i+1} = \frac{\frac{b_i}{2} [E_{i+1}(\sin\delta_{i+1} - \cos\delta_{i+1} \tan\alpha_i) + E_i(\sin\delta_i - \cos\delta_i \tan\alpha_i)] + E_i z_i \cos\delta_i - M1_i + K_R W_i (y_M - y_{gi})}{E_{i+1} \cos\delta_{i+1}} \quad (1.2.8)$$

Эта формула позволяет рассчитать для данных значений  $\delta$  все плечи  $z$  сил, действующих между блоками, зная значение слева в начале поверхности скольжения, где  $z_1 = 0$ .

Коэффициент надежности  $FS$  определяется при помощи следующего итерационного процесса:

1. Начальное значение  $\delta$  устанавливается равным 0,  $\delta = 0$ .

2. Коэффициент надежности  $SF$  для данного значения  $\delta$  следует из уравнения (1.2.7), при этом допускается значение  $E_{n+1} = 0$  в конце поверхности скольжения.

3. Значение  $\delta$  рассчитывается уравнением (1.2.8) с помощью значений  $E$ , определенных на предыдущем этапе при условии, что момент на последнем блоке равен 0. Уравнение (1.2.8) не определяет значение  $z_{n+1}$ , поскольку оно равно 0. Для этого значения должно выполняться уравнение момента равновесия (1.2.6).

4. Этапы 2 и 3 повторяются до тех пор, пока значение  $\delta$  не изменится.

Для обеспечения устойчивости процесса итерации необходимо избегать неустойчивых условий. Такие неустойчивости появляются в точках, где имеет место деление на 0 в выражениях (1.2.7) и (1.2.8). В уравнении (1.2.8) деление на 0 принимается для  $\delta = \pi/2$  или  $\delta = -\pi/2$ . Таким образом, значение угла  $\delta$  должно находиться в интервале  $(-\pi/2; \pi/2)$ .

Деление на 0 в выражении (1.2.7) имеет место, когда:

$$SF = \tan \varphi_i \tan(\delta_{i+1} - \alpha_i) \quad (1.2.9)$$

Еще одним способом предупредить цифровую неустойчивость является проверка параметра  $m_\alpha$ : должно выполняться следующее условие:

$$m_\alpha = \cos \alpha_i + \frac{\sin \alpha_i \tan \varphi_i}{SF} > 0,2 \quad (1.2.10)$$

Таким образом, перед началом итерации необходимо найти наивысшие показатели критических значений ( $SF_{min}$ ), удовлетворяющих выше указанные условия. Значения ниже данного критического значения  $SF_{min}$  находятся в области неустойчивого решения, таким образом, итерация начинается с установки  $SF$  на значение «слегка» выше  $SF_{min}$ , и все получаемые значения  $SF$  из итерации выше, чем  $SF_{min}$ .

Метод *Janbu* [3,4] является общим методом участков, разработанным на основе предельного равновесия. Он требует удовлетворения равновесия сил и

моментов, действующих на отдельные блоки (не удовлетворяется лишь равновесие момента на последнем самом верхнем блоке). Блоки создаются путем деления участка грунта над поверхностью скольжения плоскостями раздела.

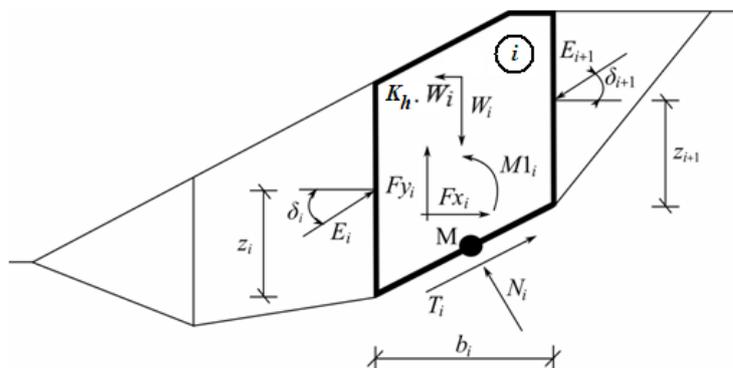


Рисунок 1.2.3 - Статическая схема: метод *Janbu*

Предполагается, что каждый блок испытывает следующие усилия:

где:  $W_i$  - вес блока, включая напряжение материала, имеющего свойства блока, в т.ч. воздействия коэффициента вертикального землетрясения  $K_y$ ;

$K_h * W_i$  - горизонтальная инерционная сила, представляющая действие землетрясения;

$K_h$  - коэффициент горизонтального ускорения во время землетрясения;

$N_i$  - нормальная сила на поверхности скольжения;

$T_i$  - сила сдвига на поверхности скольжения;

$E_i, E_{i+1}$  - силы, приложенные соседними блоками, наклонены от горизонтальной поверхности на угол  $\delta_i$  и  $\delta_{i+1}$  соответственно и находящиеся на высоте  $z_i$  и  $z_{i+1}$  соответственно над поверхностью скольжения;

$F_{xi}, F_{yi}$  - другие горизонтальные и вертикальные силы, действующие на блок;

$M_{li}$  - момент сил  $F_{xi}, F_{yi}$ , вращающихся вокруг точки  $M$ , которая является центром  $i$ -го сегмента поверхности скольжения;

$U_i$  - равнодействующая порового давления на  $i$ -ом сегменте поверхности скольжения.

Для расчета предельного равновесия сил и моментов на отдельных блоках по методу *Janbu* используются следующие допущения:

- плоскости раздела между блоками всегда вертикальны;
- линия действия веса блока  $W_i$  проходит через центр  $i$ -го сегмента поверхности скольжения, представленного точкой  $M$ ;
- нормальная сила  $N_i$  действует в центре  $i$ -го сегмента поверхности скольжения в точке  $M$ ;
- принимается положение  $z_i$  сил  $F_i$  действующих между блоками на конечных точках поверхности скольжения  $z=0$ .

Выбор положения  $z_i$  может иметь значительное влияние на конвергенцию метода. При неверном предположении положения  $z_i$  для данного уклона, может оказаться невозможным удовлетворить условия равновесия (алгоритм не сходится).

Высота  $z_i$  над поверхностью скольжения устанавливается примерно на  $1/3$  от высоты стыка между блоками. В случае неудовлетворения условий равновесия, алгоритм переносит высоты на иную позицию, т.е. немного выше в пределах пассивной зоны, около основания, и выше в пределах активной зоны, около гребня уклона.

Решение принимает следующие выражения:

$$N_i = N'_i + U_i \quad (1.2.11)$$

$$T_i = (N_i - U_i) \tan \varphi_i + c_i \frac{b_i}{\cos \alpha_i} = N'_i \tan \varphi_i + c_i \frac{b_i}{\cos \alpha_i} \quad (1.2.12)$$

$$N'_i + U_i - W_i \cdot \cos \alpha_i + K_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i + Fy_i \cdot \cos \alpha_i - Fx_i \cdot \sin \alpha_i + E_{i+1} \cdot \sin(\alpha_i - \delta_{i+1}) - E_i \cdot \sin(\alpha_i - \delta_i) = 0 \quad (1.2.13)$$

$$N'_i \cdot \frac{\tan \varphi_i}{FS} + \frac{c_i}{FS} \cdot \frac{b_i}{\cos \alpha_i} - W_i \cdot \sin \alpha_i - K_h \cdot W_i \cdot \cos \alpha_i + Fy_i \cdot \sin \alpha_i + Fx_i \cos \alpha_i - E_{i+1} \cdot \cos(\alpha_i - \delta_{i+1}) + E_i \cdot \cos(\alpha_i - \delta_i) = 0 \quad (1.2.14)$$

$$\begin{aligned}
& E_{i+1} \cdot \cos \delta_{i+1} \left( z_{i+1} - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) - E_{i+1} \cdot \sin \delta_{i+1} \cdot \frac{b_i}{2} - \\
& E_i \cdot \cos \delta_i \left( z_i - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) - E_i \cdot \sin \delta_i \cdot \frac{b_i}{2} + \\
& M1_i - K_h \cdot W_i (y_M - y_{gi}) = 0
\end{aligned} \tag{1.2.15}$$

где:  $\varphi_i$  – угол внутреннего трения грунта на сегменте поверхности скольжения;

$C_i$  – удельное сцепление грунта на сегменте поверхности скольжения;

$\alpha_i$  – угол наклона сегмента поверхности скольжения.

Уравнение (1.2.11) представляет отношение между эффективным и общим значением нормальной силы, действующей на поверхность скольжения.

Уравнение (1.2.12) соответствует условию Мора-Кулона, представляющего отношение между нормальной и сдвиговой силами на данном сегменте поверхности скольжения. Уравнение (1.2.13) представляет уравнение равновесия силы в направлении под прямым углом к  $i$ -ому сегменту поверхности скольжению, а уравнение (1.2.14) представляет силу равновесия вдоль  $i$ -ого сегмента поверхности скольжения.

$FS$ - коэффициент надежности, который используется для приведения параметров грунта. Уравнение (1.2.15) соответствует уравнению момента равновесия вокруг точки  $M$ , где  $y_{gi}$  – вертикальная координата точки приложения веса блока, а  $y_M$  – вертикальная координата точки  $M$ .

Изменяя уравнения (1.2.13) и (1.2.14), получаем следующую рекурсивную формулу (1.2.16):

$$\begin{aligned}
E_{i+1} = & \frac{\left[ (W_i - Fy_i) \cdot \cos \alpha_i - (K_h W_i - Fx_i) \cdot \sin \alpha_i - U_i + E_i \cdot \sin(\alpha_i - \delta_i) \right] \cdot \frac{\tan \varphi_i}{FS} + \\
& \sin(\alpha_i - \delta_{i+1}) \cdot \frac{\tan \varphi_i}{FS} + \cos(\alpha_i - \delta_{i+1}) \\
& + \frac{c_i}{FS} \cdot \frac{b_i}{\cos \alpha_i} - (W_i - Fy_i) \cdot \sin \alpha_i - (K_h W_i - Fx_i) \cdot \cos \alpha_i + E_i \cdot \cos(\alpha_i - \delta_i)
\end{aligned} \tag{1.2.16}$$

Эта формула позволяет рассчитать все силы  $E_i$ , действующие между блоками для данных значений  $\delta$  и  $FS$ . Это решение допускает, что в начале поверхности скольжения значение  $E$  известно и равно  $E_l=0$ .

Формула для расчета угла  $\delta_i$  (1.2.17) выводится из уравнения момента равновесия (1.2.15):

$$\delta_{i+1} = \arctan\left(\frac{2z_{i+1}}{b_i} + \tan \alpha_i\right) - \arcsin \frac{E_i \left( \cos \delta_i \left( z_i - \frac{b_i \tan \alpha_i}{2} \right) + \sin \delta_i \cdot \frac{b_i}{2} \right) - M1_i}{E_{i+1} \sqrt{\left( z_{i+1} + \frac{b_i \tan \alpha_i}{2} \right)^2 + \left( \frac{b_i}{2} \right)^2}} \quad (1.2.17)$$

Эта формула позволяет рассчитать углы  $\delta_i$  для всех значений  $z_i$ , зная значения в конечных точках поверхности скольжения  $\delta = 0$ .

Коэффициент надежности  $SF$  определяется при помощи следующего итерационного процесса:

1. Начальное значение устанавливается на 0,  $\delta_i=0$ , а положение  $z_i$ -на примерно 1/3 высоты стыка.
2. Коэффициент надежности  $FS$  для данного значения  $\delta_i$  следует из уравнения (1.2.16), при этом допускается значение  $E_{n+l}=0$  в конце поверхности скольжения.
3. Значение  $\delta_i$  рассчитывается уравнением (1.2.17) с помощью значений  $E_i$  определенных на предыдущем этапе.
4. Этапы 2 и 3 повторяются до тех пор, пока значение  $FS$  не изменится.

Для обеспечения успешного процесса итерации необходимо избегать неустойчивых условий. Такие нестабильности появляются в точках, где имеет место деление на 0 в выражении (1.2.16):

$$FS = \tan \varphi_i \cdot \tan (\delta_{i+1} - \alpha_i) \quad (1.2.18)$$

Еще одним способом предупредить цифровую нестабильность является проверка параметра  $m_\alpha$ : должно выполняться следующее условие:

$$m_\alpha = \cos \alpha_i + \frac{\sin \alpha_i \cdot \tan \varphi_i}{FS} > 0,2 \quad (1.2.19)$$

Таким образом, перед началом итерации необходимо найти наивысшие показатели критических значений ( $FS_{min}$ ), удовлетворяющих выше указанные условия. Значения ниже данного критического значения  $FS_{min}$  находятся в области неустойчивого решения, таким образом, итерация начинается с установки  $FS$  на значение «слегка» выше  $FS_{min}$ , и все получаемые значения  $FS$  из итерации выше, чем  $FS_{min}$ .

### **1.3 Методика расчётов устойчивости грунтовых плотин по программе «PLAXIS»**

В соответствии с п. 9.14 СП 39.13330.2012 при расчете устойчивости грунтовых плотин гидроузлов необходимо учитывать их напряженно-деформированное состояние. Для плотин I класса ответственности в расчетах НДС следует применять нелинейные модели, учитывающие пластические деформации грунта в предельном состоянии согласно п. 9.15 СП 39.13330.2012. С этой целью рекомендуется применять специализированные программные комплексы, в которых на базе универсальных численных методов реализована возможность расчета с учетом специфических для геотехнической задачи теорий прочности. При этом расчетом должны выполняться условия первого и второго предельных состояний.

Выбранная методика расчета, а также модель поведения грунта должны обеспечивать необходимую и достаточную точность результатов при определении НДС. Для моделирования грунтового основания, необходимо учитывать только те скважины, которые находятся в зоне грунтовой плотины.

При определении НДС численными методами принимаются допущения при создании расчетной схемы, которая должна отражать действительную работу конструкции на каждом этапе строительства. При задании расчетной схемы должны быть учтены:

- размеры расчетной области, необходимые для корректного формирования НДС;

- геометрические параметры конструкций;
- неоднородность грунтового основания;
- свойства материалов конструкций и грунтов;
- особенности взаимодействия конструкций с грунтовым массивом;
- характер работы конструкций;
- нагрузки от строящегося сооружения, а также нагрузки от транспорта и складированных материалов;
- поэтапное возведение сооружения.

В последние годы для решения прикладных задач в механике грунтов используются преимущественно численные методы расчёта НДС оснований и фундаментов, в том числе метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных разностей (МКР) и метод граничных элементов (МГЭ).

В данной работе был принят МКЭ, так как он позволяет учитывать неоднородность основания плотины, нелинейные свойства и деформации грунтов при статическом и динамическом воздействиях.

В настоящей работе использован программный комплекс PLAXIS 2D. Известно, что при решении задач МКЭ сплошная область рассматривается как совокупность конечного числа элементов. В данной работе были использованы треугольные конечные элементы, которые позволяют моделировать любые пространственные задачи с достаточной степенью точности. Работа грунта описывалась упругопластической моделью Мора-Кулона (*Mohr-Coulomb*). Эта модель является базовой моделью с фиксированной поверхностью текучести, которая задается параметрами модели и не зависит от пластического деформирования. При напряженных состояниях, соответствующих точкам в пределах поверхности текучести, поведение материала считается упругим, а все деформации являются обратимыми.

Основной принцип упругопластического состояния заключается в том, что деформации и приращения деформаций делятся на упругую и пластическую части:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p,$$

где  $\varepsilon$  - общая деформация;  $\varepsilon^e$  - упругая деформация;  $\varepsilon^p$  - пластическая (необратимая) деформация.

Закон Гука используется для определения приращения упругой деформации, т.е.  $\Delta\varepsilon^e = \Delta\sigma/E$ , где  $\Delta\sigma$  – приращение напряжений,  $E$  – модуль упругости.

Приращения пластических деформаций описываются зависимостью:

$$d\varepsilon_{ij}^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}},$$

где  $\lambda$  - константа,  $g$  - пластический потенциал, который зависит от условия прочности грунта. Для упругой среды  $\lambda = 0$ .

В качестве параметров упруго-пластической модели Мора-Кулона (*Mohr-Coulomb*) применяются деформационные характеристики  $E$  и  $\nu$  и параметры прочности  $c$ ,  $\varphi$  и  $\Psi$ .

Геомеханическая модель основания строилась на основе анализа и обобщения материалов инженерно-геологических изысканий, выполненных на объекте строительства [5].

Для определения расчетных фактических коэффициентов устойчивости в ПК PLAXIS 2D используется расчет *Safety*, при котором последовательно уменьшаются прочностные характеристики грунтов (угол внутреннего трения, сцепление и сдвиговая прочность) до тех пор, пока не произойдет разрушение. Коэффициент устойчивости определяется как отношение фактической прочности к прочности при разрушении.

#### 1.4 Критерии устойчивости откосов грунтовой плотины

Расчёты устойчивости откосов плотин проведены на действие основного и особого сочетаний нагрузок.

Критерием устойчивости откосов является соблюдение условия СП 39.13330.2012 п.9.11:

$$\gamma_{lc} F \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} R,$$

где  $F$  – расчётное значение обобщённой сдвигающей силы, определяемое с учётом коэффициента надёжности по нагрузке;

$R$  – расчётное значение обобщённой несущей способности системы «сооружение – основание», определяемое с учётом коэффициента надёжности по грунту, то есть обобщённое расчётное значение сил предельного сопротивления сдвигу по рассматриваемой поверхности;

$\gamma_{lc}$  – коэффициент сочетания нагрузок, принимаемый:

$\gamma_{lc} = 1,0$  – для основного сочетания нагрузок;

$\gamma_{lc} = 0,85$  – для особого сочетания нагрузок, при сейсмической нагрузке уровня максимального расчетного землетрясения;

$\gamma_n$  – коэффициент надёжности по степени ответственности сооружений:

$\gamma_n = 1,25$  – грунтовая плотина Жигулевской ГЭС относится к I классу надёжности;

$\gamma_c$  – коэффициент условий работы, либо учёт метода расчёта:

$\gamma_c = 0,95$  – инженерные методы расчётов;

$\gamma_c = 1,0$  – с учетом напряженно-деформированного состояния.

Коэффициент перегрузки, или надёжности по нагрузке, в данном расчётном исследовании не учитывается, так как расчёты выполняются с применением расчётных характеристик грунтов СП 58.13330 Приложение Д.

В используемых программных комплексах наряду с силами  $F$ ,  $R$  вычисляется отношение этих сил  $K_s$ , соответствующее по форме коэффициенту устойчивости СП 39.13330 п.9.11):

$$K_s = \frac{R}{F} \geq \frac{\gamma_n \gamma_{lc}}{\gamma_c} = K_d$$

где  $K_d$  – нормативный критерий устойчивости.

Для оценки устойчивости откоса определяется наиболее опасная поверхность сдвига с минимальным коэффициентом запаса устойчивости  $K_s$  для основного и особого сочетания нагрузок для каждого расчётного случая.

Полученный результат сопоставляется с нормативным критерием устойчивости откоса в соответствии с СП 39.13330.2012 п.9.11:

▪ для расчетов по программам **GROT, SLIDE:**

- для основного сочетания нагрузок:  $K_d = \frac{1,25 \cdot 1}{0,95} = 1,316$
- для особого сочетания нагрузок:  $K_d = \frac{1,25 \cdot 0,85}{0,95} = 1,118$

▪ для расчетов по программе **PLAXIS:**

- для основного сочетания нагрузок:  $K_d = \frac{1,25 \cdot 1}{1,0} = 1,250$
- для особого сочетания нагрузок:  $K_d = \frac{1,25 \cdot 0,85}{1,0} = 1,063$

## 1.5 Общие сведения о грунтовой плотине

Грунтовая плотина Жигулёвского гидроузла расположена между зданием ГЭС и водосбросной плотиной и перекрывает русло р. Волга и левобережную пойму. Длина сооружения по гребню составляет 2802,50 м, высота в русловой части достигает 45 м, в пойменной части - 27,5 м. Общий план русловой грунтовой плотины представлен на рисунке 1.5.1.

Плотина является глухим намывным сооружением, возведённым из песков средней и мелкой крупности, отметка гребня 58,5 м. В основании

плотины и в русле залегают крупно- и мелкозернистые пески с включениями гравия и гальки мощностью 8-12 м, подстилаемые суглинками и глинами.

Разрезы по телу плотины, используемые в расчётных исследованиях, представлены на рисунках 1.5.2 – 1.5.4.

Расчётные физико-механические характеристики грунтов тела плотины и основания представлены в таблице 1.5.1.

Положение депрессионной кривой в теле грунтов плотины и левобережной дамбы принималось в соответствии с данными отчёта [5]. Уровень верхнего бьефа принят на отметке 53,0 м, уровень нижнего бьефа на отметке 28,0 м.

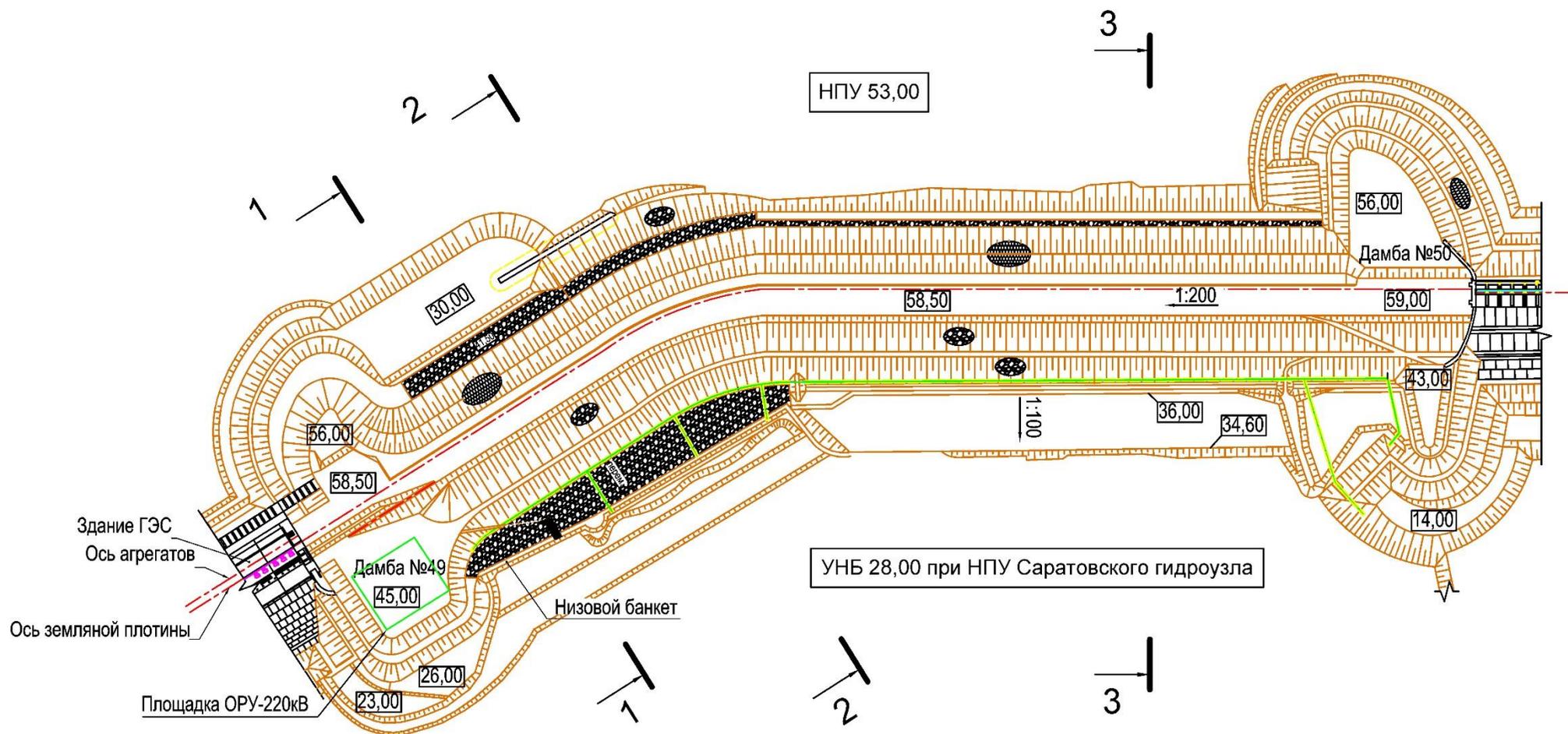


Рисунок 1.5.1 План русловой грунтовой плотины Жигулёвской ГЭС

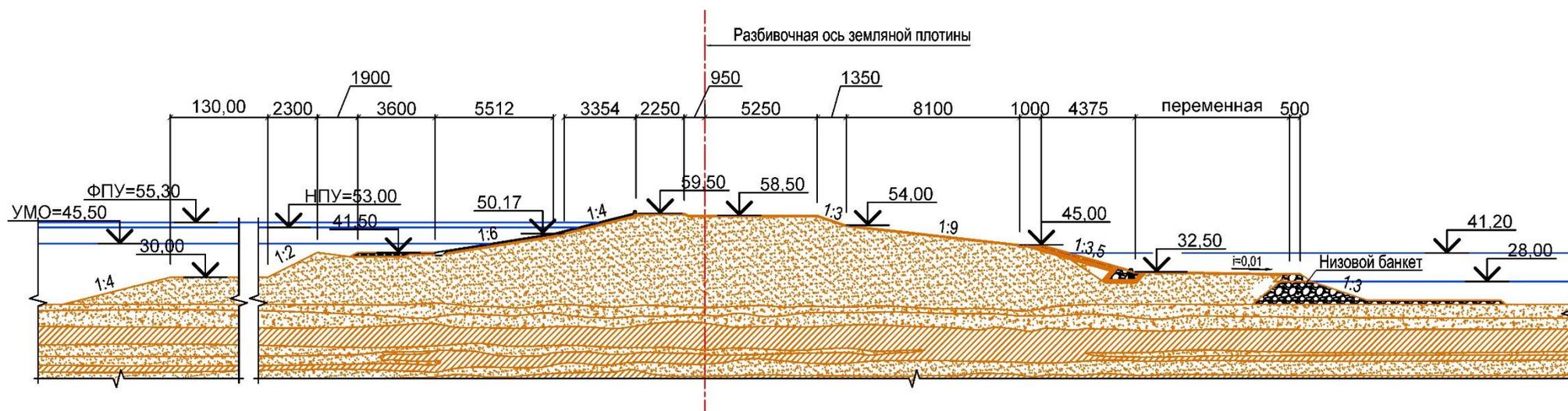


Рисунок 1.5.2 Русловая плотина (сечение I-I)

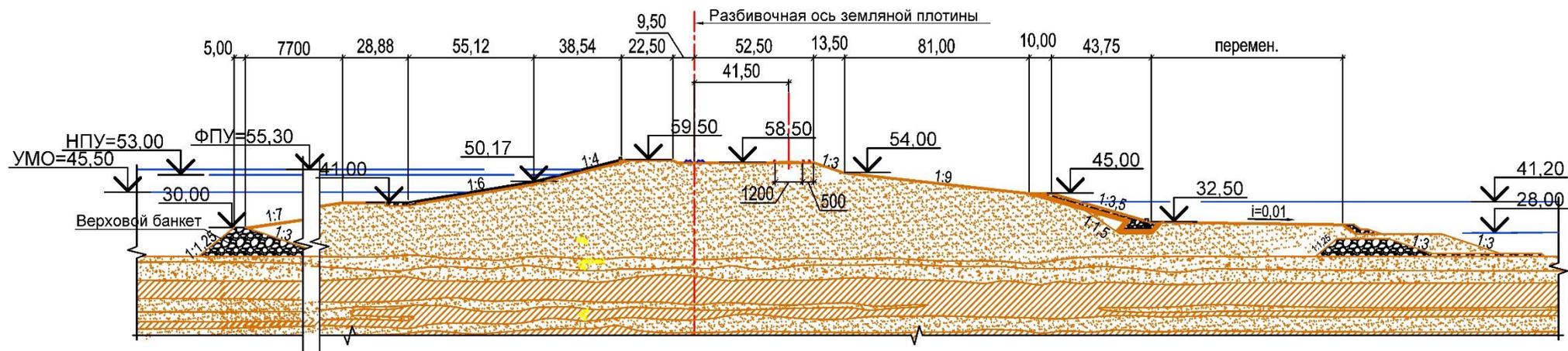


Рисунок 1.5.3 Русловая плотина (сечение II-II)

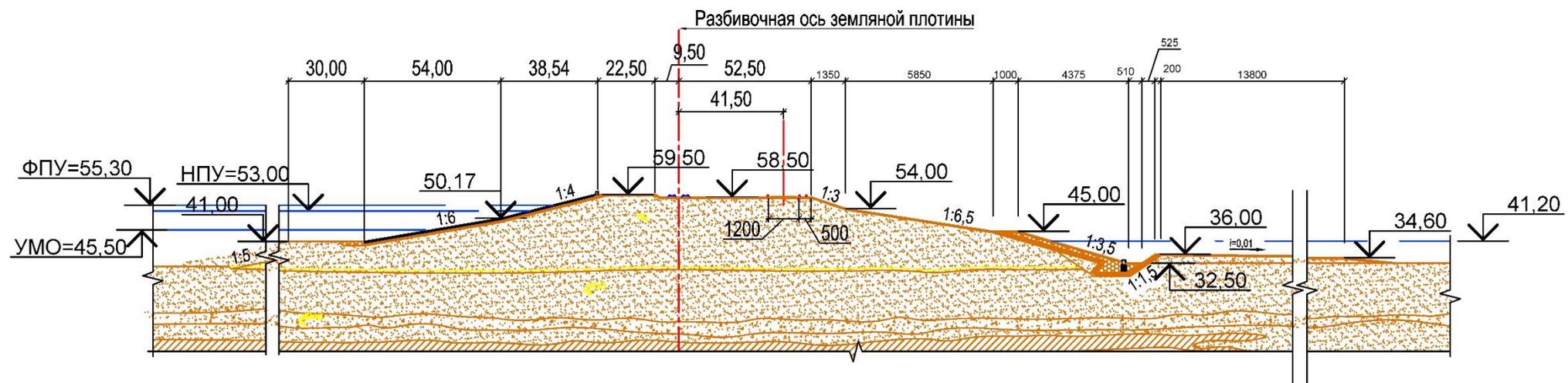


Рисунок 1.5.4 Русловая плотина (сечение III-III)

Таблица 1.5.1

## Физико-механические характеристики грунтов плотины Жигулёвской ГЭС

№ грунта на геологическом разрезе	Стратиграфический индекс	Краткая характеристика грунтов	Расчетные показатели свойств фунтов									
			Плотность, т/м <sup>3</sup>			Сопротивление сдвигу			Деформационные свойства		Пористость	Коэффициент фильтрации
			$\rho_d$	$\rho_e$	$\rho_{вод}$	$\varphi$ , град	$C$ , МПа	$C$ , кПа	$E_e$ , МПа	$\mu$	$n$	$K_f$ , м/сут
1	tQ4	пески, преимущественно мелкие, средней крупности	1.60	1.78	2.00	30	0.0012	1	23.00	0.27	0.40	10.00
2	Q4al	пески мелкие, средней крупности, гравелистые	1.60	1.94	2.00	24	0.001	1	25.00	0.29	0.40	20.00
3	Q2al	суглинки мягко- и тугопластичной консистенции	1.50	1.95	1.95	12	0.03	30	14.00	0.35	0.45	0.05
4	Q1-2al	суглинки, глины мягкопластичной консистенции	1.62	2.02	2.02	23	0.04	40	19.00	0.31	0.40	5.00
5	N2kn	глины тугопластичные с редкими прослоями мелких песков и алевритов	1.50	1.95	1.96	16	0.07	70	20.00	0.36	0.46	0.01

Условные обозначения:

 $\rho$  – плотность; $E$  – модуль деформации; $\mu$  – коэффициент Пуассона; $\varphi$  – угол внутреннего трения; $C$  – сцепление.

## **1.6 Расчёты устойчивости откосов грунтовой плотины по программе «GROT»**

В расчётных исследованиях рассматривалось основное и особое сочетания нагрузок.

Ниже на рисунках 1.6.1 и 1.6.2 приведены результаты расчётных исследований устойчивости сечения I-I грунтовой плотины, на рисунках 1.6.3 и 1.6.4 приведены результаты расчётов сечения II-II, на рисунках 1.6.5 и 1.6.6 приведены результаты расчётов сечения III-III. В таблицах 1.6.1...1.6.6 сведены данные по всем вариантам расчётов для верхового и низового откосов.

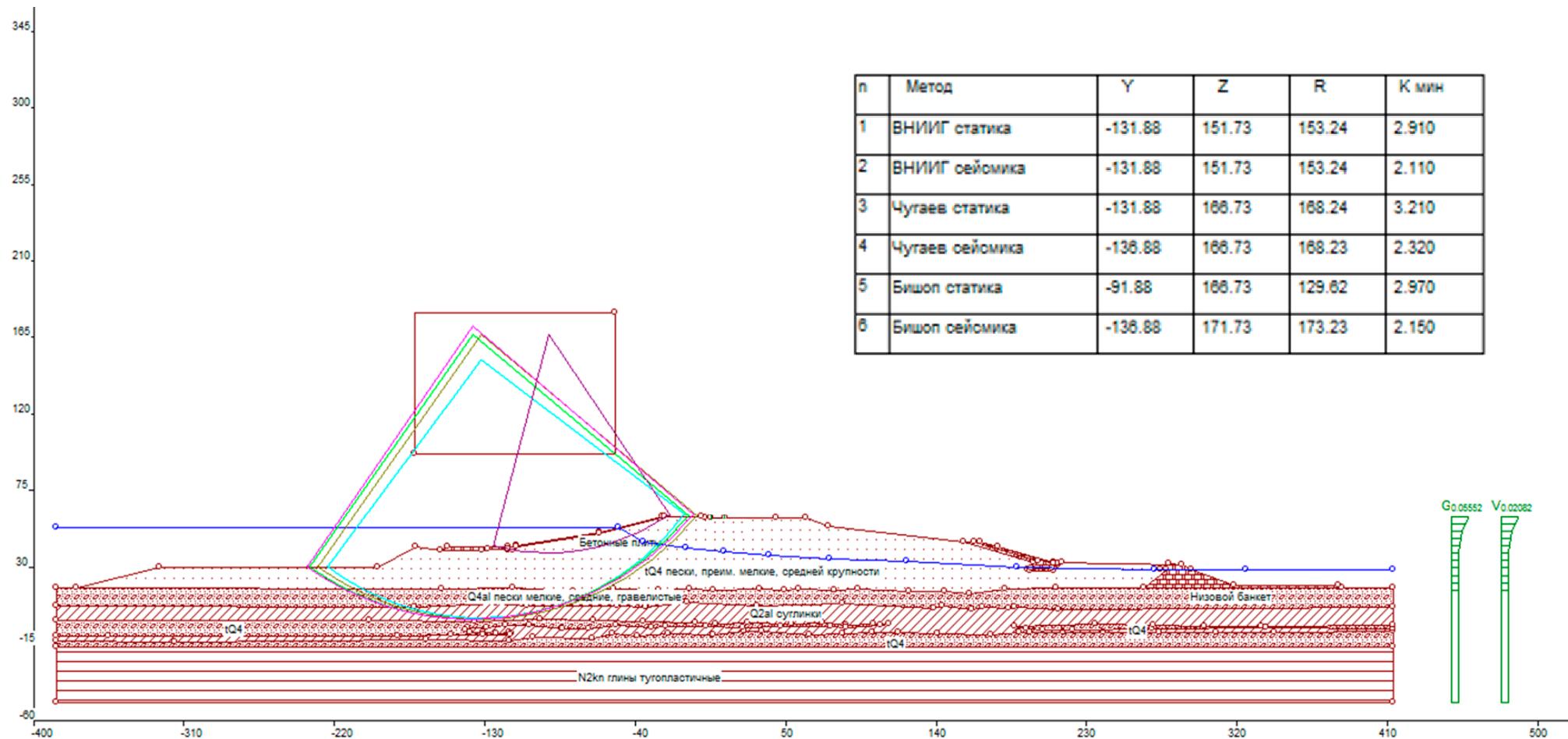


Рисунок 1.6.1 Сечение I-I, расчёты устойчивости верхового откоса на основное и особое сочетание нагрузок

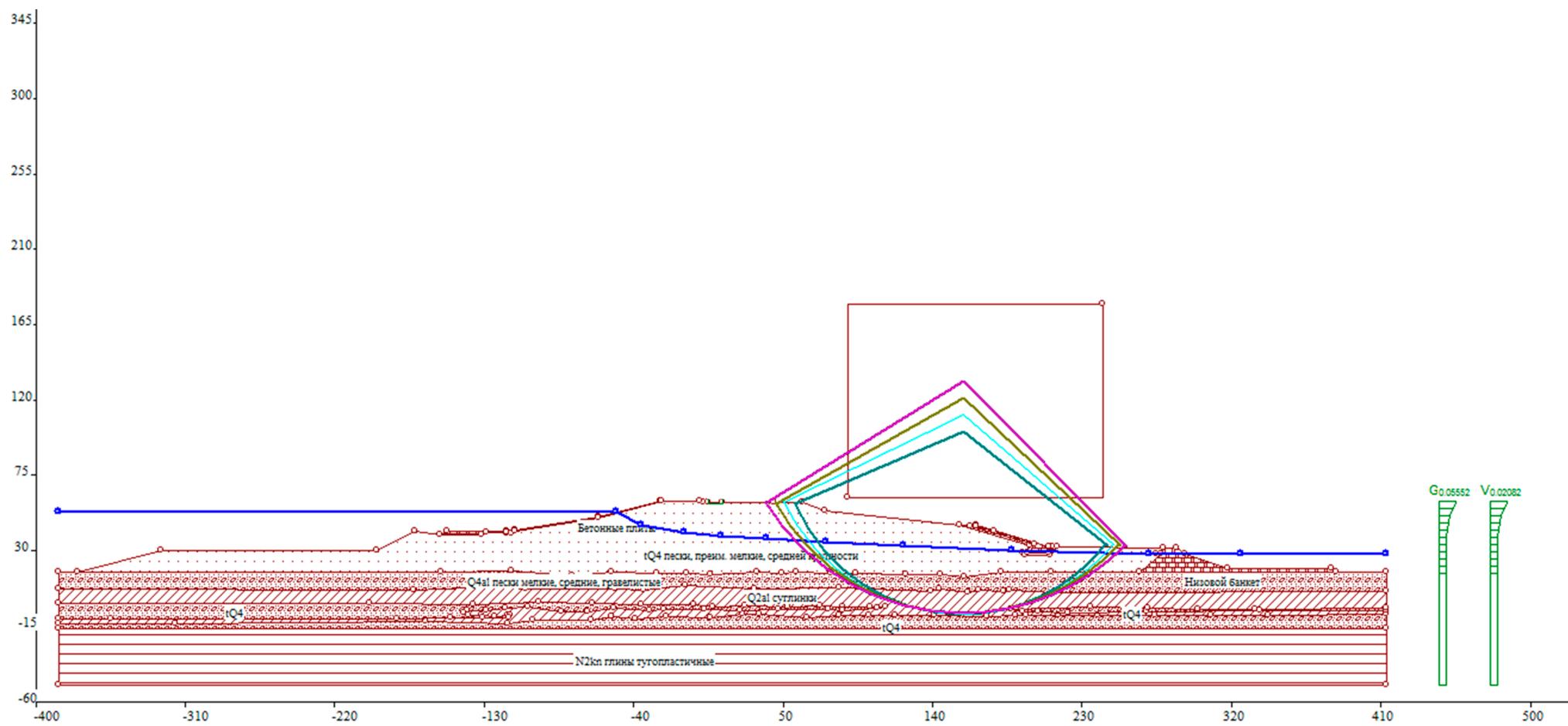


Рисунок 1.6.2 Сечение I-I, расчёты устойчивости низового откоса на основное и особое сочетание нагрузок

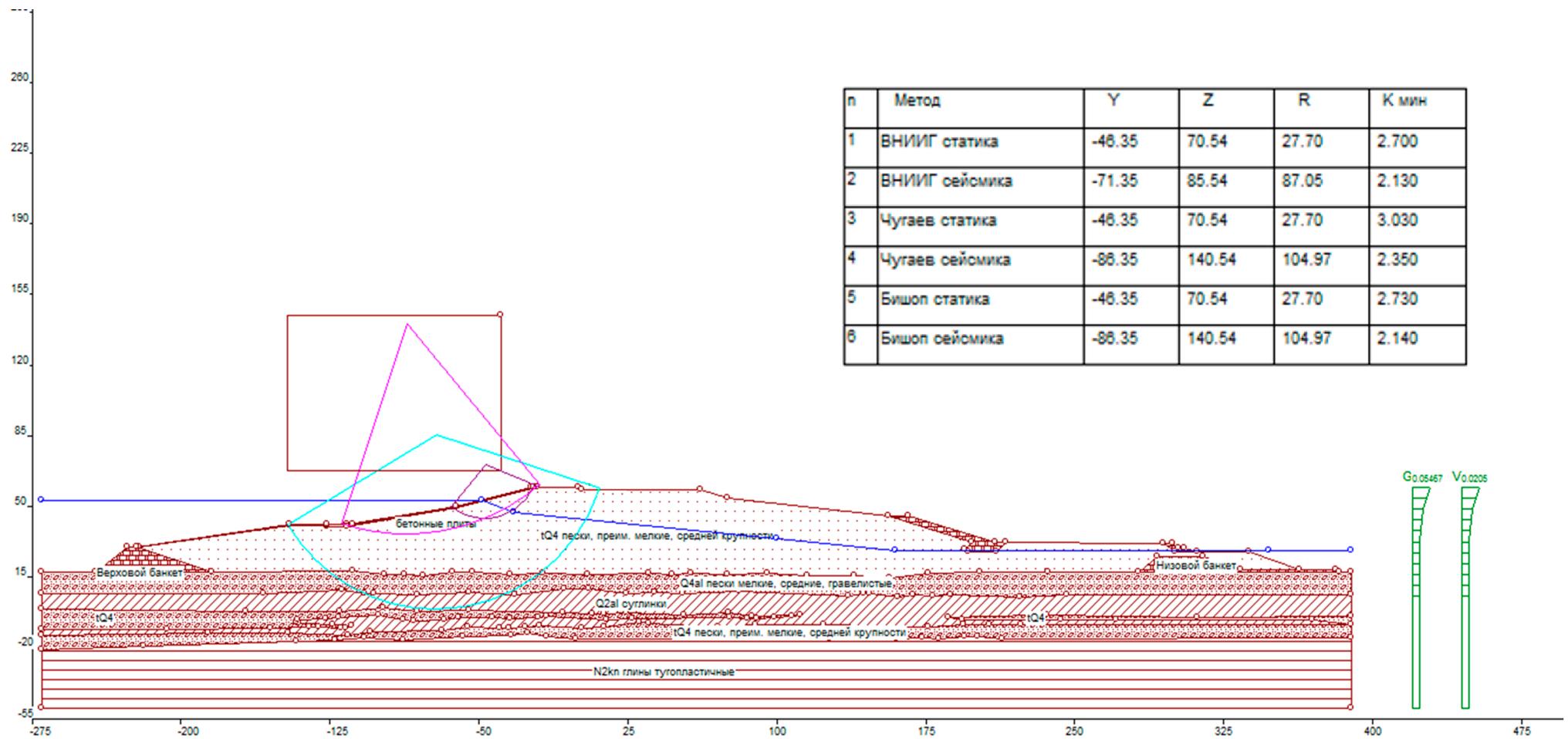


Рисунок 1.6.3 Сечение II-II, расчёты устойчивости верхового откоса на основное и особое сочетание нагрузок

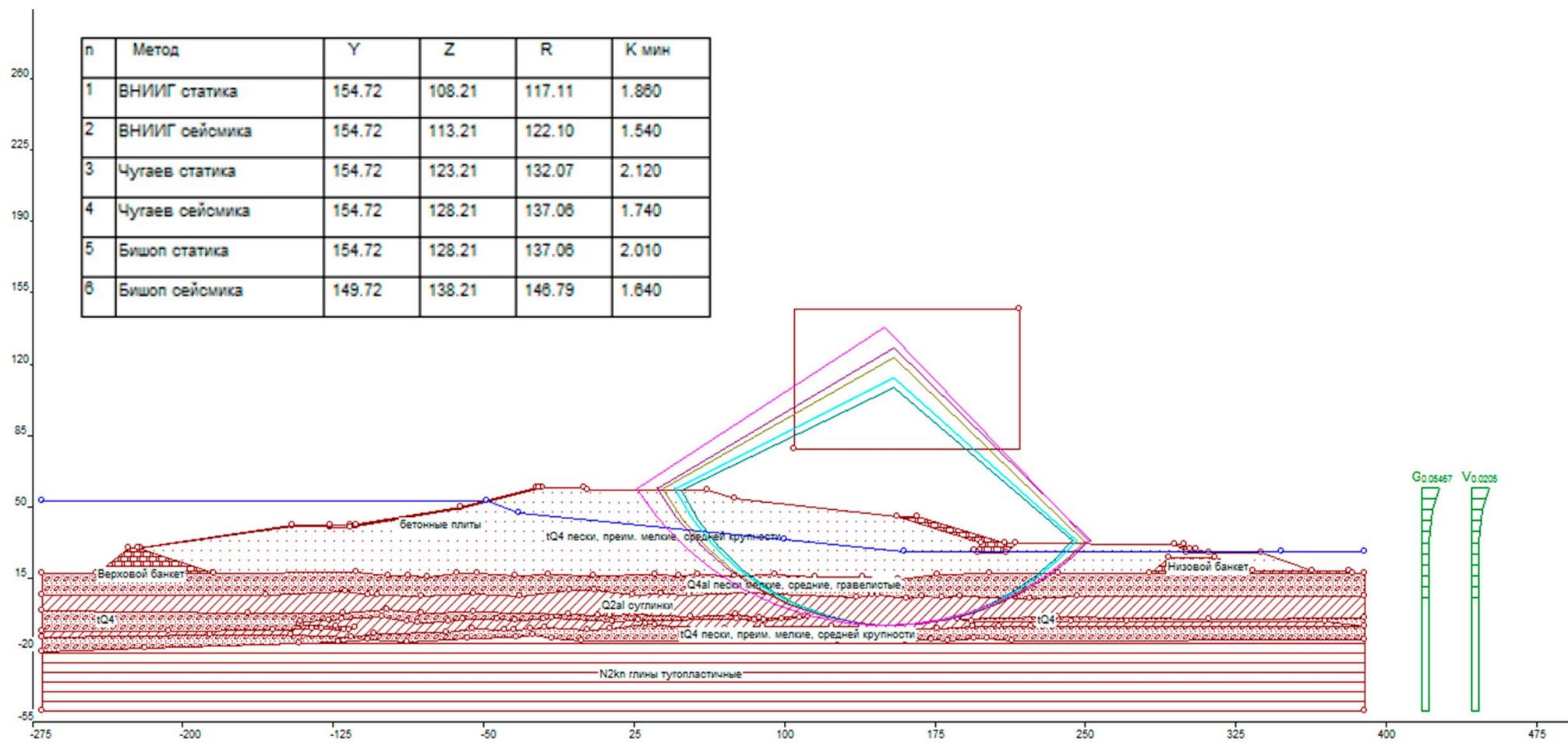


Рисунок 1.6.4 Сечение II-II, расчёты устойчивости низового откоса на основное и особое сочетание нагрузок

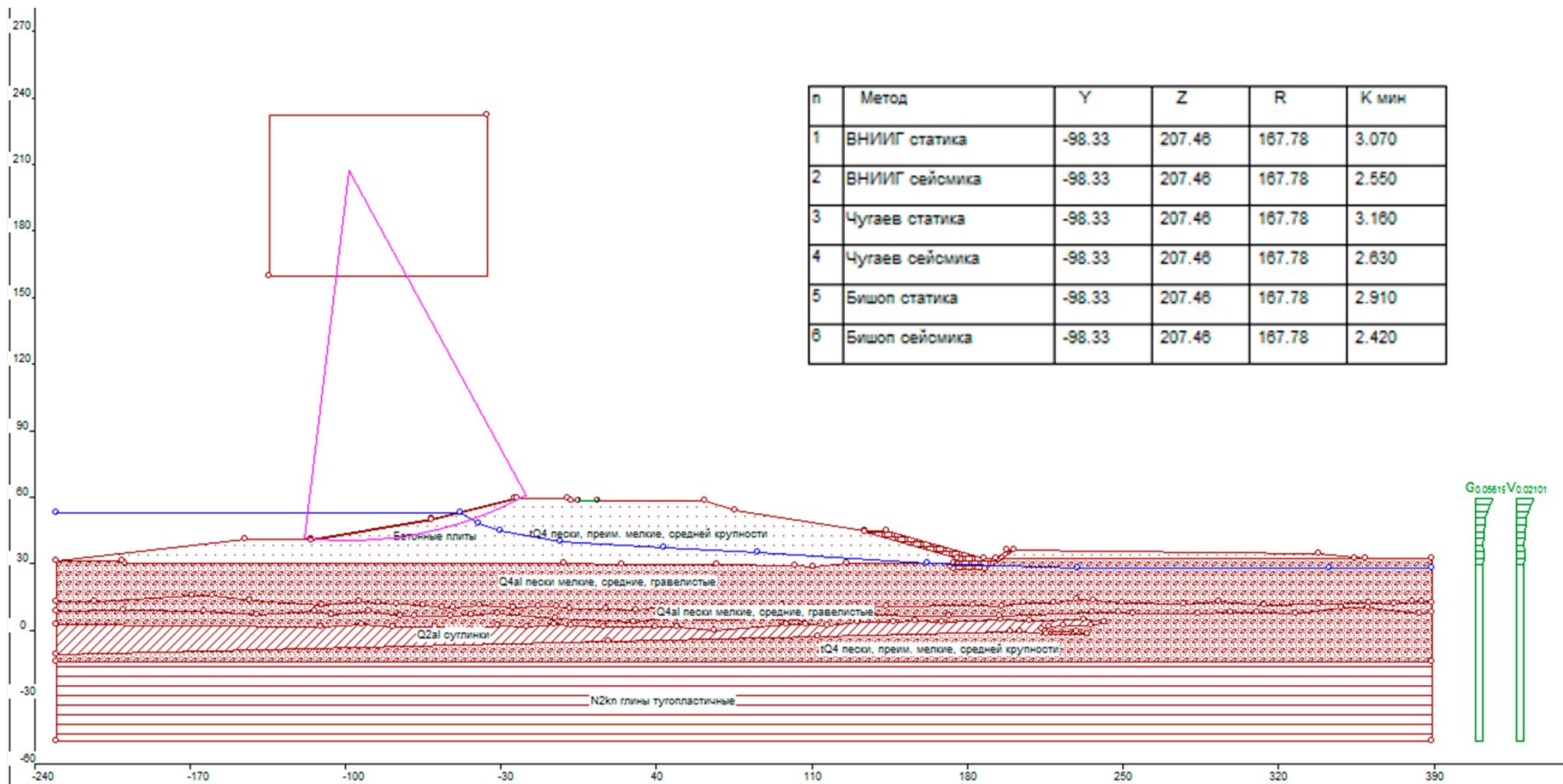


Рисунок 1.6.5 Сечение III-III, расчёты устойчивости верхового откоса на основное и особое сочетание нагрузок

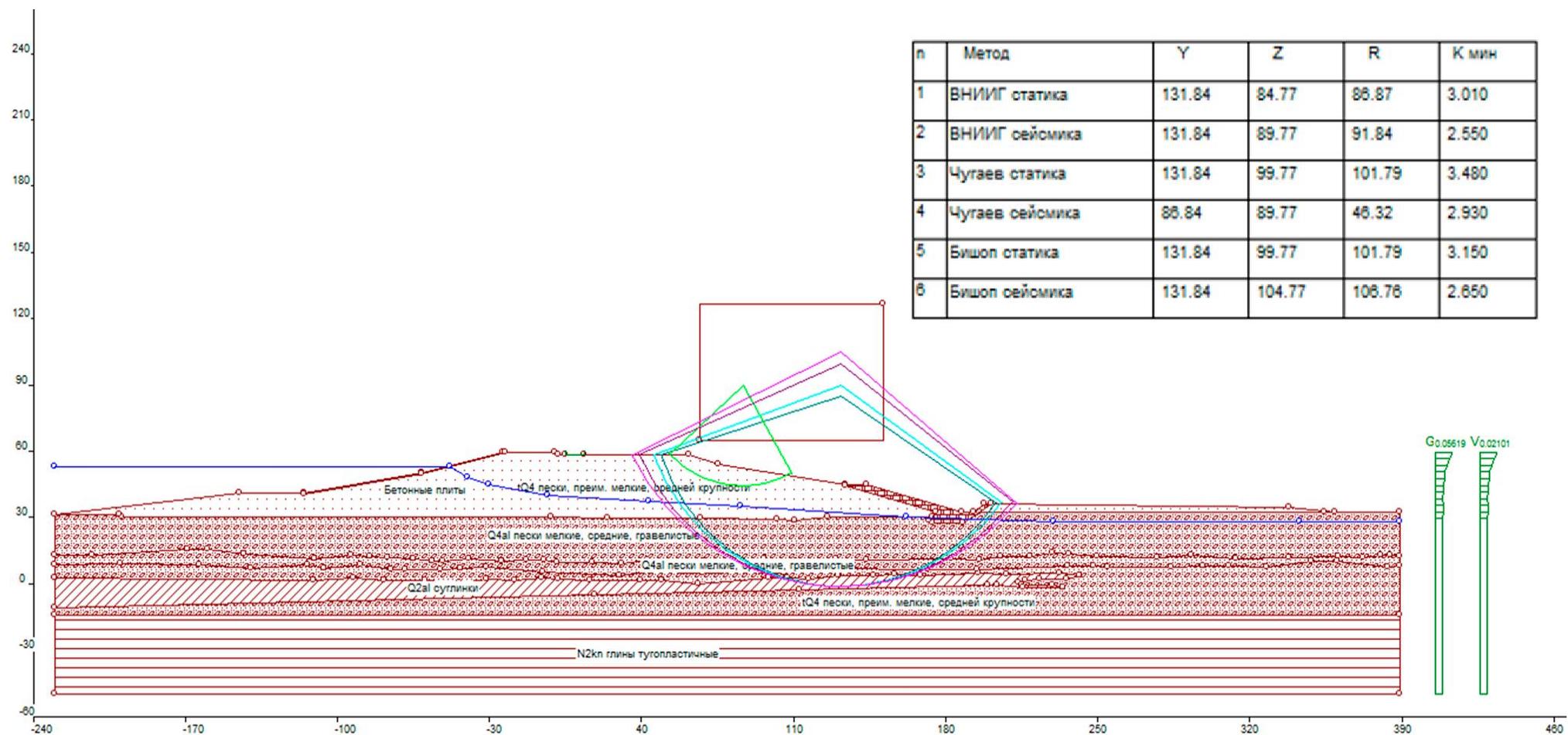


Рисунок 1.6.6 Сечение III-III, расчёты устойчивости низового откоса на основное и особое сочетание нагрузок

**Таблица 1.6.1**

Результаты расчётов устойчивости **верхового** откоса грунтовой плотины  
Жигулёвской ГЭС, сечение I-I

метод	сочетание	координаты R		R	K <sub>мин</sub>	K <sub>норм</sub>
		Y	Z			
ВНИИГ	статика	-131.88	151.73	153.24	2.910	1.316
ВНИИГ	сейсмика	-131.88	151.73	153.24	2.110	1.118
Чугаев	статика	-131.88	166.73	168.24	3.210	1.316
Чугаев	сейсмика	-136.88	166.73	168.23	2.320	1.118
Бишоп	статика	-91.88	166.73	129.62	2.970	1.316
Бишоп	сейсмика	-136.88	171.73	173.23	2.150	1.118

**Таблица 1.6.2**

Результаты расчётов устойчивости **низового** откоса грунтовой плотины  
Жигулёвской ГЭС, сечение I-I

метод	сочетание	координаты R		R	K <sub>мин</sub>	K <sub>норм</sub>
		Y	Z			
ВНИИГ	статика	158.98	101.31	110.43	1.860	1.316
ВНИИГ	сейсмика	158.98	111.31	120.4	1.540	1.118
Чугаев	статика	158.98	121.31	129.42	2.130	1.316
Чугаев	сейсмика	158.98	131.31	139.40	1.750	1.118
Бишоп	статика	158.98	131.31	139.40	2.010	1.316
Бишоп	сейсмика	158.98	131.31	139.40	1.650	1.118

Таблица 1.6.3

Результаты расчётов устойчивости **верхового** откоса грунтовой плотины  
Жигулёвской ГЭС, сечение II-II

метод	сочетание	координаты R		R	K <sub>мин</sub>	K <sub>норм</sub>
		Y	Z			
ВНИИГ	статика	-46.35	70.54	27.70	2.700	1.316
ВНИИГ	сейсмика	-71.35	85.54	87.05	2.130	1.118
Чугаев	статика	-46.35	70.54	27.70	3.030	1.316
Чугаев	сейсмика	-86.35	140.54	104.97	2.350	1.118
Бишоп	статика	-46.35	70.54	27.70	2.730	1.316
Бишоп	сейсмика	-86.35	140.54	104.97	2.140	1.118

Таблица 1.6.4

Результаты расчётов устойчивости **низового** откоса грунтовой плотины  
Жигулёвской ГЭС, сечение II-II

метод	сочетание	координаты R		R	K <sub>мин</sub>	K <sub>норм</sub>
		Y	Z			
ВНИИГ	статика	154.72	108.21	117.11	1.860	1.316
ВНИИГ	сейсмика	154.72	113.21	122.1	1.540	1.118
Чугаев	статика	154.72	123.21	132.07	2.120	1.316
Чугаев	сейсмика	154.72	128.21	137.06	1.740	1.118
Бишоп	статика	154.72	128.21	137.06	2.010	1.316
Бишоп	сейсмика	149.72	138.21	146.79	1.640	1.118

Таблица 1.6.5

Результаты расчётов устойчивости **верхового** откоса грунтовой плотины  
Жигулёвской ГЭС, сечение III-III

метод	сочетание	координаты R		R	K <sub>мин</sub>	K <sub>норм</sub>
		Y	Z			
ВНИИГ	статика	-98.33	207.46	167.78	3.070	1.316
ВНИИГ	сейсмика	-98.33	207.46	167.78	2.550	1.118
Чугаев	статика	-98.33	207.46	167.78	3.160	1.316
Чугаев	сейсмика	-98.33	207.46	167.78	2.630	1.118
Бишоп	статика	-98.33	207.46	167.78	2.910	1.316
Бишоп	сейсмика	-98.33	207.46	167.78	2.420	1.118

Таблица 1.6.6

Результаты расчётов устойчивости **низового** откоса грунтовой плотины  
Жигулёвской ГЭС, сечение III-III

метод	сочетание	координаты R		R	K <sub>мин</sub>	K <sub>норм</sub>
		Y	Z			
ВНИИГ	статика	131.84	84.77	86.87	3.010	1.316
ВНИИГ	сейсмика	131.84	89.77	91.84	2.550	1.118
Чугаев	статика	131.84	99.77	101.79	3.480	1.316
Чугаев	сейсмика	86.84	89.77	46.32	2.930	1.118
Бишоп	статика	131.84	99.77	101.79	3.150	1.316
Бишоп	сейсмика	131.84	104.77	106.76	2.650	1.118

Минимальные значения  $K_n$  верхового откоса для Сечения I-I при статических нагрузках получены методом ВНИИГ и составляют 2,910, что на 121,1% больше требуемого нормативного значения 1,316. Минимальные значения  $K_n$  низового откоса получены методом ВНИИГ и составляют 1,860, что на 41,3% больше требуемого нормативного значения 1,316.

Минимальные значения  $K_n$  верхового откоса для Сечения I-I при **сейсмической** нагрузке получены методом ВНИИГ и составляют 2,110, что на 88,7% больше требуемого нормативного значения 1,118. Минимальные

значения  $K_n$  низового откоса, получены методом ВНИИГ и составляют 1,540, что на 37,7% больше требуемого нормативного значения 1,118.

Минимальные значения  $K_n$  верхового откоса для Сечения II-II при статических нагрузках получены методом ВНИИГ и составляют 2,700, что на 105,2% больше требуемого нормативного значения 1,316. Минимальные значения  $K_n$  низового откоса, получены методом ВНИИГ и составляют 1,860, что на 41,3% больше требуемого нормативного значения 1,316.

Минимальные значения  $K_n$  верхового откоса для Сечения II-II при **сейсмической** нагрузке, получены методом ВНИИГ и составляют 2,130, что на 90,5% больше требуемого нормативного значения 1,118. Минимальные значения  $K_n$  низового откоса, получены методом ВНИИГ и составляют 1,540, что на 37,7% больше требуемого нормативного значения 1,118.

Минимальные значения  $K_n$  верхового откоса для Сечения III-III при статических нагрузках получены методом Бишопа и составляют 2,910, что на 121,1% больше требуемого нормативного значения 1,316. Минимальные значения  $K_n$  низового откоса, получены методом ВНИИГ и составляют 3,010, что на 128,7% больше требуемого нормативного значения 1,316.

Минимальные значения  $K_n$  верхового откоса для Сечения III-III при **сейсмической** нагрузке получены методом Бишопа и составляют 2,420, что на 116,5% больше требуемого нормативного значения 1,118. Минимальные значения  $K_n$  низового откоса, получены методом ВНИИГ- Терцаги и составляют 2,550, что на 128,1% больше требуемого нормативного значения 1,118.

## **1.7 Расчёты устойчивости откосов грунтовой плотины по программе «SLIDE»**

В расчётных исследованиях рассматривалось основное и особое сочетания нагрузок. Ниже на рисунках 1.7.1...1.7.12 приведены результаты расчётных исследований устойчивости по сечениям грунтовой плотины, а в таблицах 1.7.1 – 1.7.6 сведены данные по всем вариантам расчётов для верхового и низового откосов.

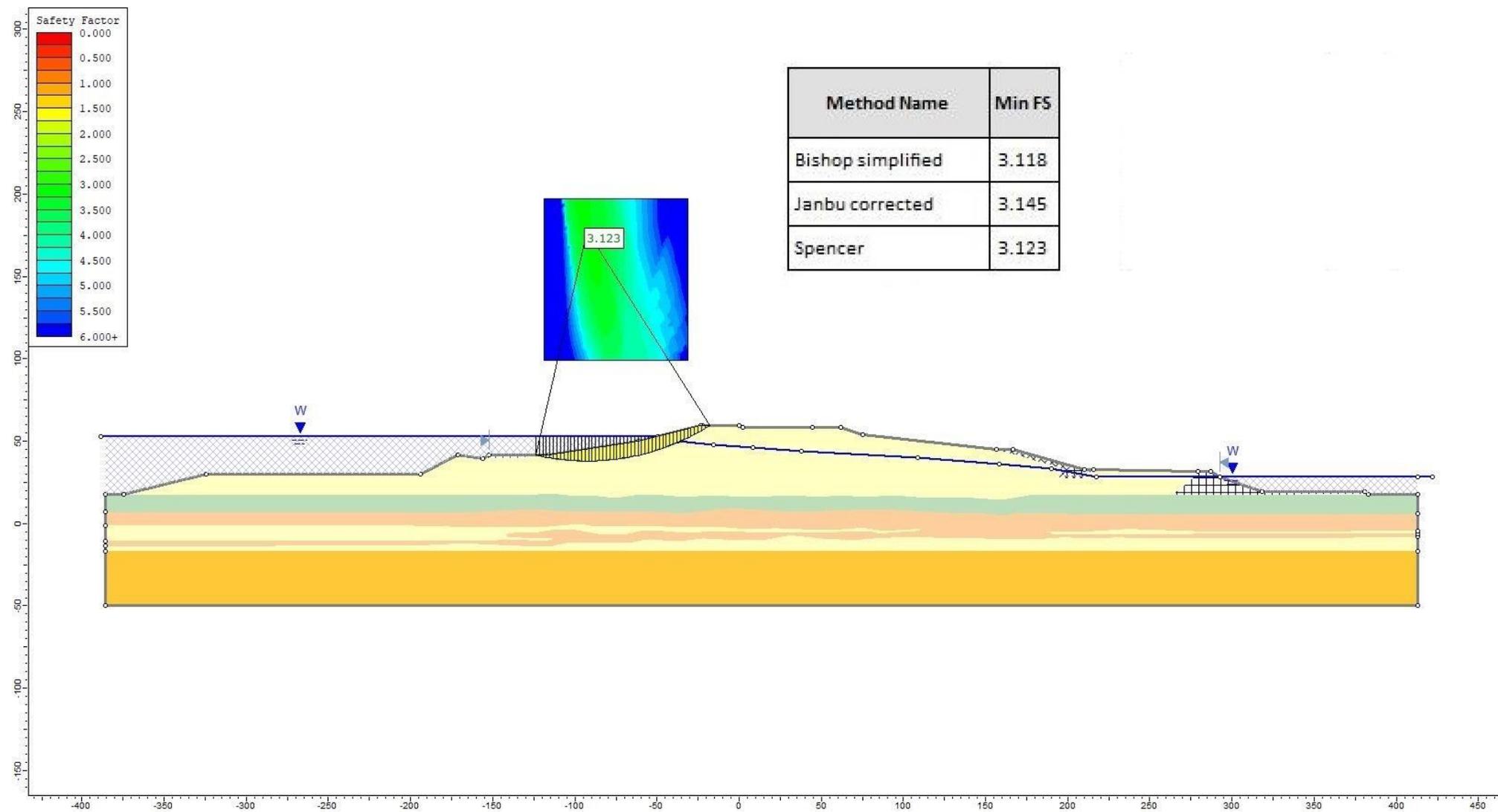


Рисунок 1.7.1 Сечение I-I, расчёты устойчивости верхнего откоса на основное сочетание нагрузок

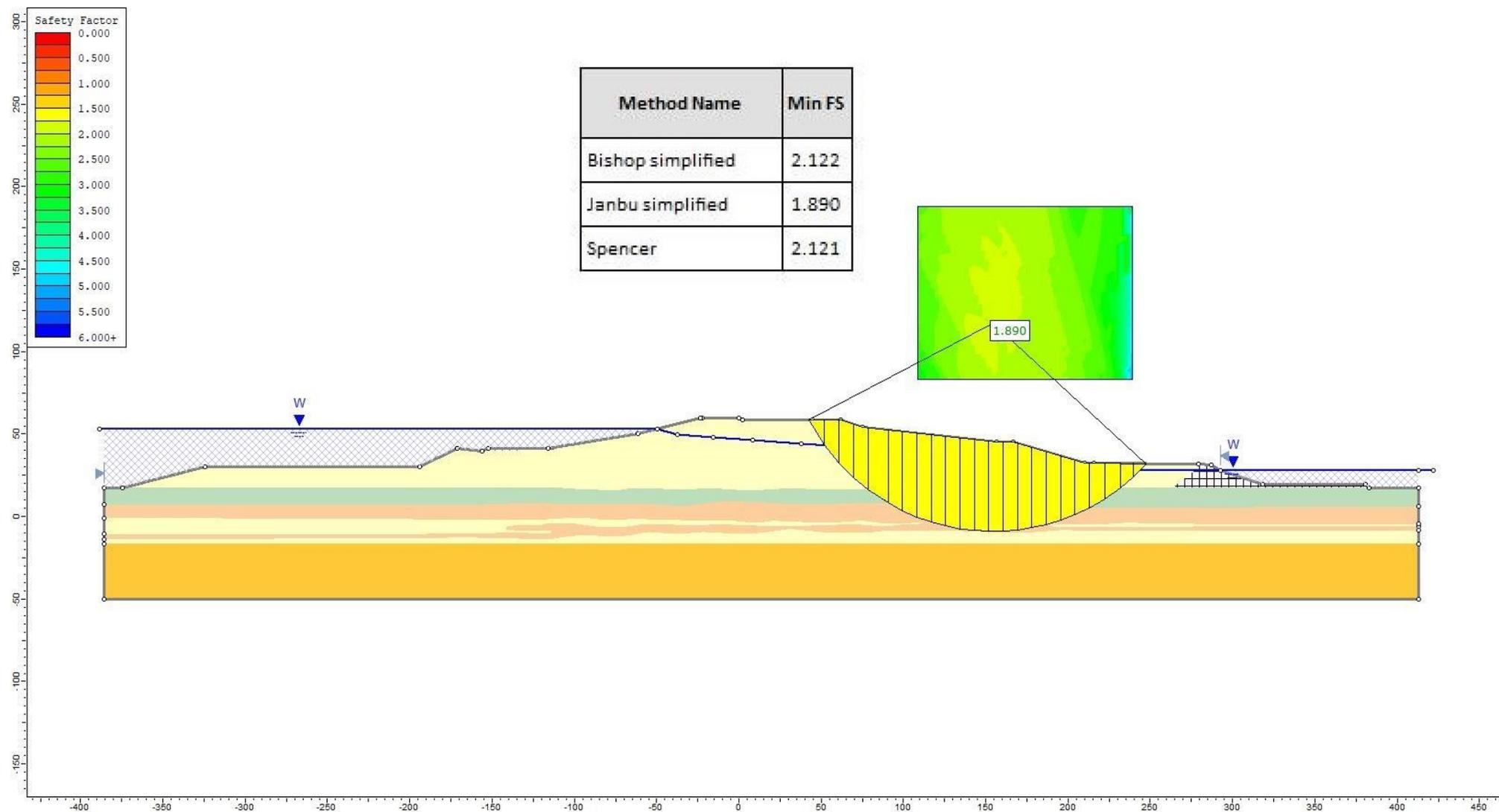


Рисунок 1.7.2 Сечение I-I, расчёты устойчивости низового откоса на основное сочетание нагрузок

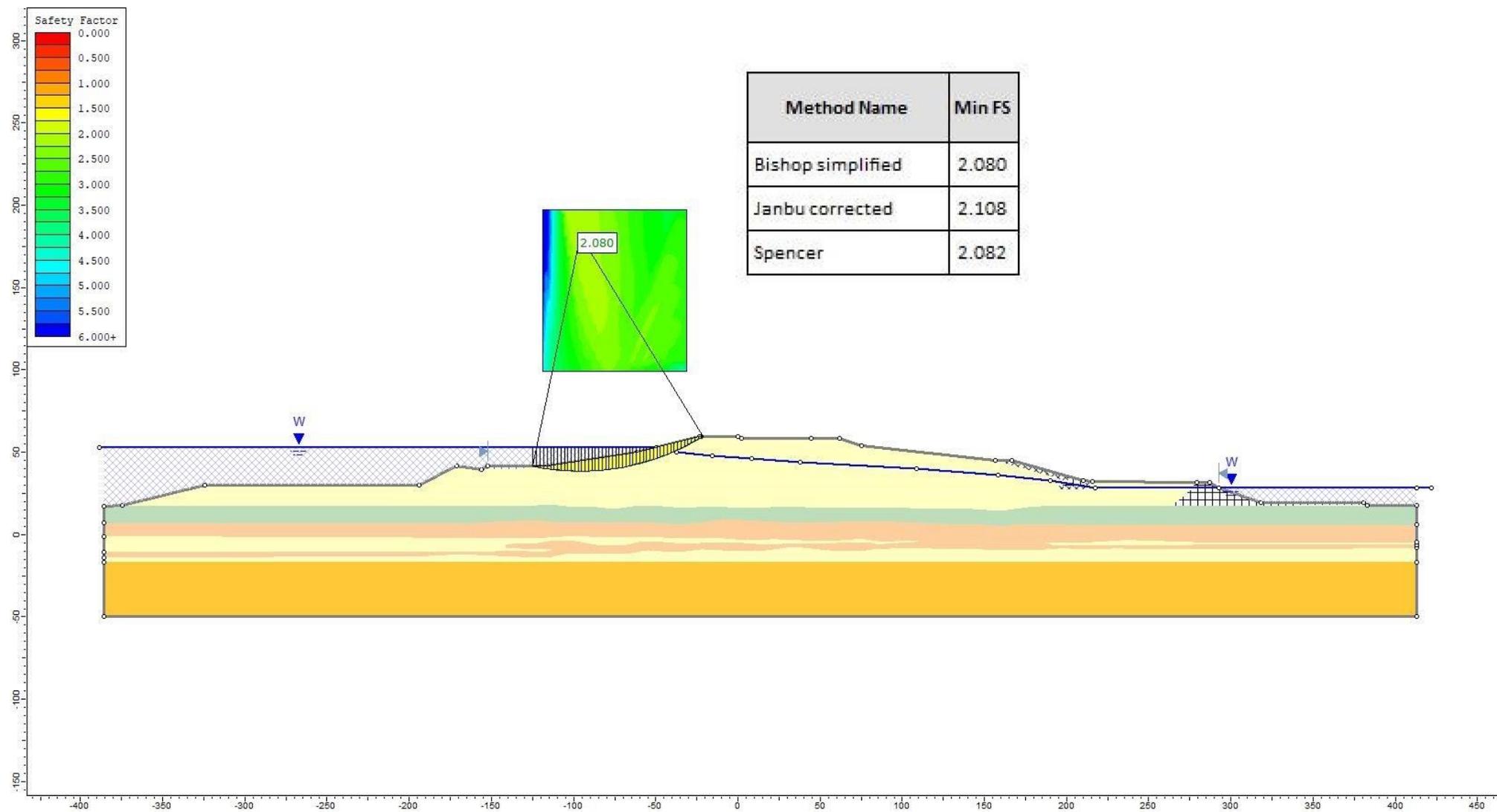


Рисунок 1.7.3 Сечение I-I, расчёты устойчивости верхового откоса на особое сочетание нагрузок

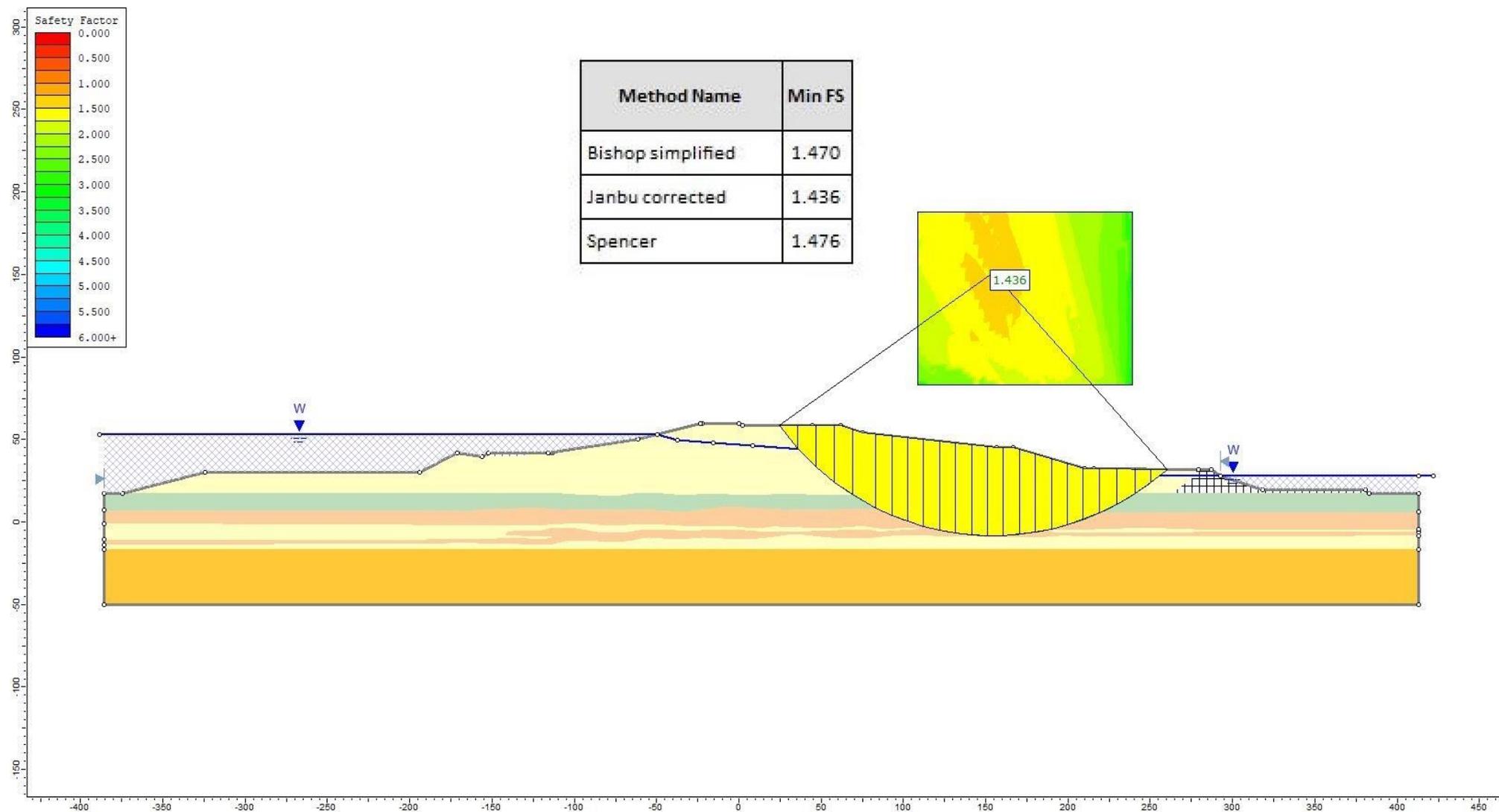


Рисунок 1.7.4 Сечение I-I, расчёты устойчивости низового откоса на особое сочетание нагрузок

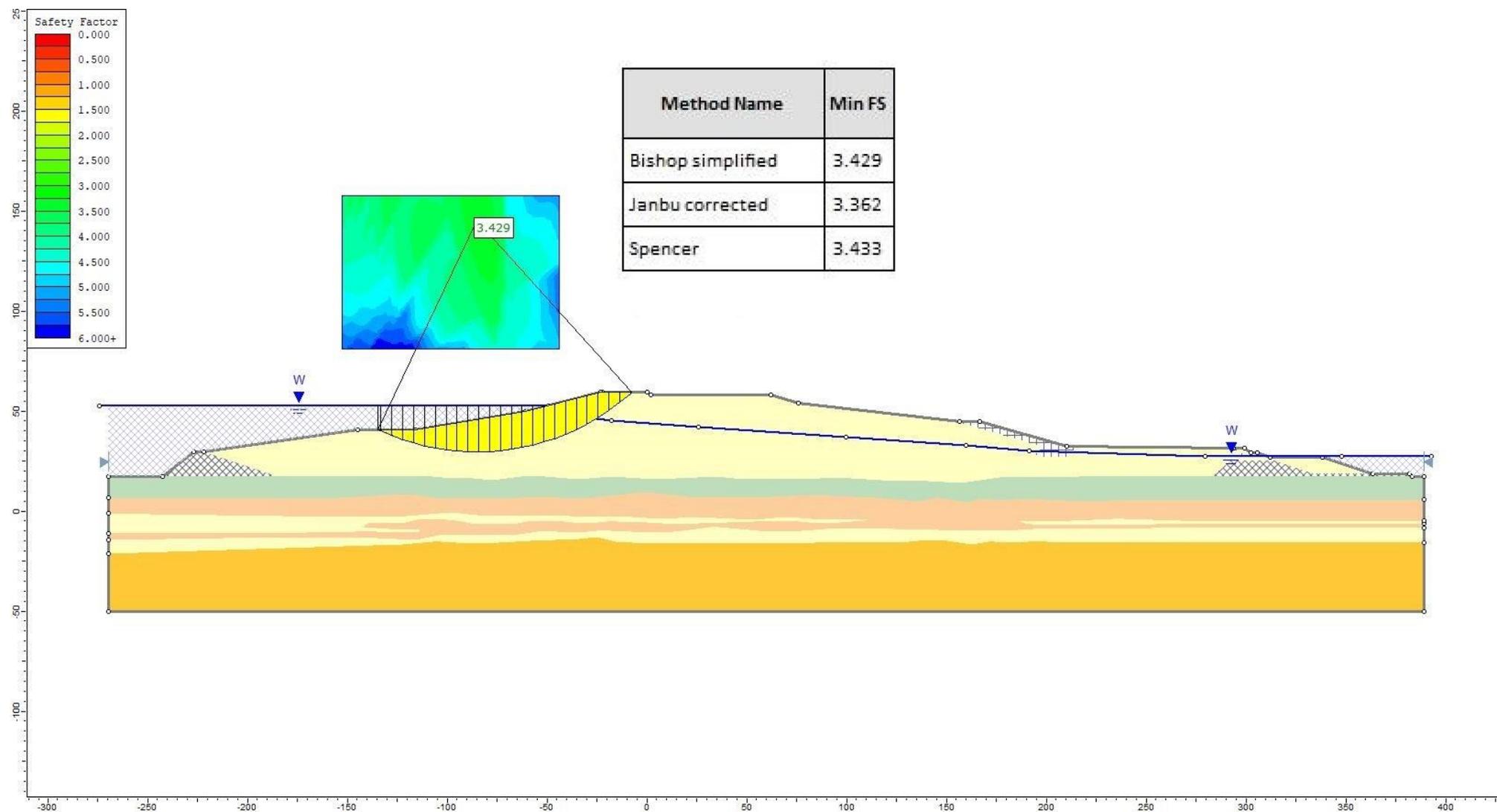


Рисунок 1.7.5 Сечение II-II, расчёты устойчивости верхового откоса на основное сочетание нагрузок

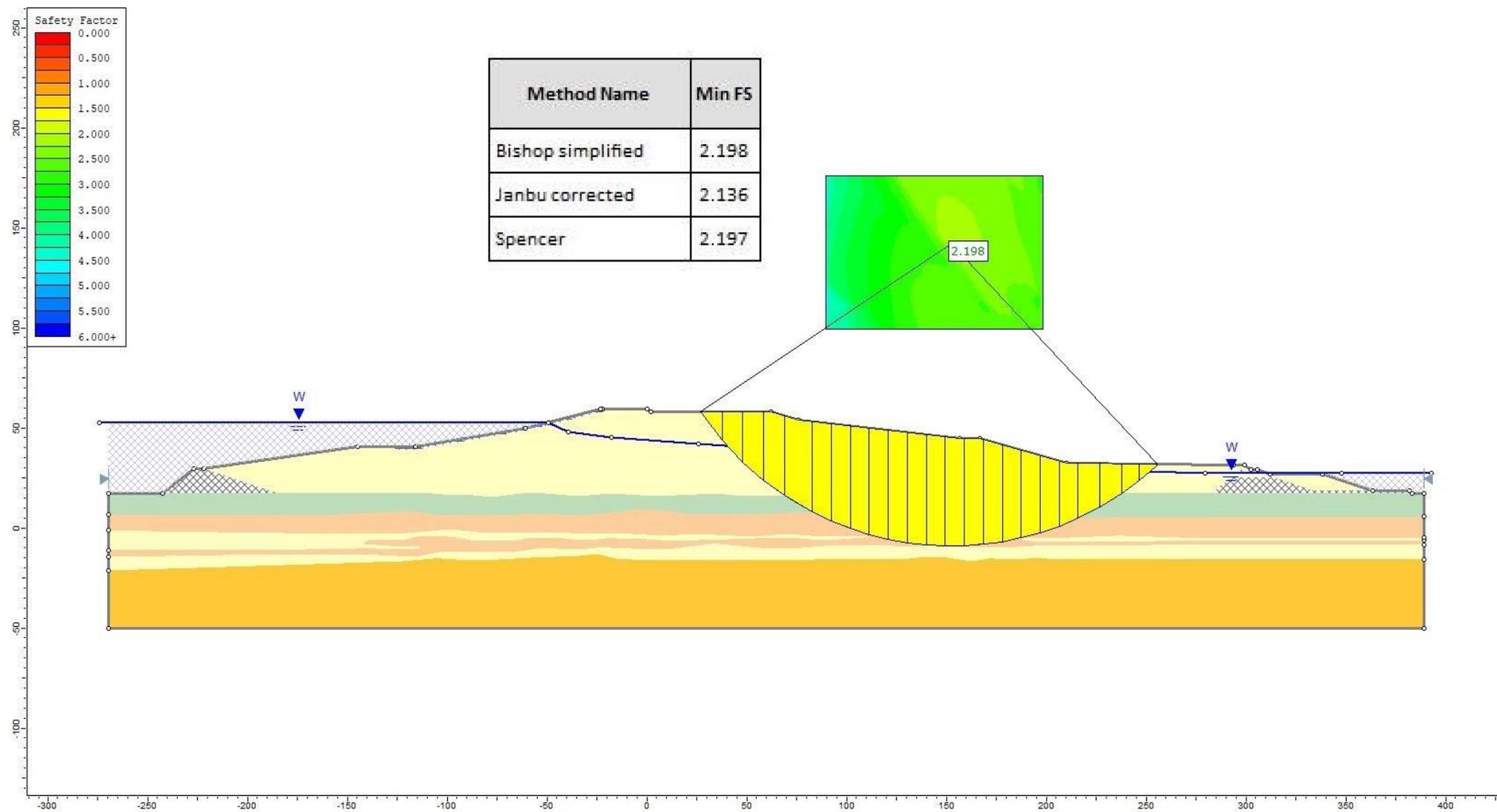


Рисунок 1.7.6 Сечение II-II, расчёты устойчивости низового откоса на основное сочетание нагрузок

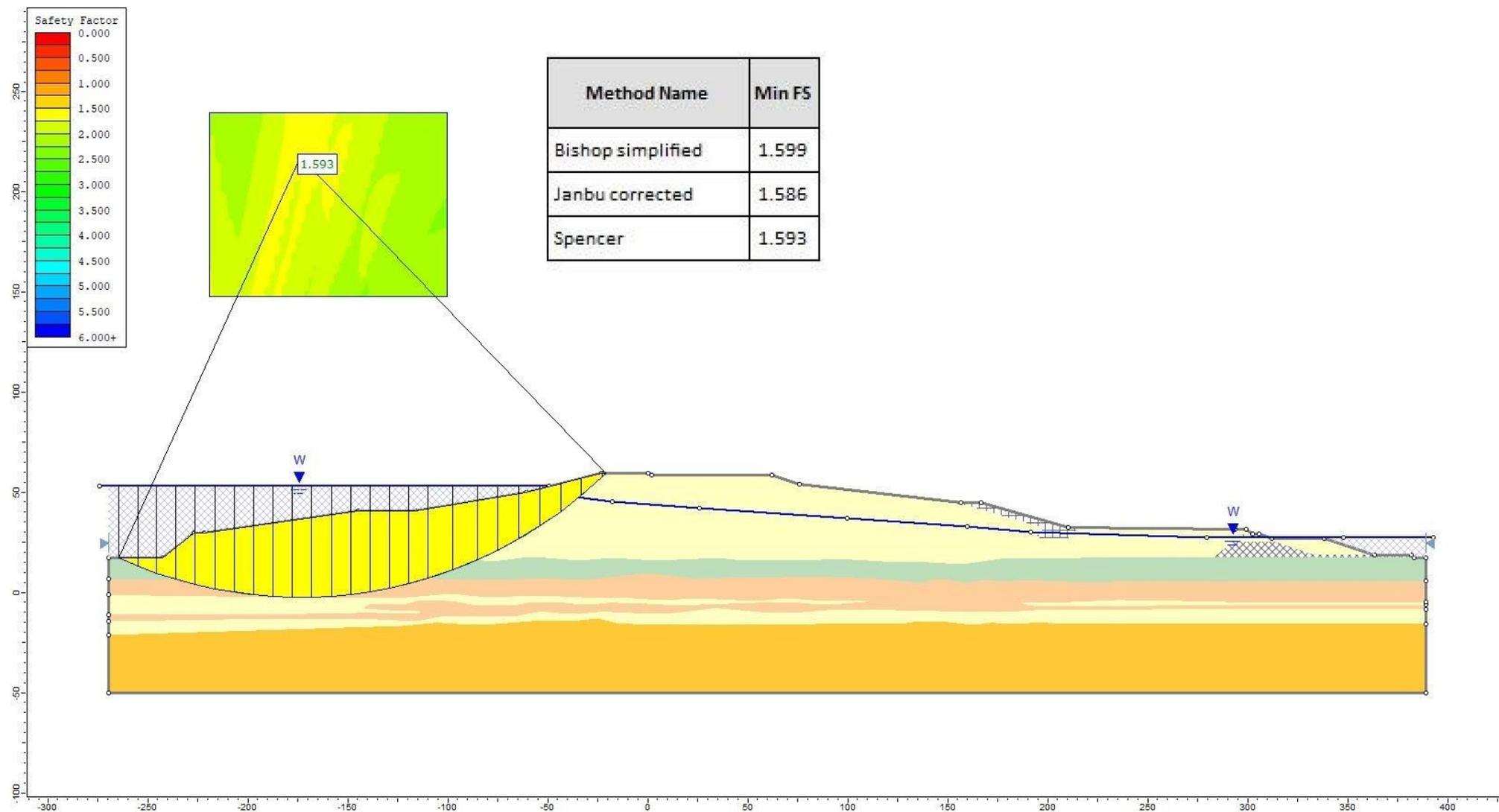


Рисунок 1.7.7 Сечение II-II, расчёты устойчивости верхового откоса на особое сочетание нагрузок

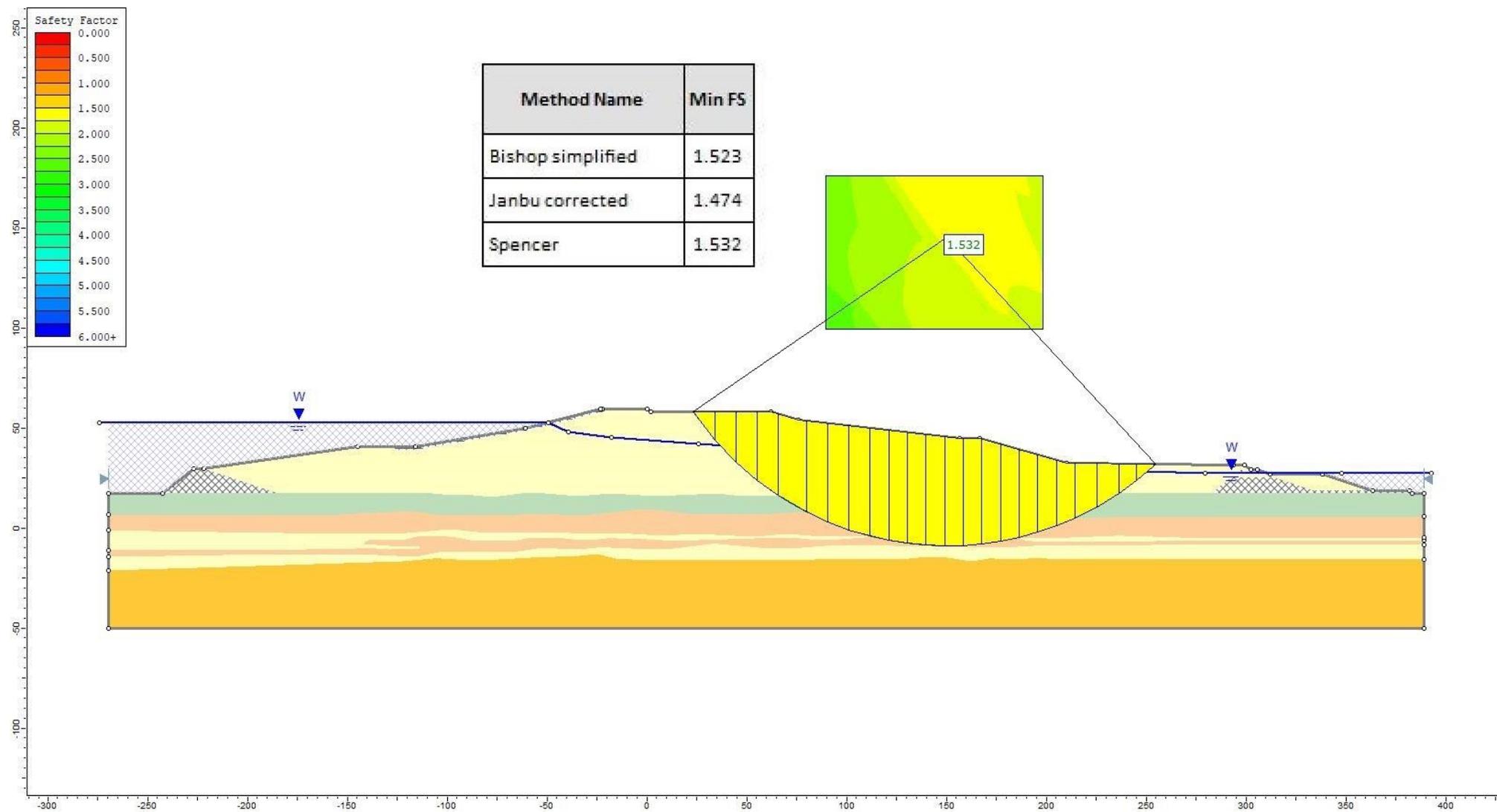


Рисунок 1.7.8 Сечение II-II, расчёты устойчивости низового откоса на особое сочетание нагрузок

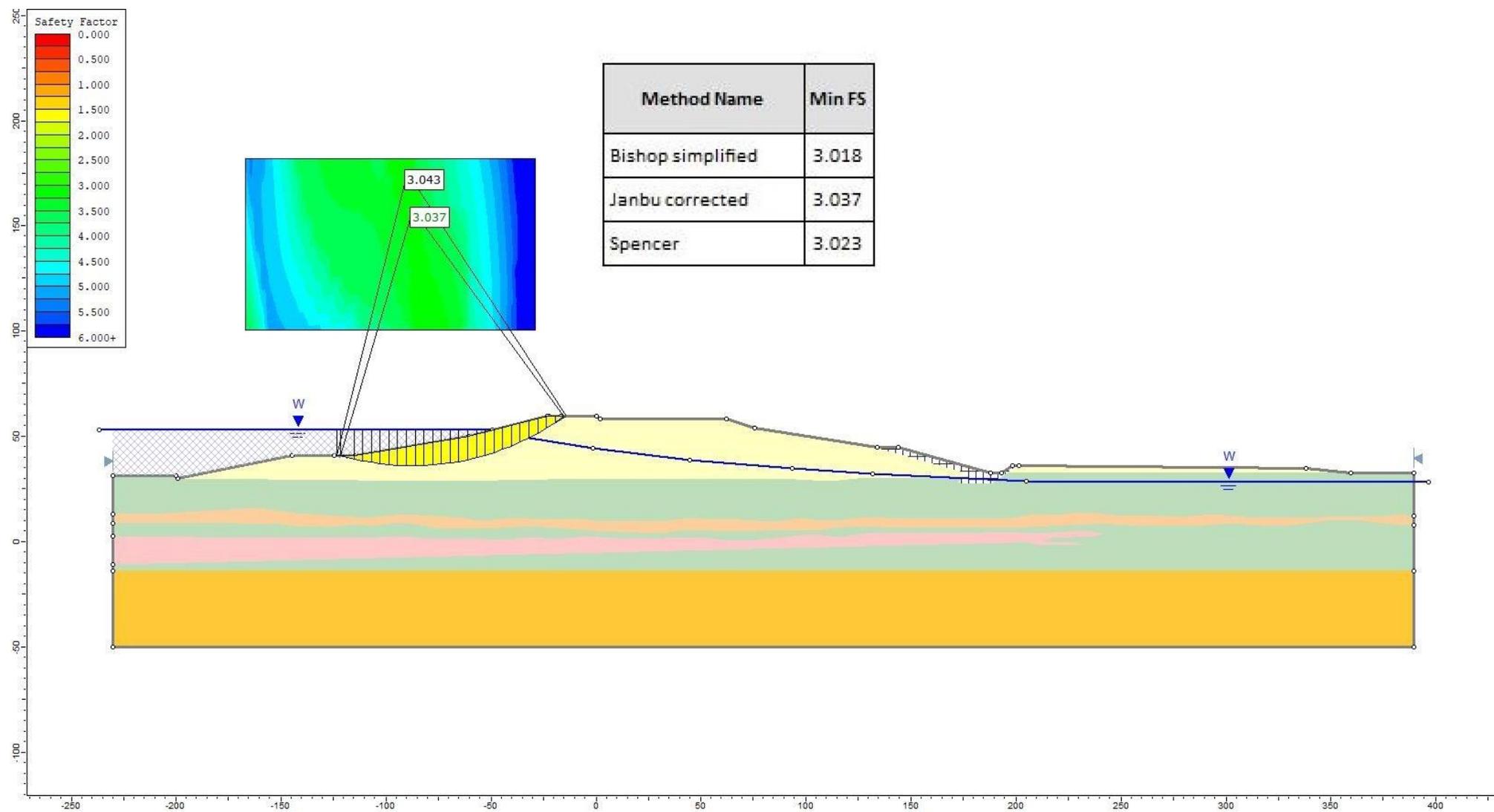


Рисунок 1.7.9 Сечение III-III, расчёты устойчивости верхового откоса на основное сочетание нагрузок

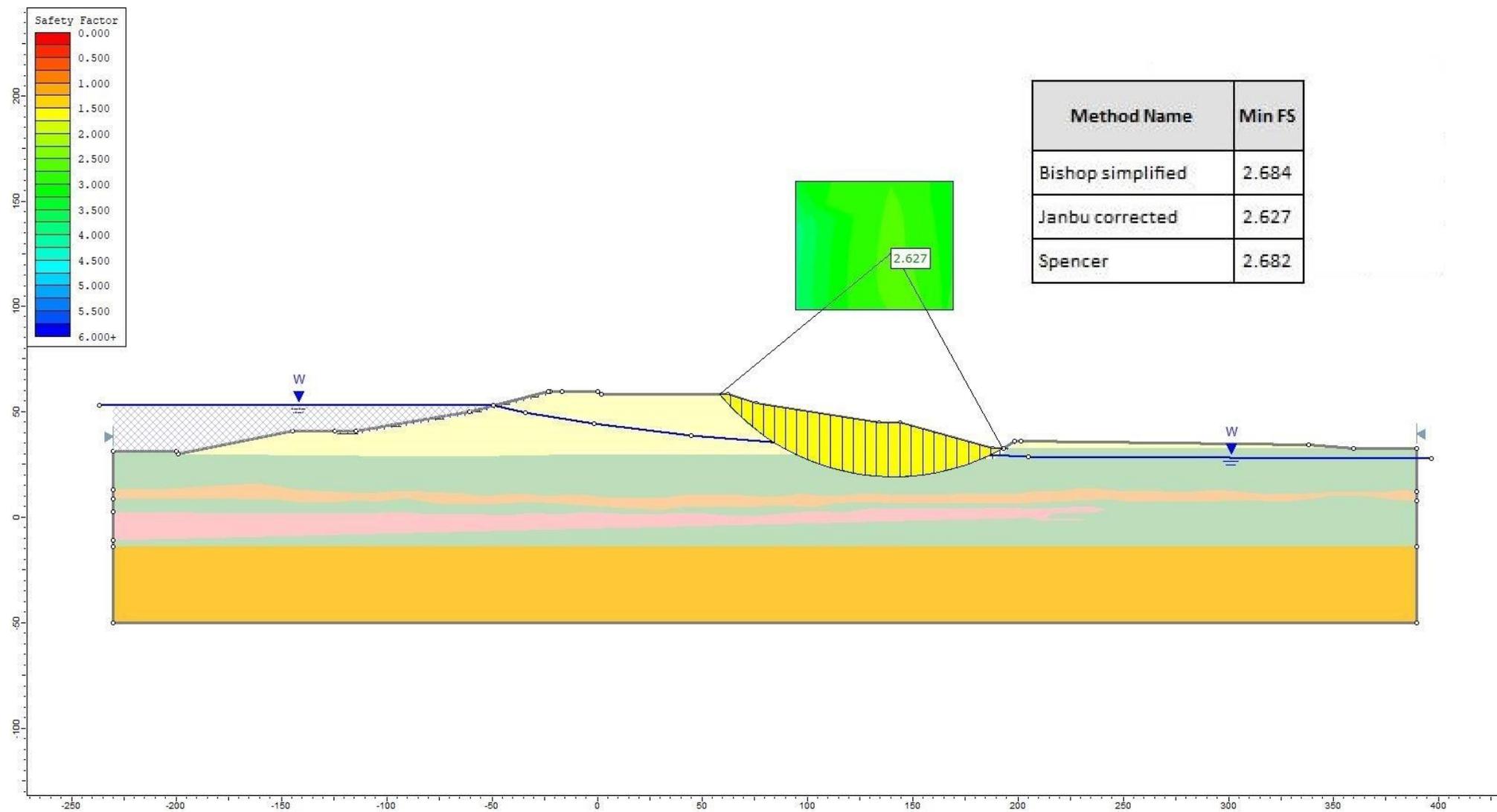


Рисунок 1.7.10 Сечение III-III, расчёты устойчивости низового откоса на основное сочетание нагрузок

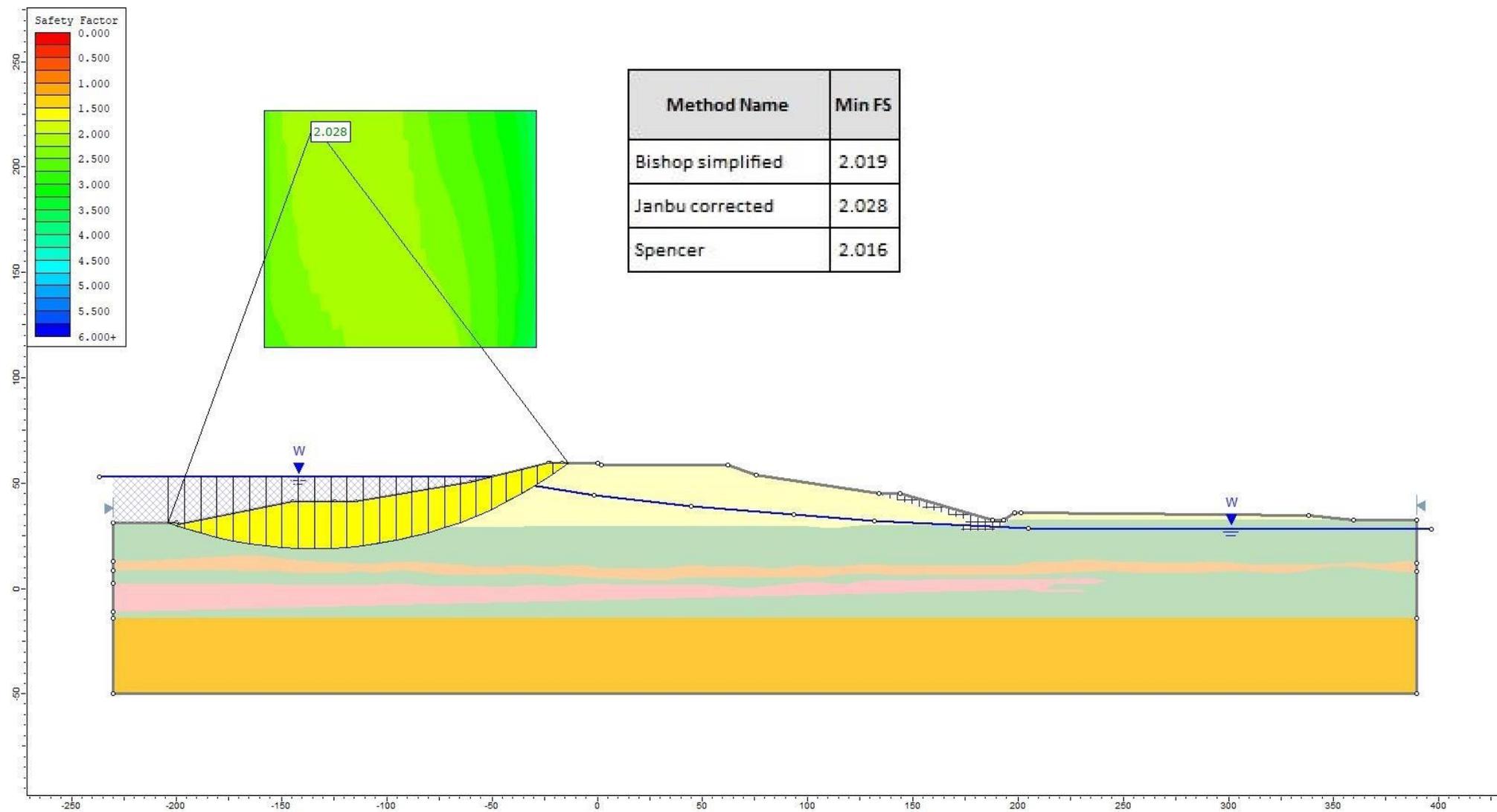


Рисунок 1.7.11 Сечение III-III, расчёты устойчивости верхового откоса на особое сочетание нагрузок

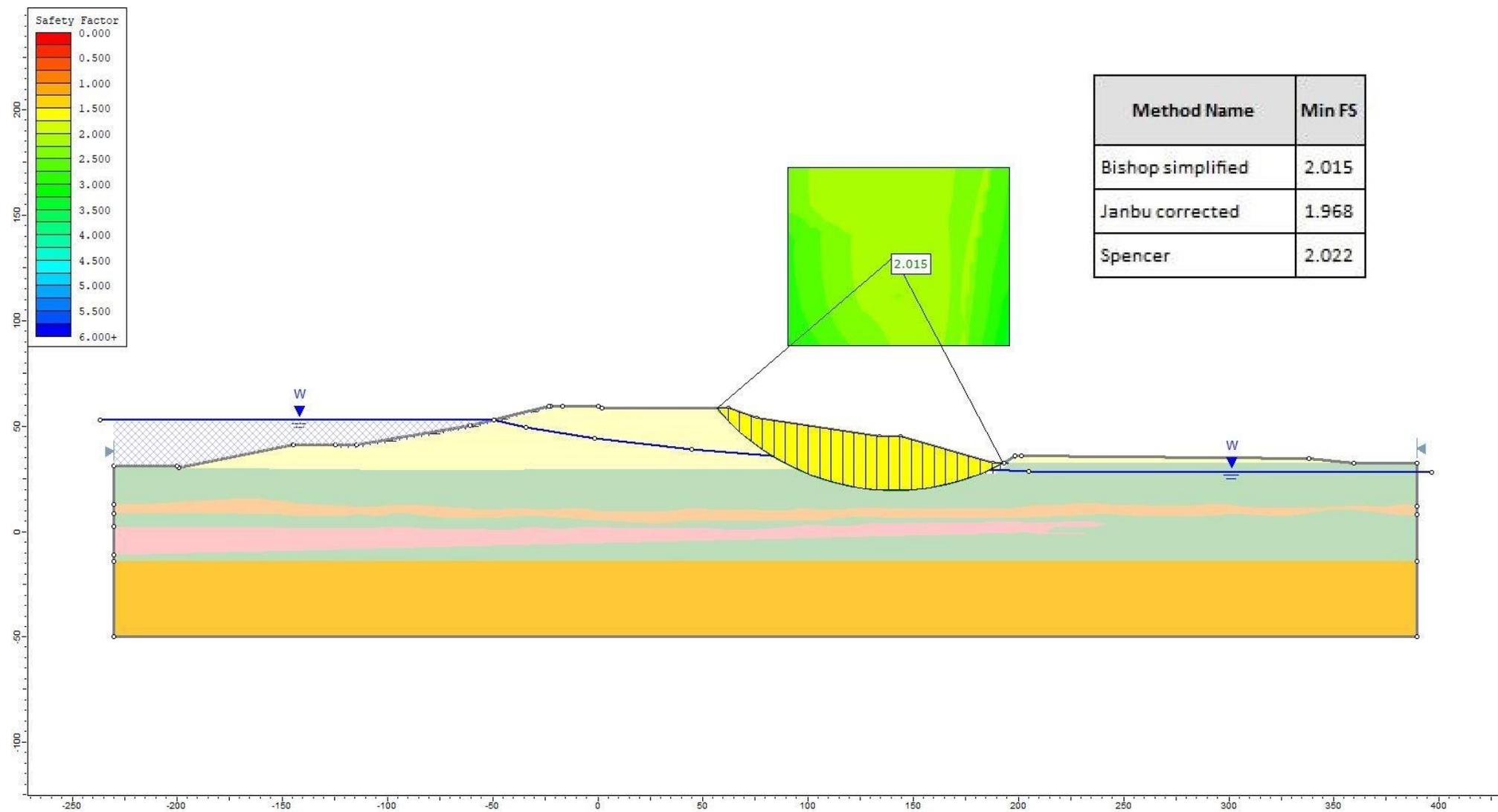


Рисунок 1.7.12 Сечение III-III, расчёты устойчивости низового откоса на особое сочетание нагрузок

Таблица 1.7.1

Результаты расчётов устойчивости **верхового** откоса грунтовой плотины  
Жигулёвской ГЭС, сечение I-I

метод	сочетание	координаты R		R	K <sub>мин</sub>	K <sub>норм</sub>
		Y	Z			
Bishop simplified	статика	-92,288	177,703	139,808	3,118	1,316
Bishop simplified	сейсмика	-95,790	181,634	143,154	2,080	1,118
Janbu corrected	статика	-92,288	177,703	139,808	3,145	1,316
Janbu corrected	сейсмика	-94,039	179,668	141,472	2,108	1,118
Spencer	статика	-92,288	177,703	139,808	3,123	1,316
Spencer	сейсмика	-94,039	179,668	141,472	2,082	1,118

Таблица 1.7.2

Результаты расчётов устойчивости **низового** откоса грунтовой плотины  
Жигулёвской ГЭС, сечение I-I

метод	сочетание	координаты R		R	K <sub>мин</sub>	K <sub>норм</sub>
		Y	Z			
Bishop simplified	статика	154,459	151,139	159,488	2,122	1,316
Bishop simplified	сейсмика	154,459	185,126	193,04	1,470	1,118
Janbu corrected	статика	154,459	117,153	126,277	1,890	1,316
Janbu corrected	сейсмика	154,459	151,139	159,488	1,436	1,118
Spencer	статика	154,459	151,139	159,488	2,121	1,316
Spencer	сейсмика	154,459	185,126	193,041	1,476	1,118

**Таблица 1.7.3**

Результаты расчётов устойчивости **верхового** откоса грунтовой плотины  
Жигулёвской ГЭС, сечение II-II

метод	сочетание	координаты R		R	K <sub>мин</sub>	K <sub>норм</sub>
		Y	Z			
Bishop simplified	статика	-85,175	145,549	115,792	3,429	1,316
Bishop simplified	сейсмика	-173,994	217,461	219,688	1,599	1,118
Janbu corrected	статика	-78,656	114,810	87,366	3,362	1,316
Janbu corrected	сейсмика	-173,994	217,461	219,688	1,586	1,118
Spencer	статика	-85,175	145,549	115,792	3,433	1,316
Spencer	сейсмика	-173,994	217,461	219,688	1,593	1,118

**Таблица 1.7.4**

Результаты расчётов устойчивости **низового** откоса грунтовой плотины  
Жигулёвской ГЭС, сечение II-II

метод	сочетание	координаты R		R	K <sub>мин</sub>	K <sub>норм</sub>
		Y	Z			
Bishop simplified	статика	152,360	142,382	151,200	2,198	1,316
Bishop simplified	сейсмика	150,187	145,456	154,190	1,523	1,118
Janbu corrected	статика	152,360	140,845	149,933	2,136	1,316
Janbu corrected	сейсмика	152,360	142,382	151,200	1,474	1,118
Spencer	статика	152,360	142,382	151,200	2,197	1,316
Spencer	сейсмика	150,187	145,456	154,190	1,532	1,118

Таблица 1.7.5

Результаты расчётов устойчивости **верхового** откоса грунтовой плотины  
Жигулёвской ГЭС, сечение III-III

метод	сочетание	координаты R		R	K <sub>мин</sub>	K <sub>норм</sub>
		Y	Z			
Bishop simplified	статика	-89,961	175,374	138,472	3,018	1,316
Bishop simplified	сейсмика	-137,532	226,915	206,729	2,019	1,118
Janbu corrected	статика	-87,201	157,454	121,429	3,037	1,316
Janbu corrected	сейсмика	-134,953	220,175	201,223	2,028	1,118
Spencer	статика	-92,722	181,890	144,794	3,023	1,316
Spencer	сейсмика	-137,532	226,915	206,729	2,016	1,118

Таблица 1.7.6

Результаты расчётов устойчивости **низового** откоса грунтовой плотины  
Жигулёвской ГЭС, сечение III-III

метод	сочетание	координаты R		R	K <sub>мин</sub>	K <sub>норм</sub>
		Y	Z			
Bishop simplified	статика	140,830	131,273	111,631	2,684	1,316
Bishop simplified	сейсмика	140,893	130,416	110,841	2,015	1,118
Janbu corrected	статика	140,830	126,392	107,185	2,627	1,316
Janbu corrected	сейсмика	140,893	125,325	106,207	1,968	1,118
Spencer	статика	140,830	131,273	111,161	2,682	1,316
Spencer	сейсмика	140,893	130,416	110,841	2,022	1,118

Минимальные значения  $K_n$  верхового откоса для Сечения I-I при статических нагрузках получены методом Bishop simplified и составляют 3,118, что на 136,9% больше требуемого нормативного значения 1,316. Минимальные значения  $K_n$  низового откоса, получены методом Janbu corrected и составляют 1,890, что на 43,6% больше требуемого нормативного значения 1,316.

Минимальные значения  $K_n$  верхового откоса для Сечения I-I при **сейсмической** нагрузке получены методом Bishop simplified и составляют 2,080, что на 86,1% больше требуемого нормативного значения 1,118. Минимальные значения  $K_n$  низового откоса, получены методом Janbu corrected

и составляют 1,436, что на 28,5% больше требуемого нормативного значения 1,184.

Минимальные значения  $K_n$  верхового откоса для Сечения II-II при статических нагрузках получены методом Janbu corrected и составляют 3,362, что на 155,5% больше требуемого нормативного значения 1,316. Минимальные значения  $K_n$  низового откоса, получены методом Janbu corrected и составляют 2,136, что на 62,3% больше требуемого нормативного значения 1,316.

Минимальные значения  $K_n$  верхового откоса для Сечения II-II при **сейсмической** нагрузке получены методом Janbu corrected и составляют 1,586, что на 41,8% больше требуемого нормативного значения 1,118. Минимальные значения  $K_n$  низового откоса, получены методом Janbu corrected и составляют 1,474, что на 31,8% больше требуемого нормативного значения 1,118.

Минимальные значения  $K_n$  верхового откоса для Сечения III-III в при статических нагрузках получены методом Bishop simplified и составляют 3,018, что на 129,3% больше требуемого нормативного значения 1,316. Минимальные значения  $K_n$  низового откоса, получены методом Janbu corrected и составляют 2,627, что на 99,6% больше требуемого нормативного значения 1,316.

Минимальные значения  $K_n$  верхового откоса для Сечения III-III при **сейсмической** нагрузке получены методом Spencer и составляют 2,016, что на 80,3% больше требуемого нормативного значения 1,118. Минимальные значения  $K_n$  низового откоса, получены методом Janbu corrected и составляют 1,968, что на 76,1% больше требуемого нормативного значения 1,118.

## **1.8 Расчёты устойчивости откосов земляной плотины по программе «PLAXIS 2D»**

В расчётных исследованиях рассматривалось основное и особое сочетания нагрузок.

Ниже на рисунках 1.8.1... 1.8.12 приведены результаты расчётных исследований устойчивости, а в таблицу 1.8.1 сведены данные по всем вариантам расчётов для верхового и низового откосов.

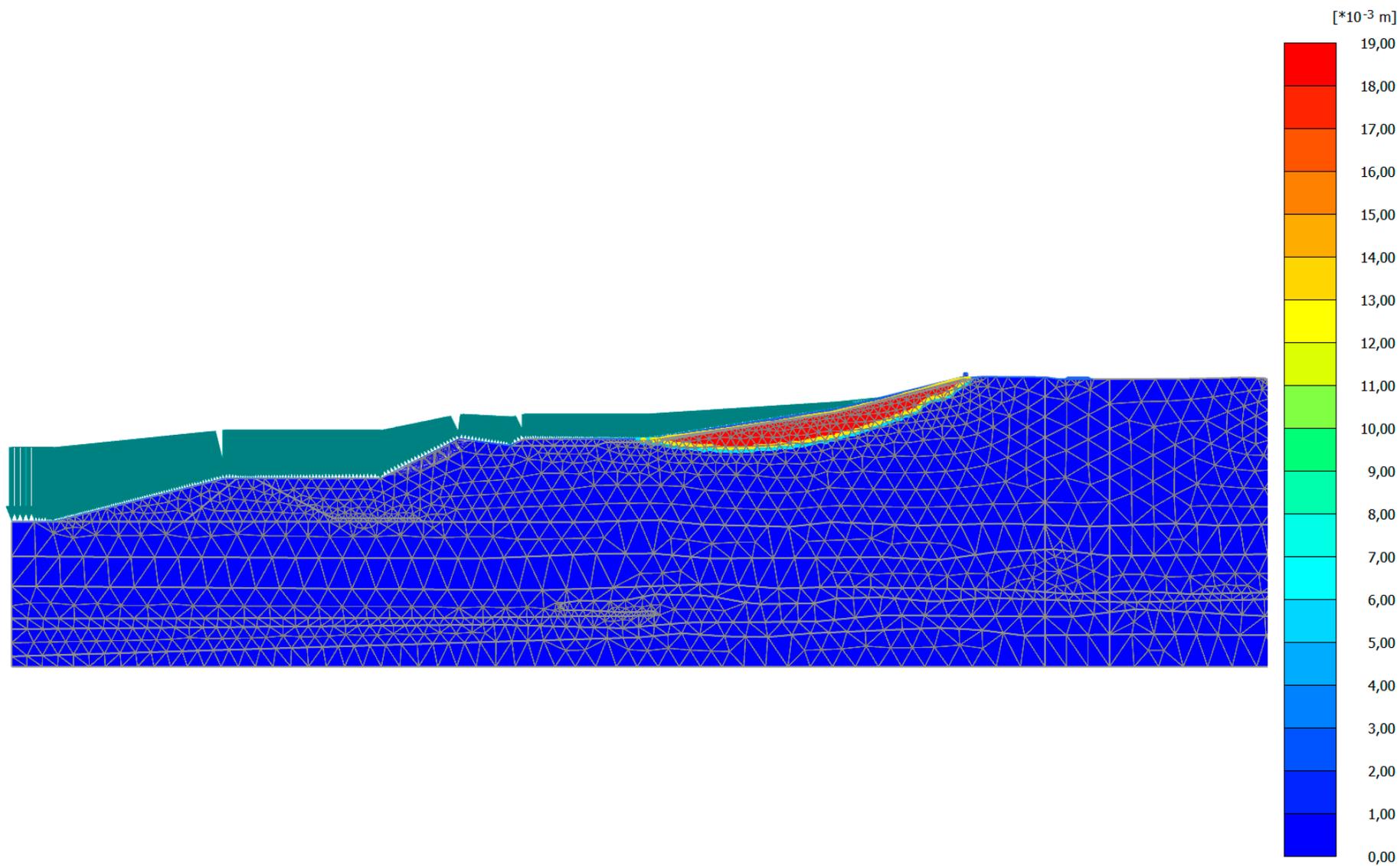


Рисунок 1.8.1 Сечение I-I, расчёты устойчивости верхового откоса на основное сочетание нагрузок - 2,618

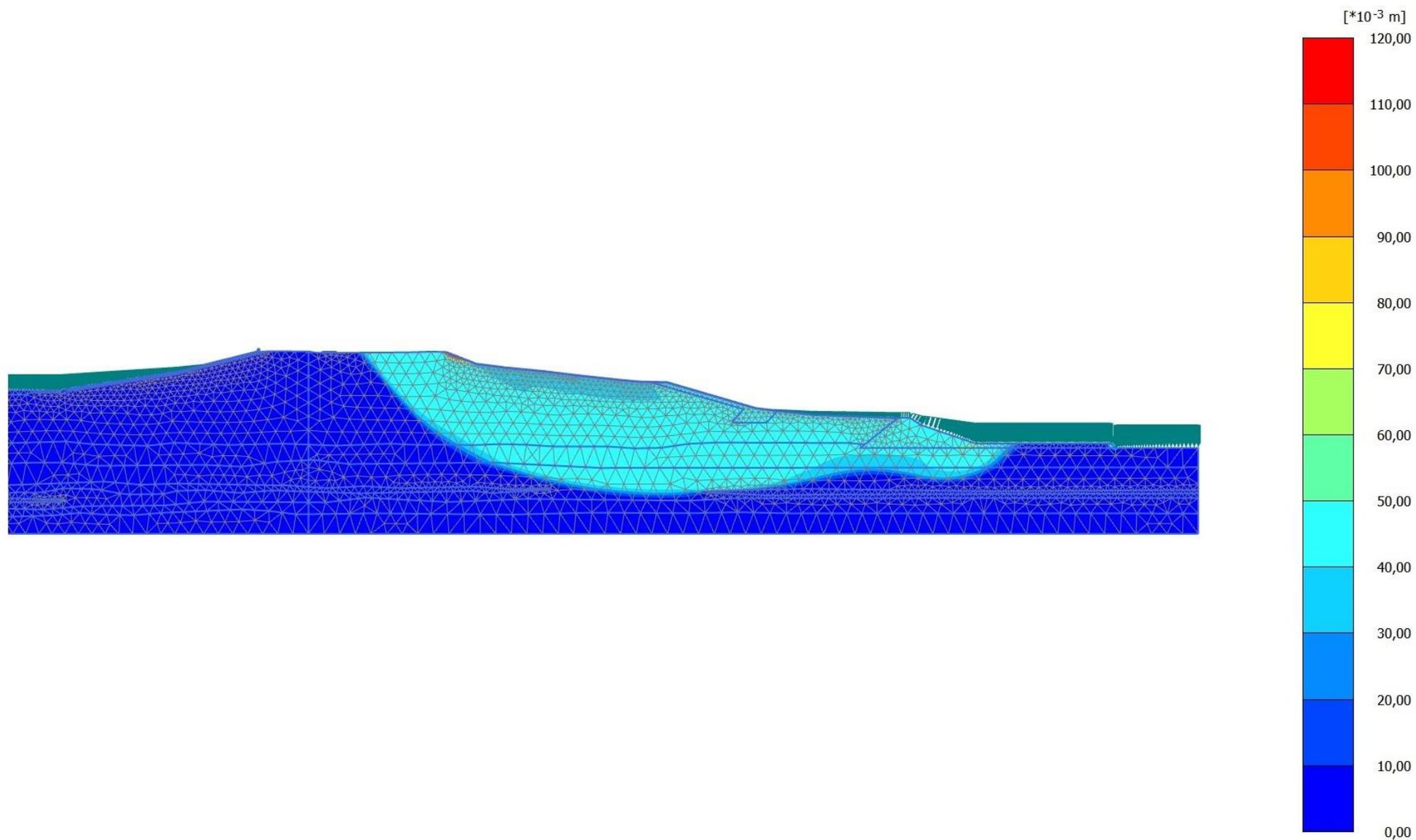


Рисунок 1.8.2 Сечение I-I, расчёты устойчивости низового откоса на основное сочетание нагрузок - 1,896

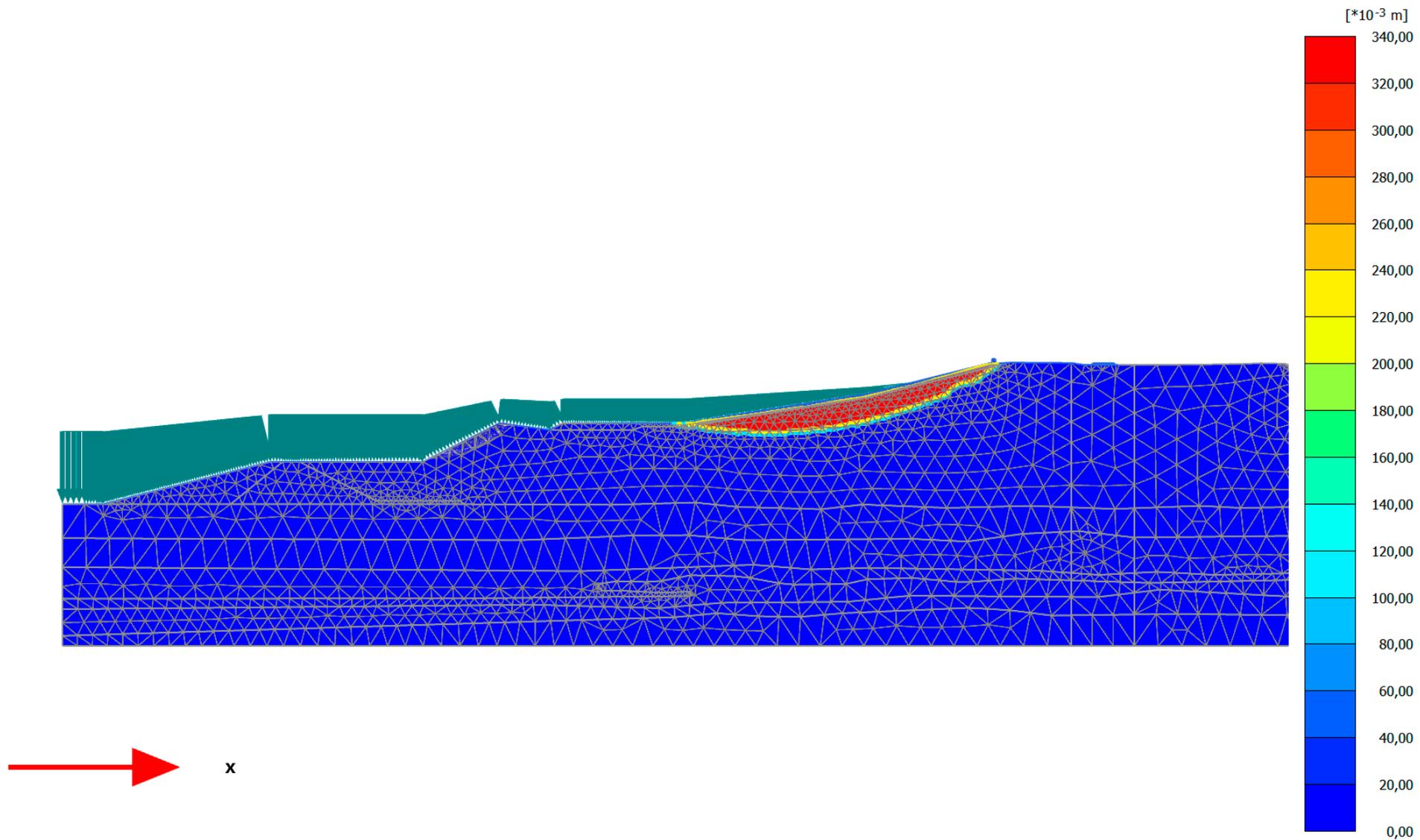


Рисунок 1.8.3 Сечение I-I, расчёты устойчивости верхового откоса на особое сочетание нагрузок – 1,870

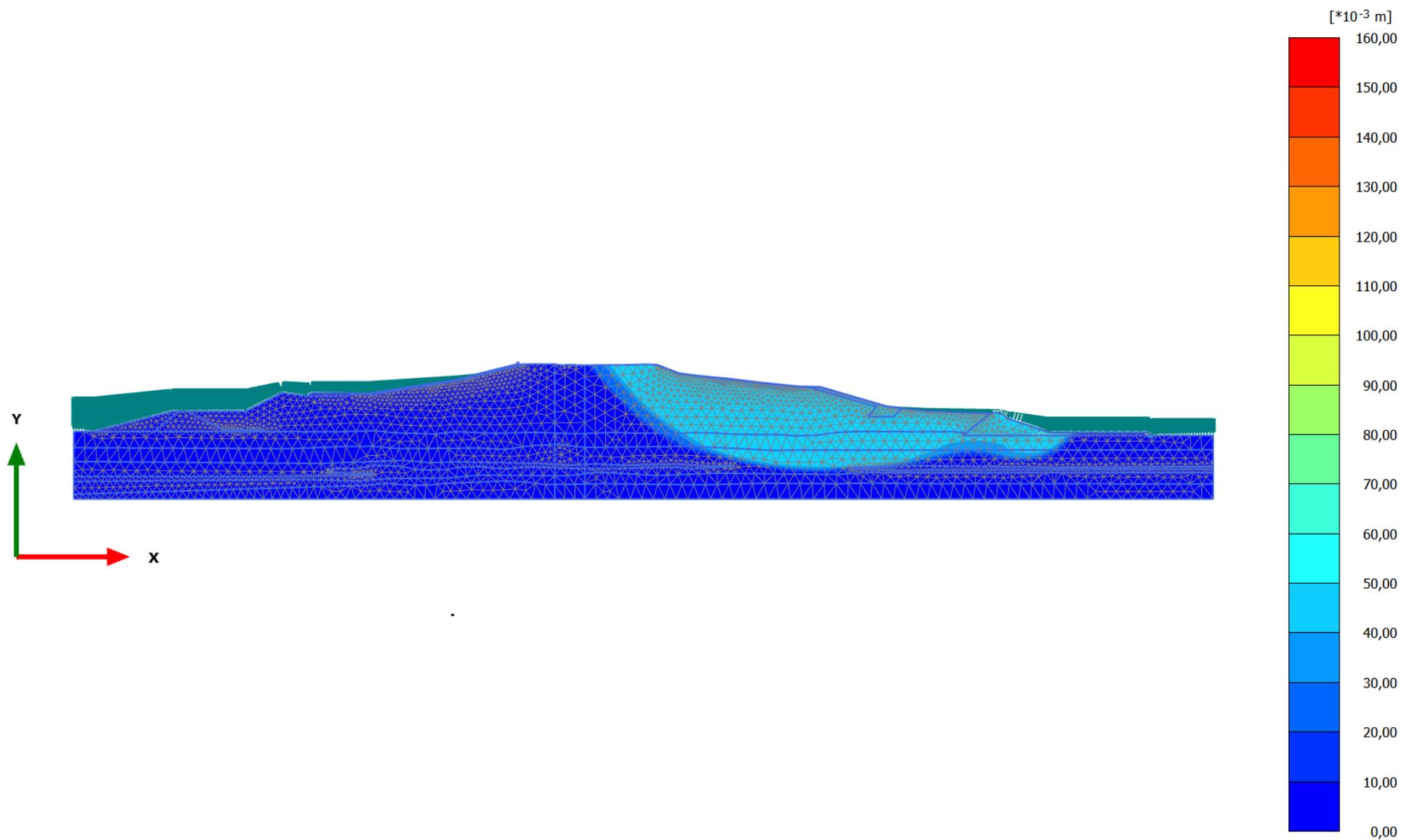


Рисунок 1.8.4 Сечение I-I, расчёты устойчивости низового откоса на особое сочетание нагрузок - 1,422

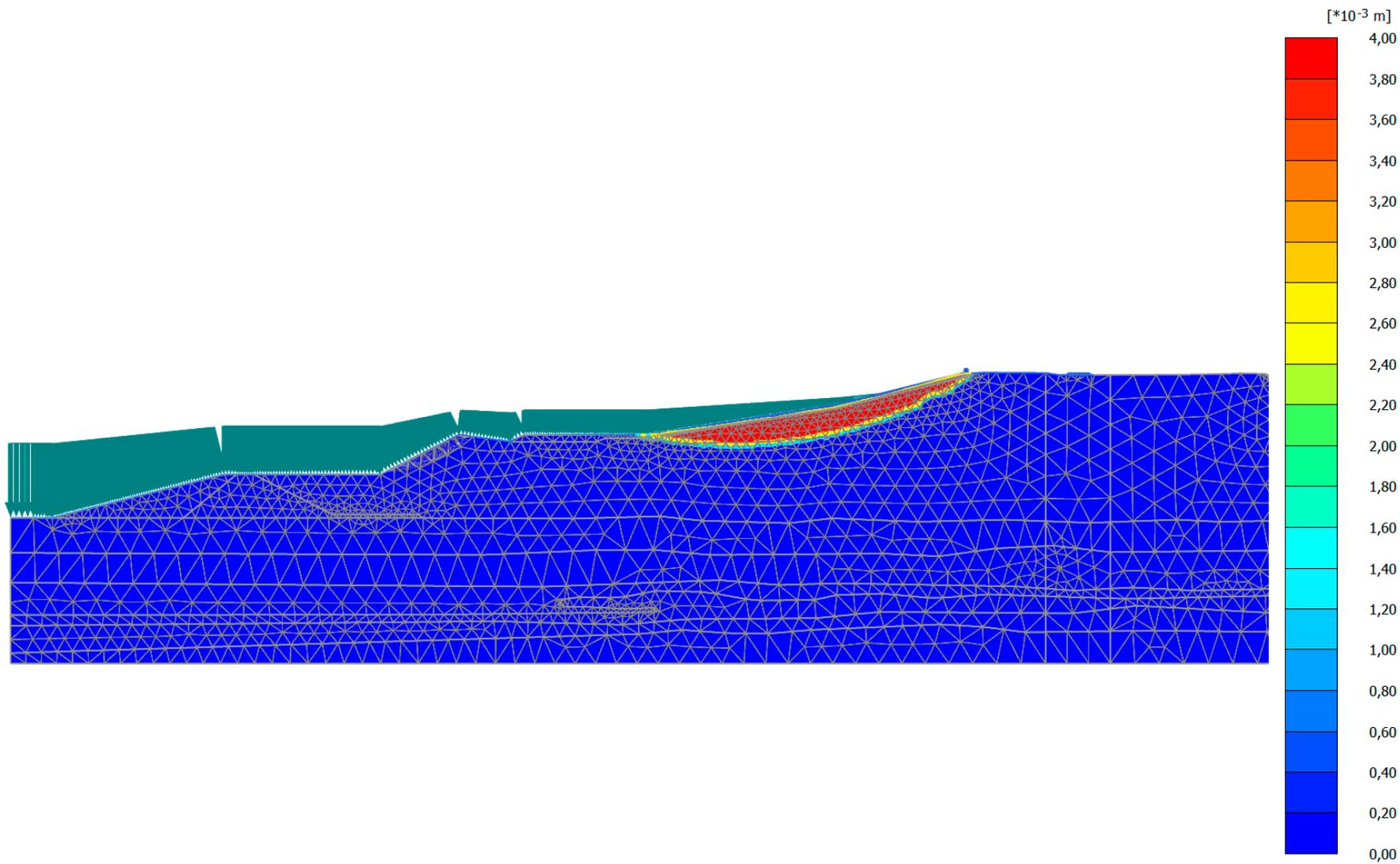


Рисунок 1.8.5 Сечение II-II, расчёты устойчивости верхового откоса на основное сочетание нагрузок – 2,926

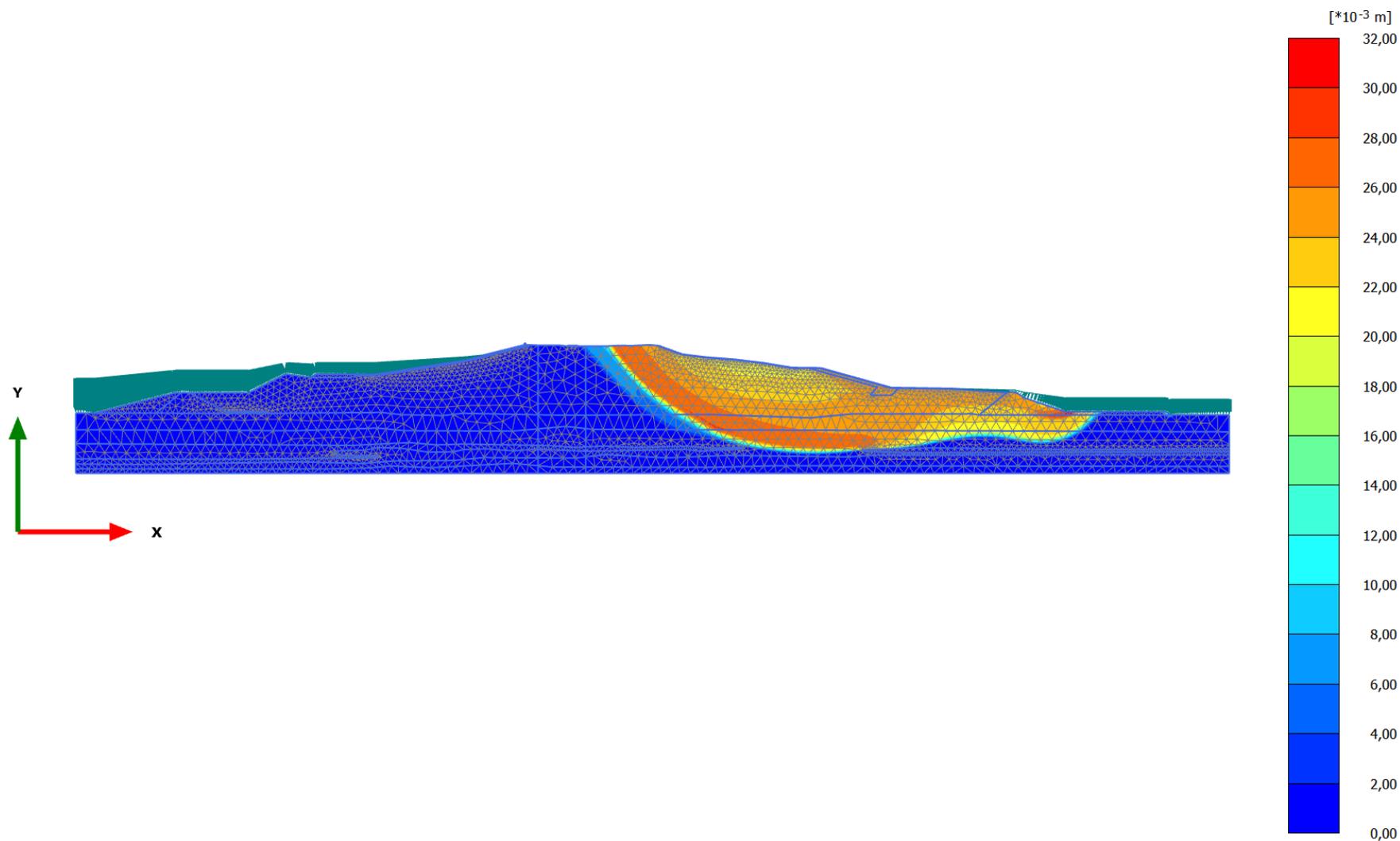


Рисунок 1.8.6 Сечение II-II, расчёты устойчивости низового откоса на основное сочетание нагрузок – 1,916

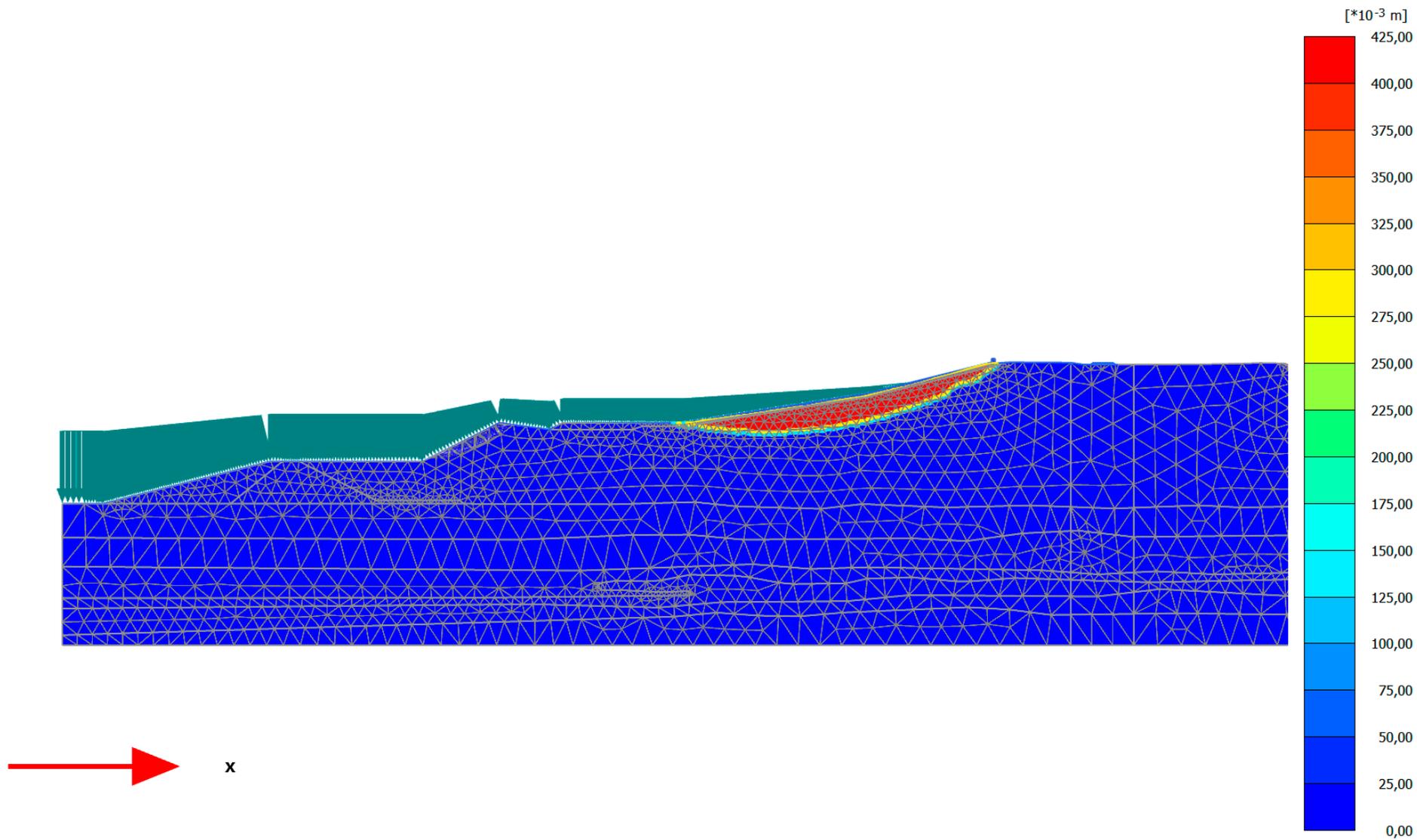


Рисунок 1.8.7 Сечение II-II, расчёты устойчивости верхового откоса на особое сочетание нагрузок – 2,050

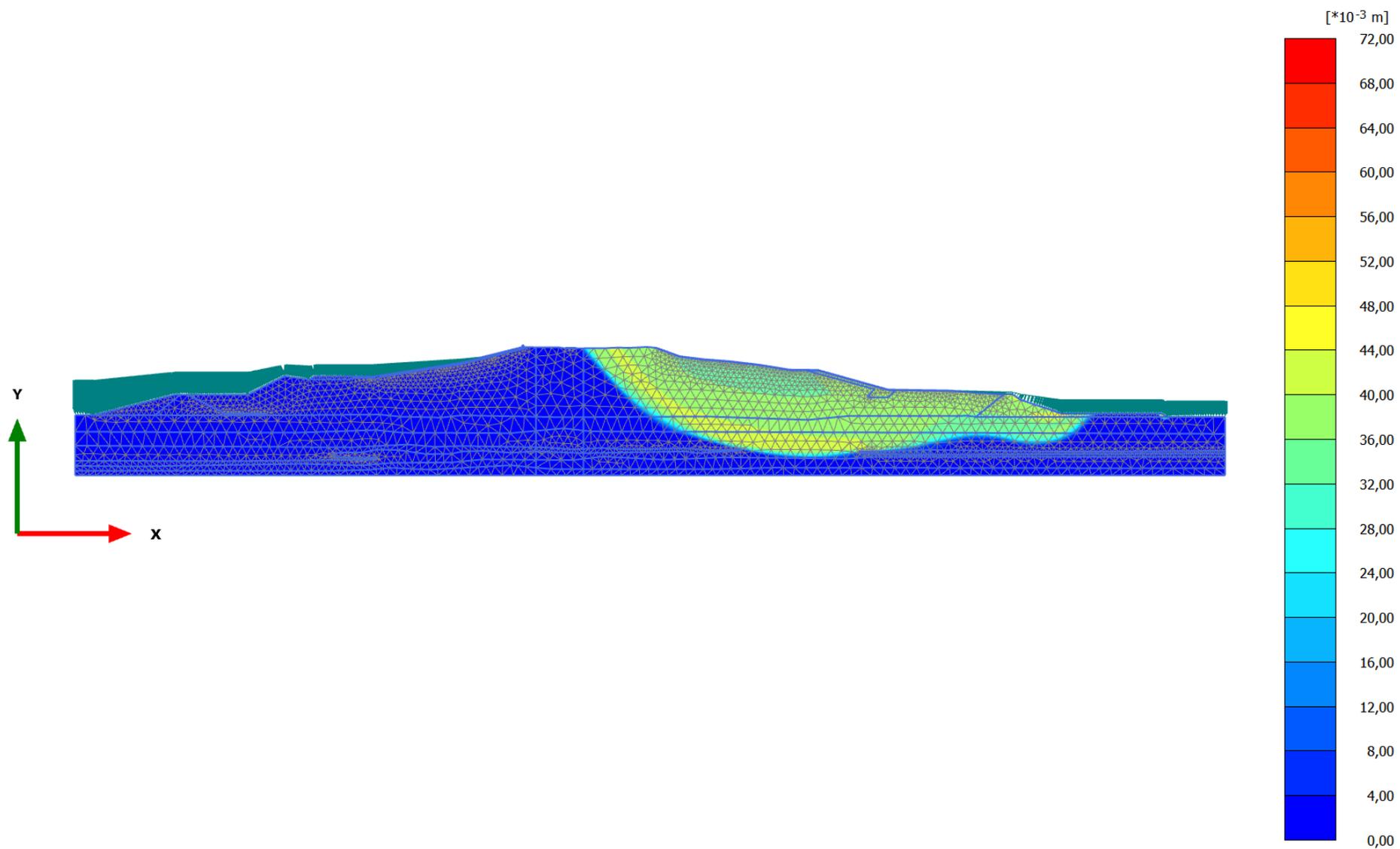


Рисунок 1.8.8 Сечение II-II, расчёты устойчивости низового откоса на особое сочетание нагрузок – 1,503

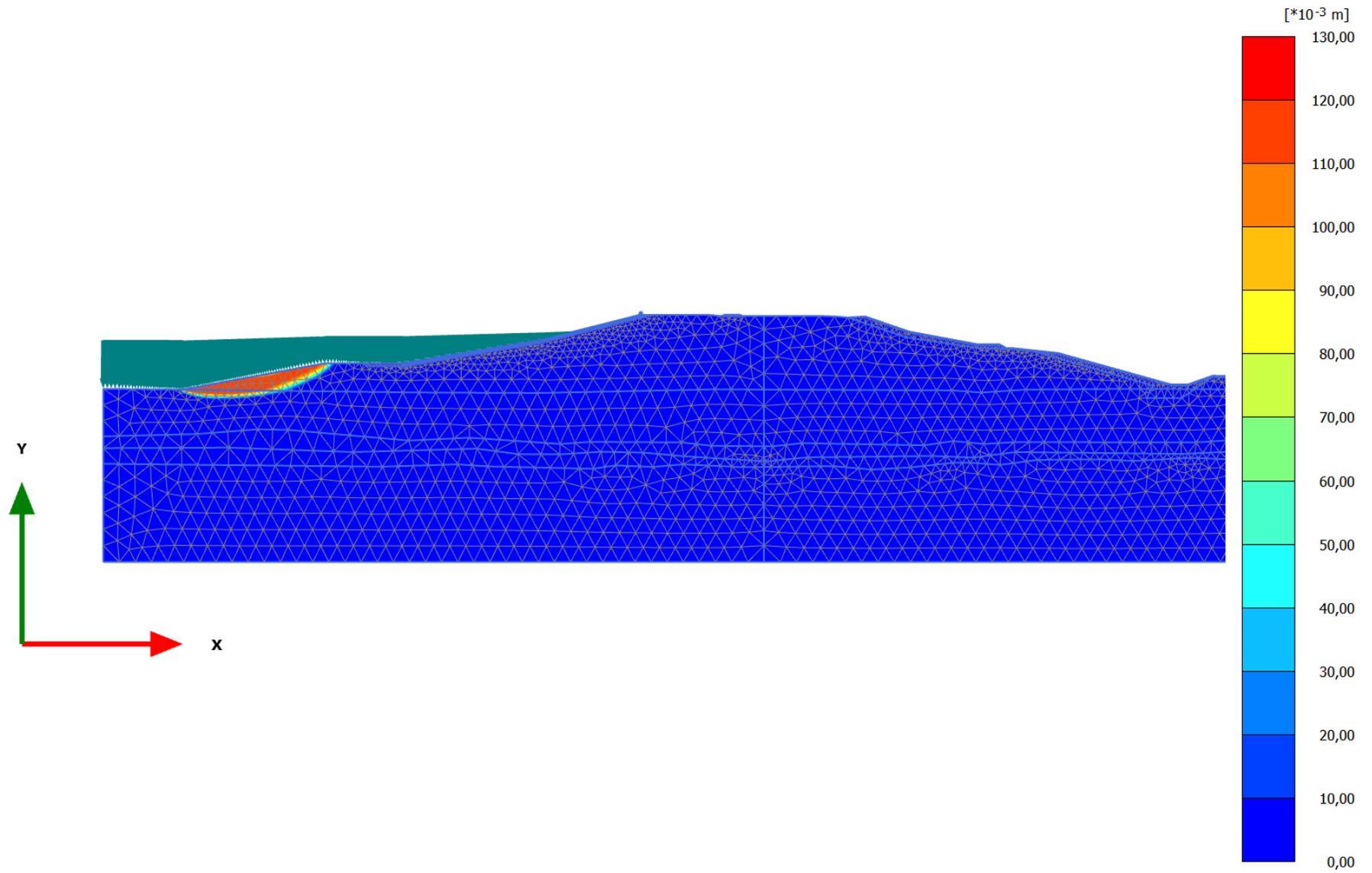


Рисунок 1.8.9 Сечение III-III, расчёты устойчивости верхового откоса на основное сочетание нагрузок – 3,055

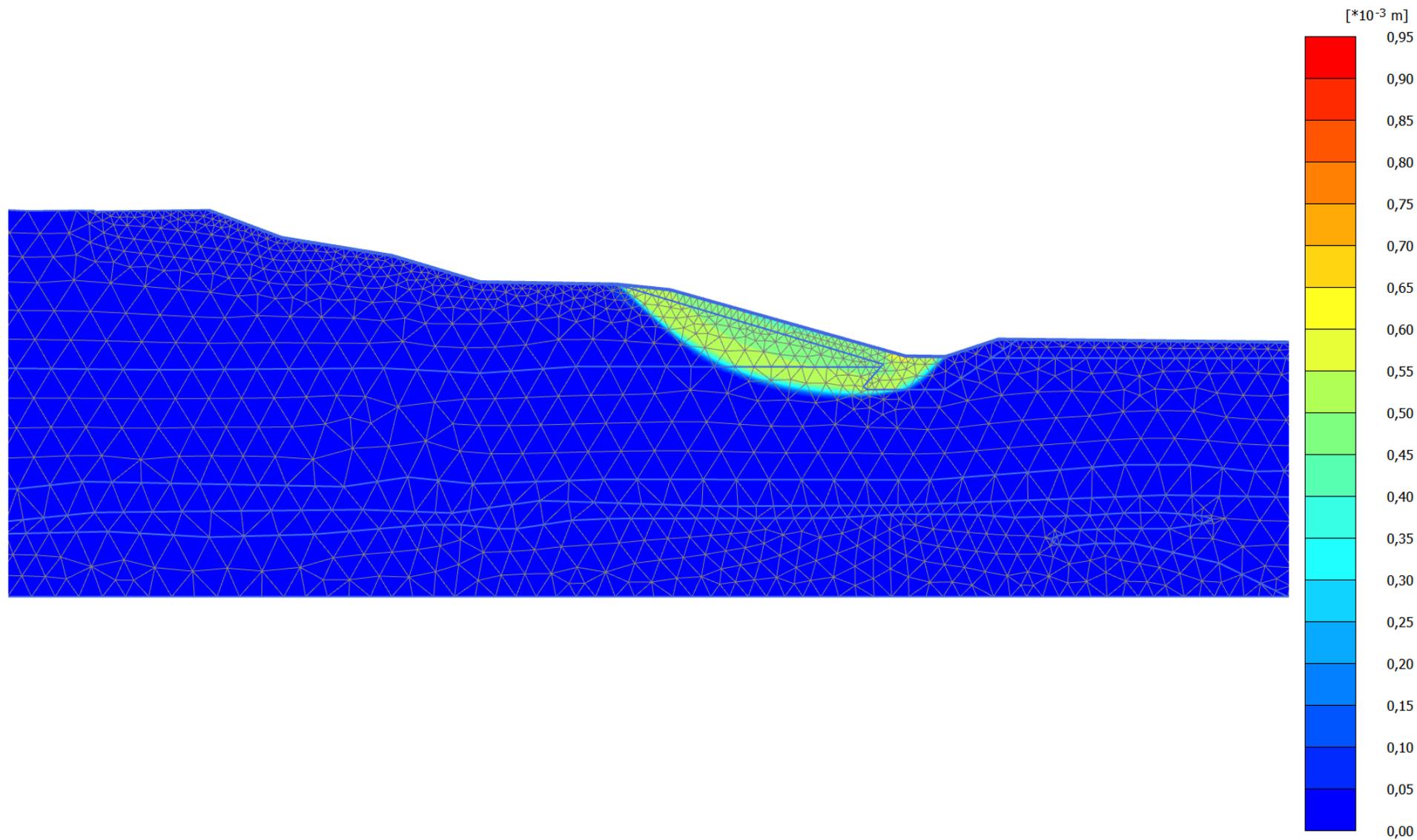


Рисунок 1.8.10 Сечение III-III, расчёты устойчивости низового откоса на основное сочетание нагрузок – 2,513

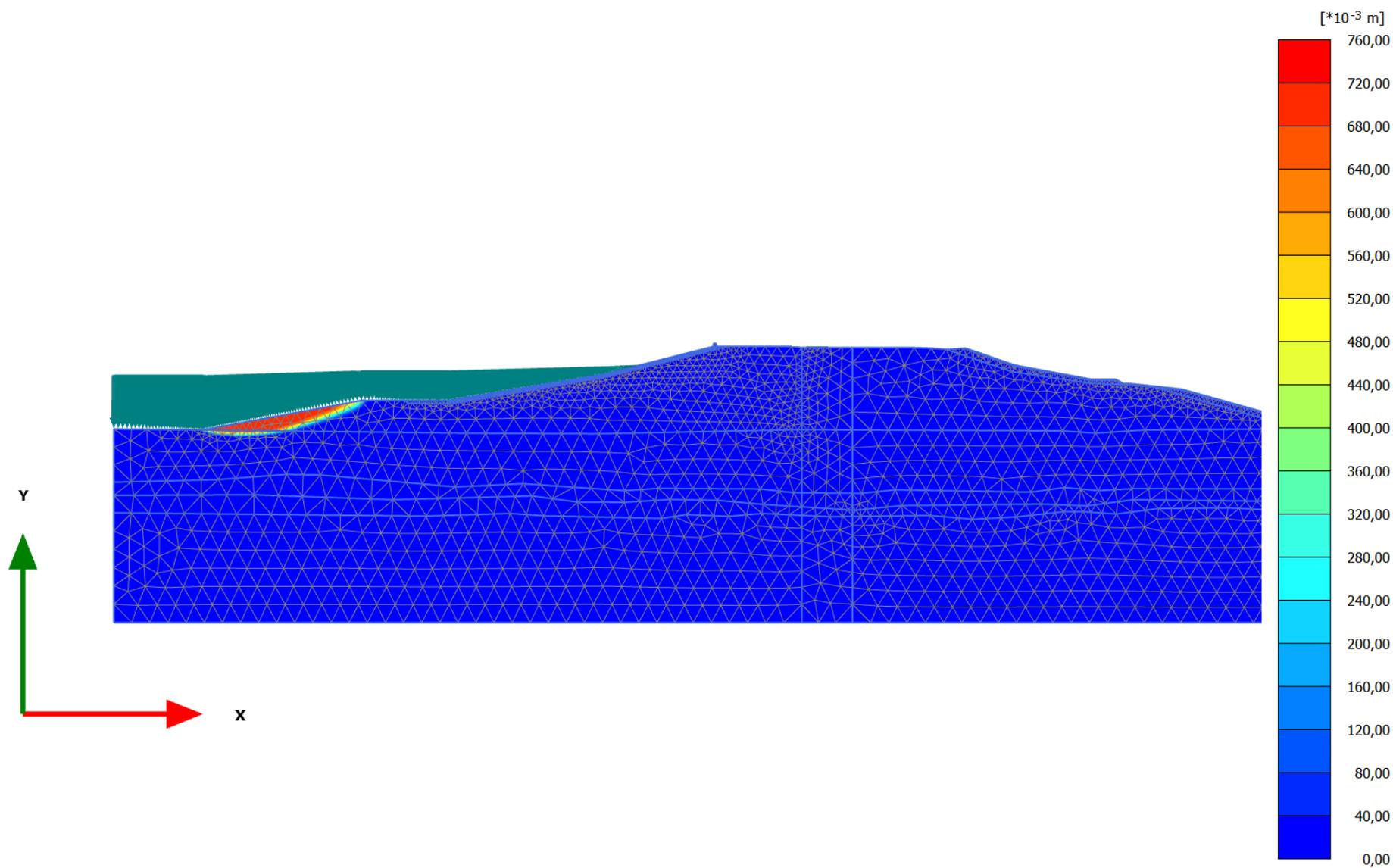


Рисунок 1.8.11 Сечение III-III, расчёты устойчивости верхового откоса на особое сочетание нагрузок - 2,105

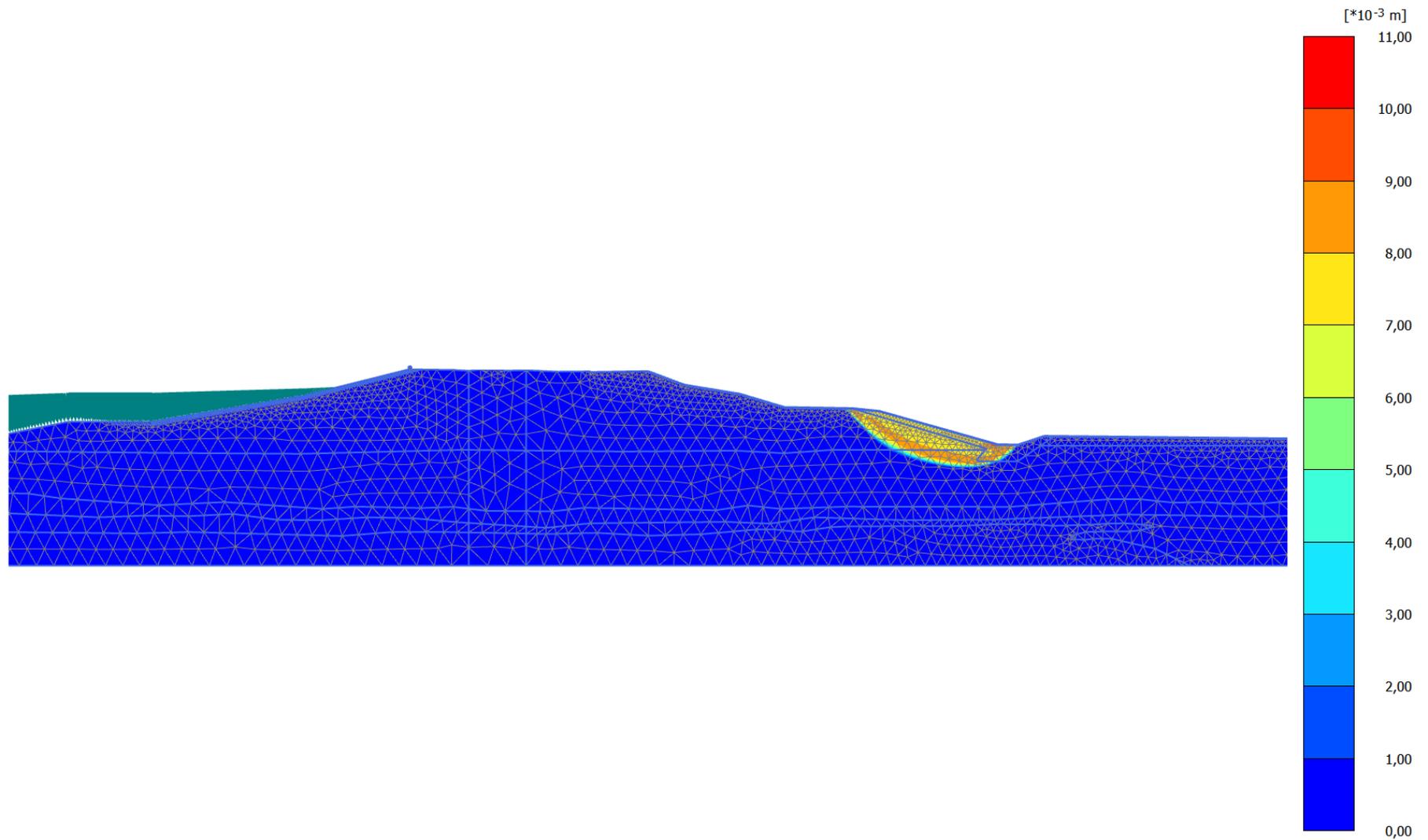


Рисунок 1.8.12 Сечение III-III, расчёты устойчивости низового откоса на особое сочетание нагрузок – 1,812

Таблица 1.8.1

Результаты расчётов устойчивости откосов грунтовой плотины Жигулёвской  
ГЭС

п/п	Сечение	Откос	Сочетание	Минимальный коэффициент устойчивости	Нормативный коэффициент устойчивости
1	I-I	верховой	статика	2,618	1,250
2	I-I	верховой	сейсмика	1,870	1,063
3	I-I	низовой	статика	1,896	1,250
4	I-I	низовой	сейсмика	1,422	1,063
5	II-II	верховой	статика	2,926	1,250
6	II-II	верховой	сейсмика	2,050	1,063
7	II-II	низовой	статика	1,916	1,250
8	II-II	низовой	сейсмика	1,503	1,063
9	III-III	верховой	статика	3,055	1,250
10	III-III	верховой	сейсмика	2,105	1,063
11	III-III	низовой	статика	2,513	1,250
12	III-III	низовой	сейсмика	1,812	1,063

## 1.9 Сравнение результатов расчетов устойчивости откосов грунтовой плотины по различным программам

Таблица 1.9.1

Сравнение результатов расчётов устойчивости откосов грунтовой плотины по различным программам

п/п	Сечение	Откос	Сочетание	Минимальный коэффициент устойчивости		
				GROT	SLIDE	PLAXIS
1	I-I	верховой	статика	2,910	3,118	2,618
2	I-I	верховой	сейсмика	2,110	2,080	1,870
3	I-I	низовой	статика	1,860	1,890	1,896
4	I-I	низовой	сейсмика	1,540	1,436	1,422
5	II-II	верховой	статика	2,700	3,362	2,926
6	II-II	верховой	сейсмика	2,130	1,586	2,050
7	II-II	низовой	статика	1,860	2,136	1,916
8	II-II	низовой	сейсмика	1,540	1,474	1,503
9	III-III	верховой	статика	2,910	3,018	3,055
10	III-III	верховой	сейсмика	2,420	2,016	2,105
11	III-III	низовой	статика	3,010	2,627	2,513
12	III-III	низовой	сейсмика	2,550	1,968	1,812

Из анализа полученных результатов следует, что при расчётах инженерными методами с применением круглоцилиндрических поверхностей скольжения (GROT; SLIDE) величины коэффициентов устойчивости откосов больше (или равны) значений, полученных при моделировании методом конечных элементов (PLAXIS). При этом программный комплекс PLAXIS позволяет более качественно учитывать фактическое напряженно-

деформированное состояние сооружений, и выполнять прогнозы его изменения.

При этом трудозатраты на подготовку и расчётные исследования различны, инженерные методы более адаптированы для предварительных расчётов или исследования состояния ГТС с оконченной консолидацией грунтов.

### **1.10 Расчеты устойчивости откосов грунтовой плотины при наличии линзы деформируемых грунтов**

Расчётные физико-механические характеристики грунтов тела плотины и основания представлены в таблице Таблица 1.10.1

В расчётных исследованиях рассматривалось основное и особое сочетания нагрузок.

На рисунке 1.10.1 приведены результаты расчётных исследований устойчивости грунтовой плотины, полученные при расчетах в программе GROT, на рисунках 1.10.2 и 1.10.3 приведены результаты расчётов, полученные в программе SLIDE, на рисунках 1.10.4 и 1.10.5 приведены результаты расчётов, полученные в программе PLAXIS. В таблицах 1.10.2 и 1.10.3 сведены данные по всем вариантам расчётов для низового откосов, в таблице 1.10.4 представлено сравнение минимальных коэффициентов устойчивости, полученных в трех программных комплексах.

**Таблица 1.10.1**

Физико-механические характеристики грунтов тела и основания плотины

Тип грунта	Сух., т/м <sup>3</sup>	Водонас, т/м <sup>3</sup>	$\varphi$ , °	C, кПа	Коэф. Пуассона	Мод. деф., МПа	Кф, м/сут
Намывные пески мелкие выше линии воды	1,53	1,90	30,4	0	0,3	25	6
Намывные пески мелкие ниже линии воды	1,87	1,91	26,6	0	0,3	25	6
Линза деформируемых грунтов	1,74	1,82	3,4	13	0,4	3	0,005

Тип грунта	Сух., т/м <sup>3</sup>	Водонас, т/м <sup>3</sup>	$\varphi$ , °	C, кПа	Коэф. Пуассона	Мод. деф., МПа	Кф, м/сут
Песок разнотернистый с преобладанием мелкого средней плотности	1,62	1,97	24,2	0	0,28	20	0,5
Песок разнотернистый с гравием и галькой (базальный горизонт)	1,63	1,98	26,6	0	0,27	25	15
Песок разнотернистый плотный	1,66	2,00	26,6	0	0,27	30	40
Глина полутвердая и твердая трещиноватая и перемятая	1,84	1,88	8,0	45	0,3	30	0,01
Дренажный банкет (камень)	2,06	2,06	31	0	0,3	45	50

**Таблица 1.10.2**

Результаты расчётов устойчивости **низового** откоса грунтовой плотины при наличии линзы деформируемых грунтов, в программе GROT

метод	сочетание	координаты R		R	K <sub>мин</sub>	K <sub>норм</sub>
		Y	Z			
ВНИИГ	статика	356,73	16,93	34,05	1,530	1,316
ВНИИГ	сейсмика	350,73	43,93	60,88	1,400	1,118
Чугаев	статика	350,73	43,93	60,88	1,770	1,316
Чугаев	сейсмика	349,73	51,93	68,82	1,600	1,118
Бишоп	статика	349,73	51,93	68,82	1,620	1,316
Бишоп	сейсмика	349,73	51,93	68,82	1,460	1,118

Минимальные значения  $K_n$  низового откоса при статических нагрузках получены методом ВНИИГ и составляют 1,530, что на 16,26% больше требуемого нормативного значения 1,316.

Минимальные значения  $K_n$  низового откоса при **сейсмической** нагрузке получены методом ВНИИГ и составляют 1,400, что на 25,22% больше требуемого нормативного значения 1,118.

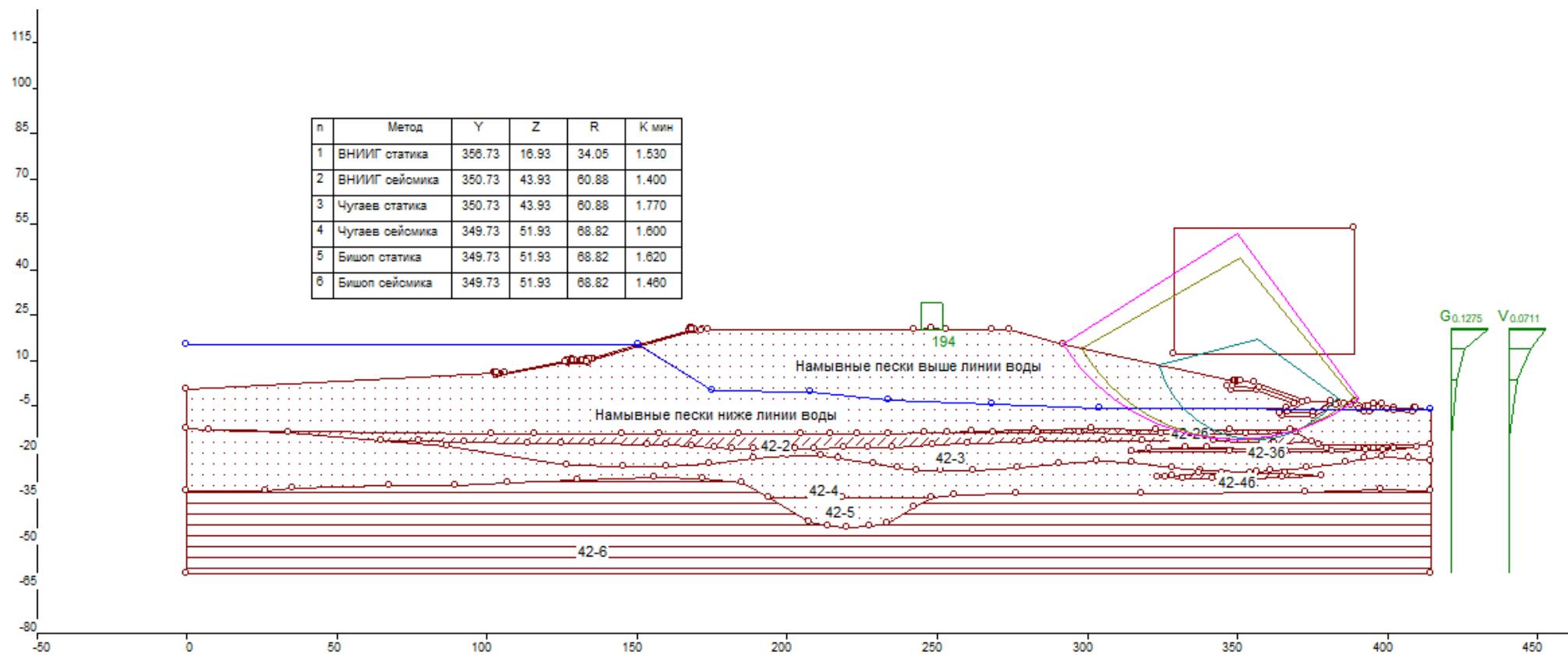


Рисунок 1.10.1 Расчёты устойчивости в программе GROT низового откоса на основное и особое сочетание нагрузок

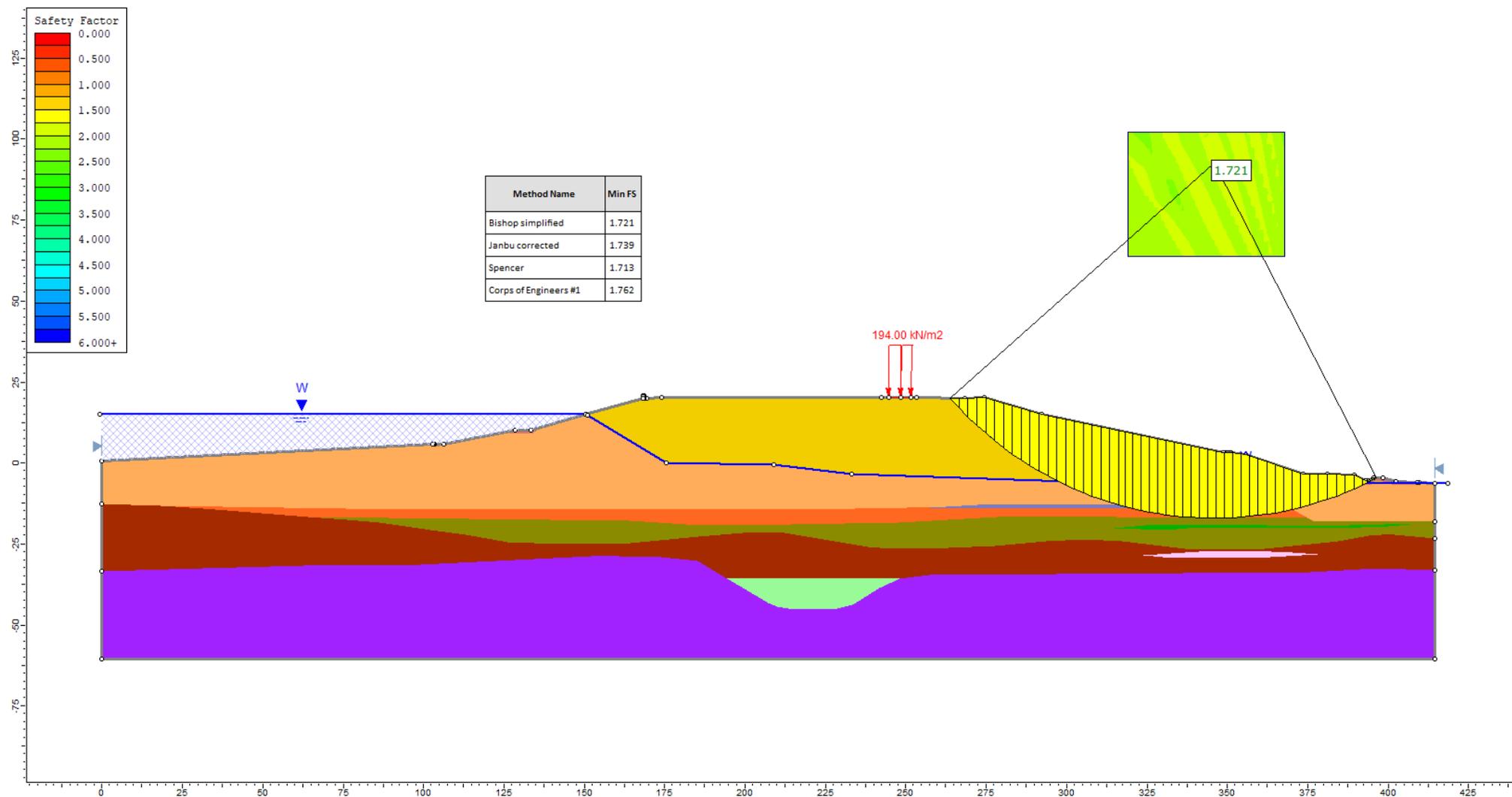


Рисунок 1.10.2 Расчёты устойчивости в программе SLIDE низового откоса на основное сочетание нагрузок

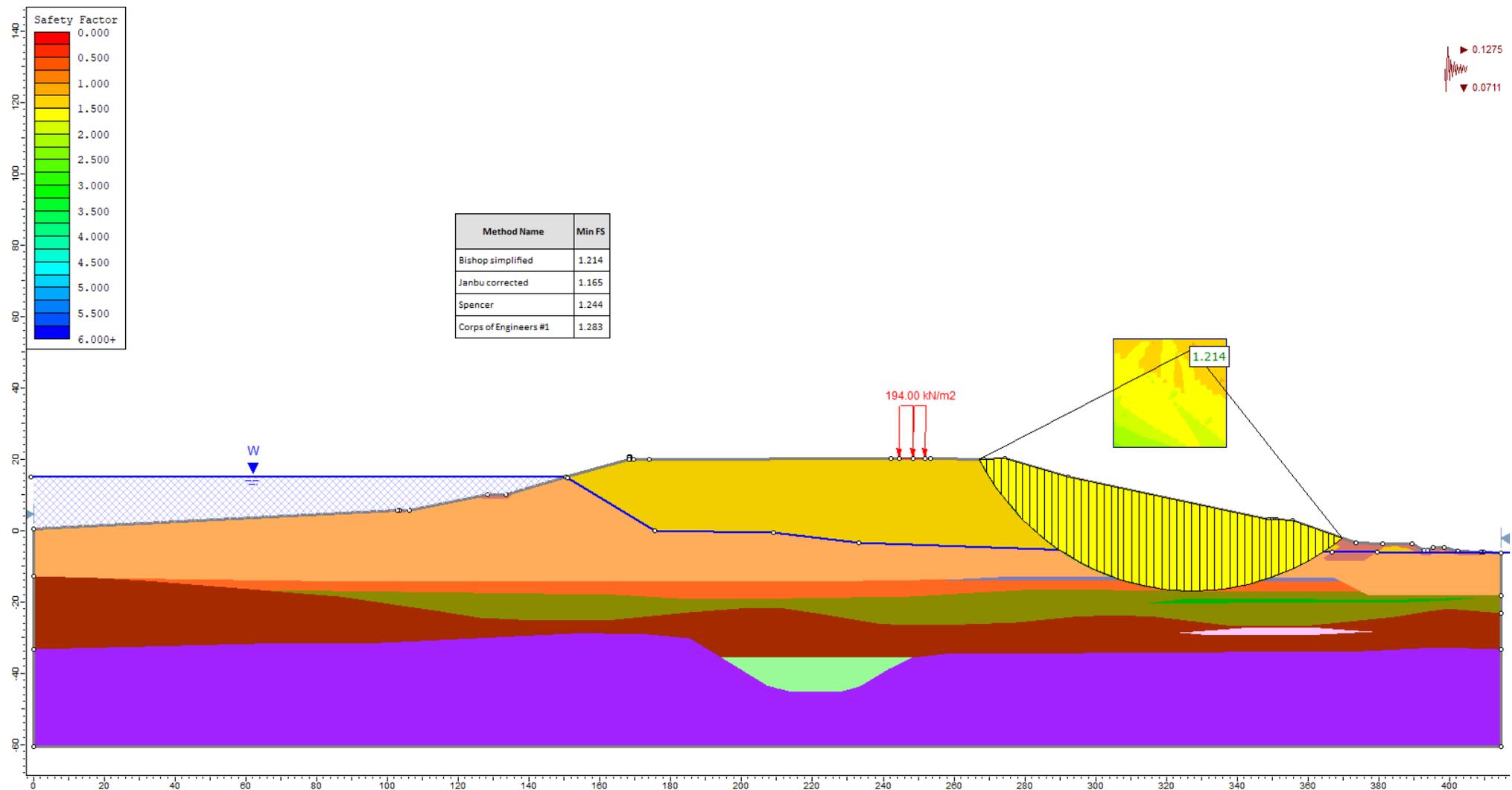


Рисунок 1.10.3 Расчёты устойчивости в программе SLIDE низового откоса на особое сочетание нагрузок

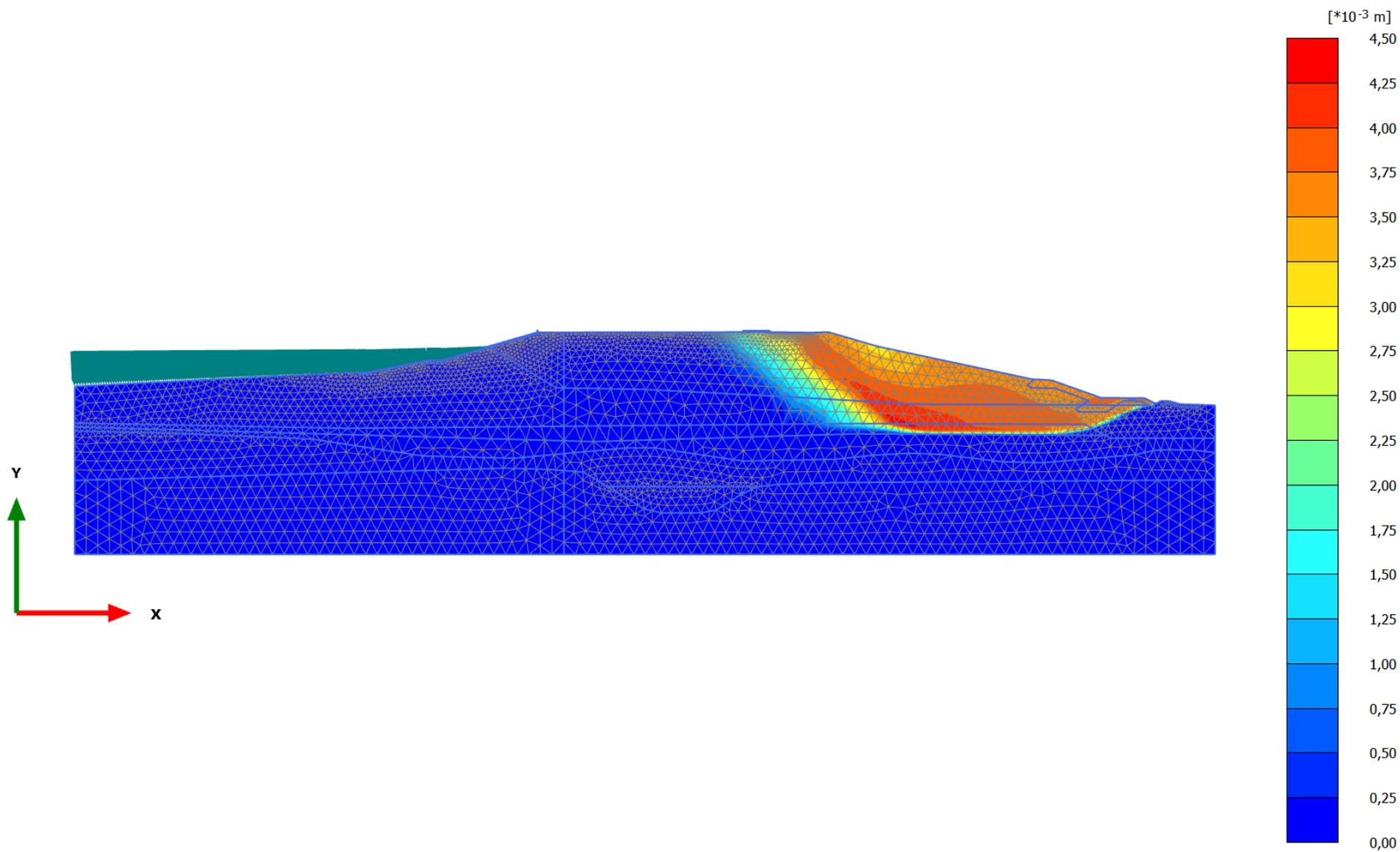


Рисунок 1.10.4 Расчёты устойчивости в программе PLAXIS низового откоса на основное сочетание нагрузок -1,004

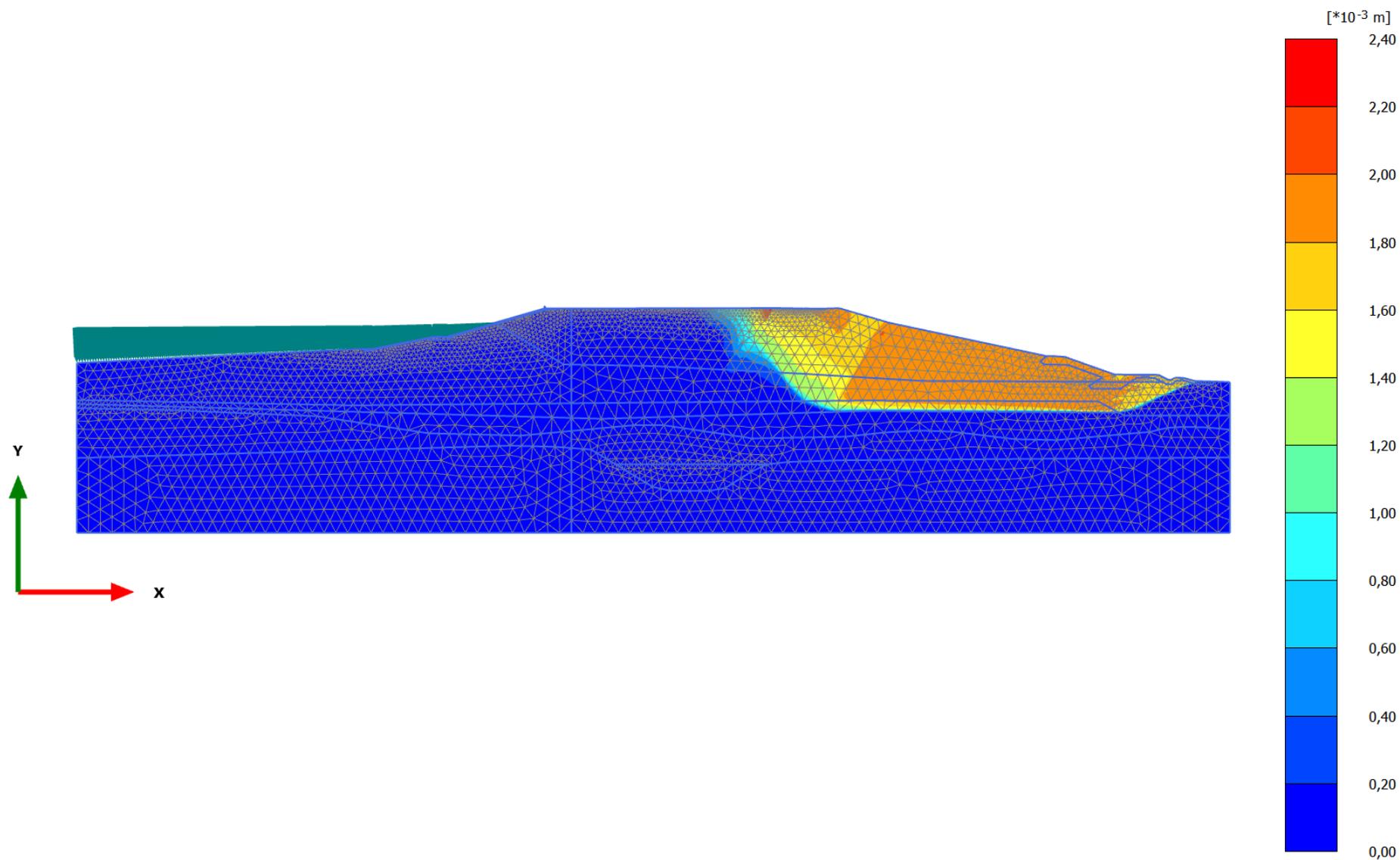


Рисунок 1.10.5 Расчёты устойчивости в программе PLAXIS низового откоса на особое сочетание нагрузок – 0,999

**Таблица 1.10.3**

Результаты расчётов устойчивости **низового** откоса грунтовой плотины при наличии линзы деформируемых грунтов, в программе SLIDE

метод	сочетание	координаты R		R	K <sub>мин</sub>	K <sub>норм</sub>
		Y	Z			
Bishop simplified	статика	345,892	92,537	109,527	1,721	1,316
Bishop simplified	динамика	327,409	50,800	67,585	1,214	1,118
Janbu corrected	статика	345,892	92,537	109,527	1,739	1,316
Janbu corrected	динамика	330,599	47,769	64,449	1,165	1,118
Spencer	статика	345,892	92,537	109,527	1,713	1,316
Spencer	динамика	327,409	50,800	67,585	1,244	1,118
Corps of Engineers #1	статика	345,892	92,537	109,527	1,763	1,316
Corps of Engineers #1	динамика	327,409	50,800	67,585	1,283	1,118

Минимальные значения  $K_n$  низового откоса при статических нагрузках получены методом Spencer и составляют 1,713, что на 30,17% больше требуемого нормативного значения 1,316.

Минимальные значения  $K_n$  низового откоса при **сейсмической** нагрузке получены методом Janbu corrected и составляют 1,165, что на 1,20% больше требуемого нормативного значения 1,118.

**Таблица 1.10.4**

Результаты расчётов устойчивости **низового** откоса грунтовой плотины при наличии линзы деформируемых грунтов, в программе PLAXIS

метод	сочетание	K <sub>мин</sub>	K <sub>норм</sub>
Конечных элементов	статика	1,004	1,250
Конечных элементов	динамика	0,999	1,063

**Таблица 1.10.5**

Сравнение результатов расчетов устойчивости **низового** откоса грунтовой плотины при наличии линзы деформируемых грунтов в различных программных комплексах

п/п	Сочетание	Минимальный коэффициент устойчивости		
		GROT	SLIDE	PLAXIS
1	статика	1,530	1,713	1,004
2	сейсмика	1,400	1,165	0,999

### **ВЫВОДЫ**

1. Расчётные исследования, выполненные в соответствии с требованиями СП 39.13330.2012, позволяют оценить фактическое состояние гидротехнических сооружений.

2. Анализируя различные методы расчёта, можно сделать вывод, что для оценки состояния грунтовых гидротехнические сооружения на однородных основаниях, не имеющих линз слабых грунтов, возможно использовать любые методы (численные, приближенные, инженерные, аналитические).

3. Численные методы (PLAXIS) позволяют получить более точные коэффициенты устойчивости грунтовых сооружений, при этом коэффициент  $\gamma_c$  принимается равным 1.0, а не 0,95, как в инженерных (упрощённых) расчетах. Это в итоге даёт равные величины запасов относительно абсолютных значений  $k_n$

4. Характерным примером корректного выбора метода расчёта являются результаты, полученные в таблице 1.10.5. Для грунтовых плотин на сложных неоднородных основаниях, перемежающихся слабыми грунтами, иловыми отложениями, прослойками увлажнённой глины инженерные методы дают высокие значения коэффициентов устойчивости, которые соответствуют нормативным значениям. Однако фактическое состояние иное, слабые грунты в основании (линза илов) создают ослабленную зону, которая изменяет классическую кривую обрушения. При этом расчёты численными методами

показывают, что коэффициент ниже нормативной величины и требуются работы по предотвращению повреждения объекта.

5. При наличии линзы слабого грунта оползание откоса будет происходить по этой линзе в отличие от теории круглоцилиндрических поверхностей скольжения. В расчетах произойдет усреднение данной линзы и её влияние сведётся к минимуму.

6. Для расчётов ГТС в сложных инженерно-геологических условиях необходимо использовать современные численные расчётные комплексы, позволяющие учитывать нелинейное поведение грунтов.

7. При проектировании необходимо принимать ответственные решения по выбору правильного программного комплекса и метода расчётных исследований, исходя из условий возведения объекта, его геологического строения, а также изученности физико-механических характеристик. В ряде случаев инженерная ошибка может привести к необратимым последствиям, повреждению или разрушению гидротехнического сооружения.

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Какие грунты используются для возведения грунтовых плотин?
2. Какие противофильтрационные элементы применяются в грунтовых плотинах?
3. Из каких грунтов выполняются ядра грунтовых плотин?
4. Из каких материалов выполняются диафрагмы грунтовых плотин?
5. Какие существуют методы расчета устойчивости откосов грунтовых плотин?
6. В каких случаях при расчете устойчивости грунтовых плотин следует учитывать напряженно-деформированное состояние?
7. Какие модели поведения грунтов следует использовать при проведении расчетов напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин I класса?
8. Приведите примеры программных комплексов, в рамках которых возможно проведение расчётных исследований напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин?
9. Какие упрощенные методы, проверенные практикой, вы знаете для проведения фильтрационных расчетов грунтовых плотин (или для гидротехнических сооружений)?
10. В чем заключается методика расчёта устойчивости откосов грунтовых плотин по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения?
11. Как определяется величина коэффициента запаса при расчете устойчивости откосов грунтовой плотины по методу круглоцилиндрических поверхностей?
12. Какие значения коэффициента сочетания нагрузок принимаются при проведении расчетов устойчивости грунтовых плотин на действие нагрузок основного и особого сочетаний?
13. В рамках каких расчетных комплексов проводятся расчеты напряженно-деформированного состояния и устойчивости грунтовых плотин методом конечных элементов?

14. Как записывается условие устойчивости откосов грунтовой плотины в соответствии с СП 39.13330.2012 «Плотины из грунтовых материалов»?
15. Из каких грунтов состоит тело грунтовой плотины Жигулевской ГЭС?
16. Какое нормативное значение имеет коэффициент запаса устойчивости грунтового сооружения I класса?
17. Какие грунты слагают основание грунтовой плотины Жигулевской ГЭС?
18. Какие приборы установлены в теле грунтовой плотины Жигулевской ГЭС для контроля фильтрационного режима?
19. Посредством какой контрольно-измерительной аппаратуры определяется осадка здания Жигулевской ГЭС?

## Список литературы

1. Федеральный закон №117 «О безопасности гидротехнических сооружений» от 23 июня 1997 г.
2. СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов.
3. СНиП 2.06.05-84. Строительные нормы и правила. Плотины из грунтовых материалов.
4. СП 58.13330.2019. Гидротехнические сооружения. Основные положения СНиП 33-01-2003. М., 2019. 72 с.
5. Bishop, A.W. (1955) «The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes», *Geotechnique*, Great Britain, Vol.5, No.1, Mar., pp.7-17.
6. Spencer, E. 1967. A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces. *Géotechnique*, 17(1): 11-26.
7. Janbu, N. 1954. Application of Composite Slip Surface for Stability Analysis. European Conference on Stability Analysis, Stockholm, Sweden.
8. Janbu, N. 1973. Slope Stability Computations. Embankment Dam Engineering - Casagrande Volume, R.C. Hirschfeld and S.J. Poulos, eds., John Wiley and Sons, New York, pp 47-86.
9. Проектная документация. Комплексная модернизация Жигулевской ГЭС. Раздел 1. Пояснительная записка. Часть 3. Приложение «Отчетная документация по результатам инженерно-геологических изысканий». Книга 1. Текстовая часть. Том 4. Шифр 1919-ПЗ3.1. 2015 г.
10. 007-2013-ЦСГНЭО Расчёт НДС и сейсмостойкости пространственных моделей агрегатных секция, секций водосливной плотины и земляной намывной плотины Жигулёвской ГЭС.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 1**

## ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГЭС

### Здание ГЭС

Особенностью расположения здания Жигулевской ГЭС является то, что оно находится на неоднородных грунтах. Первые шесть секций здания размещены на древней переуглубленной долине Отваженского оврага, представленной в основании станции различными суглинками и глинами, вмещающими участки базального горизонта, состоящего из гравия, гальки и валунов с суглинистым заполнителем. Секции здания с 7-й по 10-ю расположены в русловой части долины реки, основание их сформировано однородными грубослоистыми суглинками и глинами.

Длина здания ГЭС составляет 600 м и разбита на 10 секций, ширина здания вдоль потока 100 м, а включая анкерный понур с сороудерживающим сооружением и рисберму – около 300 м.

Для контроля состояния здание ГЭС во время строительства было оснащено значительным количеством контрольно-измерительной аппаратуры. Осадка контролировалась с помощью поверхностных марок и щелемеров, расположенных в шести продольных створах на верхних отметках здания ГЭС, и створа марок в сухой потерне. Кроме того, в основании здания ГЭС были установлены 16 глубинных марок, с помощью которых можно было оценивать осадку глубинных слоев основания. Всего на здании ГЭС установлено 76 щелемеров, 361 поверхностная марка и 23 створных знака в потерне.

Для контроля фильтрационного режима в основании здания ГЭС расположены 103 напорных и 89 безнапорных пьезометров. В 2017 - 2018 гг. пьезометры, установленные в основании здания, в значительном объеме были автоматизированы. Это позволило контролировать состояние здания ГЭС в режиме реального времени.

Установленная КИА полностью обеспечивает контроль состояния здания станции при всех режимах работы.

### *Анализ данных натурных наблюдений*

Наблюдаемые осадки здания ГЭС соответствуют геологии основания. Так, полная осадка первых шести секций здания ГЭС составляет от 150 до 200 мм. Осадка остальных секций (с 7-й по 10-ю) увеличивается по мере приближения к секции 10, которая имеет максимальную осадку 400 мм. Это свидетельствует о том, что грунты основания под первыми шестью секциями имеют больший модуль деформации, чем под секциями 7 - 10. Основная осадка здания ГЭС произошла в период наполнения водохранилища и первого периода эксплуатации. Начиная с 1967 г., осадки имели равномерный характер и их интенсивность не превышала 0,8 мм/год, и только секции 9 - 10 в примыкании к грунтовой плотине имели интенсивность осадки 1,1 мм/год. Причем эта интенсивность наблюдалась до 2003 г., затем произошло снижение роста осадки. В настоящее время можно считать осадки затухающими.

По секциям наблюдалась некоторая неравномерность осадок вдоль потока. Эта неравномерность сформировалась в первый период эксплуатации и, в основном, с наклоном в сторону верхнего бьефа наблюдалась по секциям 8 - 10, где разница между осадкой здания по верхнему и нижнему бьефам составляла 80-100 мм. Такая как эта разница осадок сформировалась на длине около 100 м, общий наклон секций весьма незначителен и далек от предельных значений, определяемых по допустимому наклону вала агрегатов.

Для контроля фильтрационного режима по подошве здания ГЭС были размещены шесть створов закладных пьезометров. Эти пьезометры измеряют фильтрационное противодавление по подошве сооружения в пределах каждой из секций здания. Наблюдения показали, что противодавление под фундаментной плитой и понуром различается от секции к секции, что связано с геологией основания. Анкерный понур расположен на слабоводопроницаемых грунтах, верховой зуб врезан в водоупорные глины, а наиболее водопроницаемые грунты расположены со стороны нижнего бьефа, выполняя функции естественной дрены под зданием ГЭС. Фильтрационный режим в основании здания ГЭС под разными секциями различен. Так, шпунт под

фундаментной плитой СУС и анкерный понур под секциями 1, 5, 6, 7 гасят 20-30% напора, под секциями 8-10 - 30-40%, а под секциями 3 и 4 напор гасится незначительно. Указанный характер фильтрационного режима свидетельствует о том, что противофильтрационные элементы на входном участке здания ГЭС в конкретных геологических условиях оказались не очень эффективными.

Наибольшие градиенты фильтрационного напора наблюдаются на верхнем зубе фундаментной плиты здания ГЭС и составляют под секцией 3-0,74, а под секцией 4 – 0,60. Учитывая, что допустимые градиенты напор для Кеннельских глин составляет 1,35, максимальные измеренные значения градиентов фильтрации меньше допустимых.

#### *Инженерно-геологические изыскания*

Для изучения свойств грунта в основании здания ГЭС в секциях 3 и 4 между верхним и нижним зубом фундаментной плиты в 2018 году из сухой потерны была пробурена разведочная скважина. Глубина скважины составила 5 м. В результате бурения выявлено, что контакт с основанием плотный без перерыва, на глубине 3,5- 3,7 м был вскрыт суглинок легкий, тугопластичный. Ниже, на глубине 3,7 – 4,75 м находятся полутвердые глины, переслаивающиеся с мягкопластичными суглинками. Начиная с глубины 4,75 м, был вскрыт песчано-дресвяный грунт и напорный горизонт с напором 2,3 – 2,6 МПа.

В силу особенностей основания контроль фильтрационного режима по подошве сооружения должен быть постоянным в режиме реального времени.

#### *Инструментальное обследование*

Инструментальное обследование состояния бетона здания ГЭС, показали, что прочность бетона увеличилась более чем на 30% от проектных значений. В то же время в результате проведенных визуальных обследований внешних контуров здания ГЭС, внутренних помещений и потерны были выявлены дефекты, в том числе: трещины, фильтрующие трещины, протечки с выщелачиванием, фильтрация через межблочные швы, поверхностные разрушения бетона, оголение арматуры. В основном все дефекты относятся к

категории «В», то есть к дефектам и повреждениям локального характера, которые при последующем развитии не могут оказать влияния на состояние основных несущих конструкций зданий и сооружений.

По результатам инструментального измерения основных линейных размеров конструкции здания ГЭС существенных отклонений от проектной документации не обнаружено.

Обследование бетона неразрушающими методами показало следующие результаты:

- прочность бетона в сухой потерне здания ГЭС составила 38-43 МПа;
- прочность бетона в щитовом отделении верхнего бьефа (отм. 55,5 м) составляет  $26 \div 32$  МПа в балке, примыкающей к железнодорожному полотну;
- прочность бетона колонн составляет 41 МПа;
- прочность бетона в щитовом отделении нижнего бьефа (отм. 41,5 м) составляет  $40 \div 42$  МПа.

В результате проведенного инструментального обследования составлены ведомости дефектов, даны рекомендации по выполнению ремонтных работ.

#### *Расчётные исследования*

Для расчета устойчивости здания ГЭС была разработана плоско-приведенная модель секции здания ГЭС с основанием. Система «здание – основание» была аппроксимировано 37402 конечными элементами.

Коэффициент надёжности по ответственности сооружения  $\gamma_n=1,25$ . При определении коэффициента запаса на сдвиг здания ГЭС принимались следующие прочностные параметры контактной поверхности:  $\varphi=11,3$ ,  $C=0,05$  т/м<sup>2</sup>.

В расчётах устойчивости системы «сооружение-основание» рассматривалось основное сочетание нагрузок (при НПУ=53,0 м), и особое сочетание нагрузок при частичном нарушении работы дренажа. Во всех случаях расчёты производились без учёта поэтапности возведения сооружения и наполнения водохранилища (принималось «мгновенное» возведение сооружения и заполнение водохранилища).

По результатам расчёта напряженно-деформированного состояния были определены сдвигающие и удерживающие силы, действующие на здание Жигулёвской ГЭС, по которым был определён коэффициент запаса устойчивости на плоский сдвиг.

Для здания ГЭС при основном сочетании нагрузок без учёта понура и сороудерживающих сооружений минимальный коэффициент запаса составляет 1.57, что на 25% выше требуемого нормативного значения. При учёте понура и сороудерживающих сооружений коэффициент запаса устойчивости составляет 2.42, что на 94% выше требуемого нормативного значения.

При особом сочетании нагрузок минимальный коэффициент запаса устойчивости на плоский сдвиг составляет 1.3, что на 16% выше требуемого нормативного значения. При учёте понура и сороудерживающих сооружений коэффициент запаса устойчивости составляет 2.2, что на 96% выше требуемого нормативного значения.

По итогам расчётов определено, что устойчивость здания Жигулёвской ГЭС на плоский сдвиг обеспечена.

### **Водосливная плотина**

Основание водосливной плотины сложено современными рисскими и миндель-рисскими аллювиальными отложениями мощностью 70-80 м, ниже которых находятся кинельские глины. Водосливная плотина имеет длину 981,2 м и разделена на 19 секций с двумя водосливными пролетами каждый. Все секции плотины расположены на песках пляжевой фации и периферийно-русловой фации. Суглинки в основании занимают не более 20% площади основания, только под секциями 1-2 площадь суглинков составляет около 50%.

В качестве противофильтрационных устройств, обеспечивающих водонепроницаемость подземного контура, служат понур и два шпунтовых ряда, забитых на глубину 20 м. Кроме этих двух основных шпунтовых стен вдоль низовой грани плотины выполнен перфорированный шпунтовый ряд на глубину 10 м, предотвращающий выпор грунта из-под сооружения.

### *Анализ данных натурных наблюдений*

Для наблюдения за осадками на плотине размещены 2 створа поверхностных марок и 2 створа щелемеров. Кроме того, в потерне плотины располагается створ щелемеров и створных знаков. Всего на водосливной плотине установлено 143 марки и 67 щелемеров. Полные осадки водосливной плотины по показаниям щелемеров составляют на текущий момент 175-230 мм, по показаниям осадочных марок – 160 - 200 мм. Разница в осадках объясняется тем, что осадочные марки были установлены позже щелемеров. Основная осадка плотины произошла в период строительства и в первый период эксплуатации.

К 1969 году осадки водосливной плотины, измеренные по щелемерам находились в пределах 165-200 мм, по маркам – в пределах 145 - 180 мм. За последующие 50 лет (до 2019 г.) осадка секций водосливной плотины увеличилась всего на 20-30 мм. Осадки плотины по длине достаточно равномерны, только в секциях 1 и 2 наблюдается увеличение осадки, связанное с наличием в основании этих секций глинистых песков и глин. После 1969 года интенсивность осадки по средним секциям не превышает 0,2 - 0,3 мм в год, по примыкающим к устоям секциям интенсивность осадки составляет 0,5 - 0,6 мм в год. В целом, характер изменения осадок секций водосливной плотины свидетельствует о процессе их затухания.

Для контроля фильтрационного режима в основании водосливной плотины по ее подошве установлено 6 рядов закладных пьезометров: ряд П-2 непосредственно за понурным шпунтом, ряд П-1 в середине понура, П-3 перед королёвым шпунтом, П-4 – за королёвым шпунтом, П-7 и П-8 под фундаментной плитой плотины со стороны нижнего бьефа.

Всего фильтрационный режим в основании контролируется 175 напорными и 10 безнапорными пьезометрами. В последние годы большая часть пьезометров (130 напорных) была автоматизирована, что позволило контролировать изменение фильтрационного потока в режиме реального времени.

По данным наблюдений за установленными пьезометрами были построены эпюры остаточного напора под каждой секцией плотины.

Практически под всеми секциями эпюра остаточного напора имеет одинаковый характер: верховой понурный шпунт очень эффективен и гасит около 70% напора, остальную часть напора гасит королевый шпунт (30%), непосредственно под фундаментной плитой водосливной плотины остаточный напор отсутствует.

За последние 50 лет измеренные значения пьезометрических уровней практически не менялись. Для оценки фильтрационной прочности основания были проверены градиенты фильтрации по контакту фундаментной плиты. Все фактические градиенты напора по своим значениям находятся ниже допустимых для данного вида грунта.

Установленная на водосливной плотине контрольно-измерительная аппаратура работоспособна и обеспечивает надежный контроль безопасной эксплуатации сооружения.

#### *Инструментальное обследование*

В рамках проведенных ранее исследований был выполнен большой объем работ по определению прочности бетона как неразрушающими методами (методом упругого отскока, ультразвуковым методом и механическим методом на отрыв со скалыванием), так и прямым определением прочности характеристик бетона испытанием выбуренных образцов. Исследования неразрушающими методами показали, что для марки бетона М170 фактическая прочность бетона соответствовала прочности М300 - М350, а для проектной марки бетона М250 – фактическая прочность соответствовала в основном М400 - М450. Фактическая прочность бетона, определенная испытанием на сжатие выбуренных образцов, показала, что бетон марки М170 набрал прочность до М350, а бетон марки М250 достиг прочности М400. Инструментальные обследования неразрушающими методами в основном повторили указанные результаты. Прочность бетона водосливной плотины по данным обследований составила 24-34 МПа, в том числе прочность бетона бычков водосливной

плотины составляет 31÷37 МПа, береговых устоев – 36÷37 МПа, а прочность бетона здания ГЭС – 38-43 МПа.

При визуальном обследовании состояния водосливных поверхностей, боковых поверхностей бычков, щитовых помещений были зафиксированы различные дефекты, в том числе: разрушение защитного слоя в зоне переменного уровня, трещины, повреждения бетона в пазах затворов, выщелачивание, фильтрация в трещинах и в межблочных швах.

Так на ряде водосливов были зафиксированы разрушения бетона с оголением арматуры. На бычках - разрушение защитного слоя бетона с обнажением и без обнажения арматуры.

В потерне зафиксированы, в основном, протечки с выщелачиванием по трещинам и по межблочным швам. Все указанные дефекты относятся к классу «В» – дефекты и повреждения локального характера, которые при последующем развитии не могут оказать влияния на состояние основных несущих конструкций сооружения. Поэтому выявленные дефекты требуют выполнения ремонтов для их устранения.

#### *Расчётные исследования*

Для расчёта устойчивости бетонной водосливной плотины была построена плоско-приведенная математическая модель.

В качестве исходных данных для расчетов использовались фактические характеристики бетона и грунтов основания, полученные по результатам обследований и инженерно-геологических изысканий.

Коэффициент надёжности по ответственности сооружения  $\gamma_n=1,25$ . При определении коэффициента запаса на сдвиг водосливной плотины принимались следующие прочностные параметры контактной поверхности:  $\varphi=24$ ,  $C=0,1$  т/м<sup>2</sup>.

В расчётах устойчивости системы «сооружение – основание» рассматривалось основное сочетание нагрузок (при НПУ=53,0 м), и особое сочетание нагрузок - при частичном нарушении работы дренажа. Во всех случаях расчёты производились без учёта поэтапности возведения плотины и

наполнения водохранилища (принималось «мгновенное» возведение плотины и заполнение водохранилища).

Оценка устойчивости водосливной плотины была выполнена по схеме плоского сдвига по контактной поверхности системы «сооружение – основание».

По результатам расчёта НДС были определены сдвигающие и удерживающие силы, действующие на водосливную плотину, по которым был определён коэффициент запаса устойчивости на плоский сдвиг.

Для водосливной плотины минимальный коэффициент запаса устойчивости на плоский сдвиг при основном сочетании нагрузок, с учётом водобойной плиты со стороны нижнего бьефа, составляет 2,04, что на 63,2% больше требуемого нормативного значения. При учёте рисбермы коэффициент запаса устойчивости составляет 2,5, что на 98% выше требуемого нормативного значения.

При особом сочетании нагрузок с учётом одной водобойной плиты со стороны нижнего бьефа коэффициент запаса устойчивости на плоский сдвиг составляет 1,6, что на 46% больше требуемого нормативного значения. При учёте рисбермы коэффициент запаса устойчивости составляет 2,2, что на 94% выше требуемого нормативного значения.

По итогам расчётов определено, что устойчивость водосливной плотины на плоский сдвиг обеспечена, при повышении УВБ до отметки 53,0 м.

### **Сорудерживающее сооружение и подпорные стенки правого и левого берега**

В рамках инструментальных обследований проведены измерения основных линейных размеров конструкции, существенных отклонений от проектной документации не обнаружено.

С помощью молотка Шмидта (склерометр) выполнено определение прочности бетона. Результаты произведённых измерений показали: прочность бетона составляет 24 ÷ 34 МПа. Прочность бетона соответствует принятым в проекте параметрам.

### **Блок монтажной площадки**

С помощью молотка Шмидта (склерометр) выполнено определение прочности бетона. Прочность бетона, определенная на стенках аварийного маслостока (отм. 15,5 м), соответствует 42 МПа, что превышает проектные значения.

### **Блок грязеспуска**

В рамках инструментальных обследований проведены измерения основных линейных размеров конструкции. Существенных отклонений от проектной документации не обнаружено.

С помощью молотка Шмидта (склерометр) выполнено определение прочности бетона. Прочность бетона, определенная в банках грязеспуска (отм. 15,0 м), составляет 31,8 МПа, что выше проектных значений.

### **Пристройка к монтажной площадке**

В рамках инструментального обследования были проведены измерения основных линейных размеров конструкции, проведено сопоставление результатов измерений с проектной документацией. Существенных отклонений не обнаружено.

### **Грунтовая плотина**

Грунтовая плотина длиной 2802 м условно делится на две части: русловую – протяженностью 1305 м и пойменную – 1501 м. Наибольшая высота русловой плотины составляет 45 м, пойменной – 28,5 м. Для контроля осадок плотины на ней через каждые 100 м установлены грунтовые марки, кроме того, на плотине установлены рабочие реперы, оставшиеся от строительного периода.

Для контроля деформаций основания грунтовой плотины в процессе строительства были заложены глубинные плиты-марки. Всего на плотине для контроля за осадками установлено 82 измерительных устройства (поверхностные марки, плиты-марки, рабочие репера).

### *Анализ данных натурных наблюдений*

Осадки пойменной плотины к настоящему времени составили 145-190 мм. Осадки русловой плотины были несколько больше и составили максимально 230 мм.

Осадки имеют слабозатухающий характер. Их интенсивность в пойменной части плотины составляет 1,6-2,2 мм/год, в русловой части 3,0 мм/год.

Осадка основания за весь строительный период и эксплуатационный период составила 360-410 мм.

Начиная с 1958 года, осадка основания составила 70-80 мм, то есть примерно 0,3-0,5 от полной осадки, измеренной на гребне плотины.

Интенсивность осадок плит-марок, начиная с 1978 года, составляет 0,8 мм/год в то время, как поверхностная марка на гребне плотины в этом месте фиксирует 1,6 мм/год.

Грунтовая плотина возведена намывным способом из мелкозернистых грунтов. В основании плотины залегает мощная толща современного аллювия, достигающая в пойменной части толщины 80 м. Особенностью плотины, является значительная ширина её по гребню, составляющая 85 м.

Для контроля фильтрационного режима в теле плотины и в основании установлено 6 створов пьезометров по 4 пьезометра в каждом створе. Часть пьезометров заглублена в основание, однако и они фиксируют уровни воды, соответствующие отметкам депрессионной поверхности в теле плотины.

По данным наблюдений фильтрационный режим в теле плотины и её основании является установившимся. Депрессионная поверхность в теле плотины располагается существенно ниже расчётной.

Средние градиенты фильтрации в основании грунтовой плотины по данным мониторинга пьезометрических напоров, фиксируемых на контакте основания, находятся в пределах 0,03-0,05, что существенно ниже допустимых значений.

### **Дамба №49**

Для контроля за фильтрационным режимом на дамбе по проекту было установлено 70 пьезометров.

Все пьезометры фиксируют положение депрессионной кривой на отм. 29,0-42,0 м. Исключение составляют пьезометры, расположенные в непосредственной близости от водохранилища: П81А\*5, П81\*5, П76\*5, П39А/72. Показания этих пьезометров синхронны с колебаниями уровней верхнего бьефа и близки к ним по значениям.

Фильтрационный режим в теле дамбы за последние 20 лет носит установившийся характер.

Имеющиеся пьезометры обеспечивают надежный контроль состояния дамбы.

### **Дамба №50**

На дамбе 50 по проекту было установлено 28 пьезометров, кроме того, вблизи сопряжения с водосливной плотиной размещены 5 плит – марок – пьезометров.

Все пьезометры имеют высокие коэффициенты корреляции с уровнями бьефов.

В целом, фильтрационный режим в теле дамбы имеет установившийся характер. Имеющихся пьезометров достаточно для осуществления контроля за состоянием сооружения.

### **Дамба №53**

Дамба 53 сопрягает грунтовую и водосливную плотины. По проекту на ней было размещено 54 пьезометра.

По всем пьезометрам за последние 20 лет уровни воды не изменялись и характер колебаний их в зависимости от изменения уровня бьефов оставался постоянным. Уровень корреляции показаний пьезометров с уровнями бьефов высокий, несколько пьезометров имеют невысокие коэффициенты корреляции, но они дублируются показаниями рядом стоящих пьезометров.

Все это свидетельствует о стабилизации фильтрационного режима и работоспособности дамбы №53. Имеющиеся пьезометры обеспечивают полный контроль состояния дамбы №53, размещение дополнительных пьезометров не требуется.

## **Оценка состояния сооружений по результатам подводно-технического обследования**

Подводно-техническое обследование отводящих каналов здания ГЭС, водосливной плотины и акватории грунтовой плотины в верхнем и нижнем бьефах выполняется каждые 5 лет с целью оценки их состояния и обеспечения безопасности гидротехнических сооружений.

На основании полученных обследований выполняется анализ состояния указанных элементов здания ГЭС и водосливной плотины и разрабатываются рекомендации по их дальнейшей эксплуатации.

В 2012-2013 гг. было выполнено подводно-техническое обследование гидротехнических сооружений здания ГЭС, рисбермы водосливной плотины и неукрепленного участка русла расположенного за рисбермами здания ГЭС и водосливной плотины, гидроакустическое и визуальное обследование бетона опорных стенок здания ГЭС и отводящего канала водосливной плотины (состояние бычков и прилегающих стенок). В процессе работы проведено обследование: гидроакустическим методом – площадь обследования составляет 65 га; визуальным методом – площадь обследования составляет 1,8 га; топографическая съёмка надводных частей обследуемых поверхностей: крепления откосов береговых склонов и отмелей – 1,0 га.

При проведении обследования были получены следующие результаты:

– на бетонной рисберме здания ГЭС не отмечается значительных дефектов, наклонная часть рисбермы прикрыта произведенной ранее отсыпкой грунта и не подмыта;

– зона отсыпки, выступающая над отметкой 15,0 м, располагается в конце ковша напротив секции 3 ГЭС и не оказывает существенного влияния на работу ГЭС;

– за ковшом по всей его длине имеется яма размыва с глубинами размыва 1,0 – 4,0 м, за исключением участка напротив секций 2-4 ГЭС, где глубины размывов достигают 17,0 м. По всей видимости, этот размыв сформировался в период пуска во временную эксплуатацию;

– по сравнению с промерами глубин 2008 года в зоне низового откоса ковша рисбермы и ямы размыва произошли размывы на величину до 1,0 м;

– по откосам отводящего канала ГЭС по сравнению с промерами 2008 года отмечаются зоны пониженных отметок. Величина просадок составляет до 1,0 м;

– бетонные стенки отводящего канала ГЭС существенных дефектов не имеют, их подмыва не обнаружено;

– в ходе подводно-технического обследования отводящего канала ГЭС отмечается, что существенных изменений состояния ГТС по сравнению с обследованием 2008 года не произошло;

– гидроакустическое обследование правой и левой стенок отводящего канала водосливной плотины показало, что на бетоне имеются незначительные поверхностные разрушения. Подмывов правой и левой стенок отводящего канала водосливной плотины не обнаружено;

– в ходе подводно-технического обследования отводящего канала водосливной плотины отмечается, что существенных изменений состояния ГТС по сравнению с обследованием 2008 года не произошло.

В 2018 г. выполнено подводно-техническое обследование следующих сооружений гидроузла: отдельные стены и быки, сопрягающие устои, откосы и бермы, водобойи и рисбермы, крепление ковша, подпорные стенки, шашки гасители (1 ряд – 129 шт., 2 ряд – 95 шт.), рассекатели (20 шт.), водобойные стенки (2 шт.).

Площадь подводно-технического обследования составила 165 га. Площадь, обследуемая площадной фото – видеосъемкой сопряжений откосов и подпорных вертикальных стен сооружений с горизонтальной поверхностью дна составила 2,8 га.

При проведении обследования были получены следующие результаты:

- на бетонной рисберме ГЭС не отмечается значительных дефектов, наклонная часть рисбермы прикрыта ранее произведенной отсыпкой грунта и не подмыта. Зона отсыпки, выступающая над отметкой 15,0 м, располагается в конце ковша напротив секции 3 ГЭС и не оказывает существенного влияния на работу ГЭС;

- на неукрепленном участке дна за ковшом по всей его длине имеется незначительный размыв грунта с отметками дна 13,5 – 15,0 м, за исключением участка напротив секций 2-4 ГЭС, где глубины размывов достигают отметки - 2,0 м. В сравнении с площадной съёмкой 2013 года в зоне ковша произошли размывы каменной наброски в основном на величину до 1,0 м, и лишь напротив секции 9 ГЭС величина размывов увеличилась на 2,0 м. Размывы каменной отсыпки в этой зоне достигли бетонной наклонной рисбермы;

- в зоне каменного крепления левого берега отводящего канала Жигулевской ГЭС отмечаются размывы крепления. Наибольшие размывы достигают отметок дна 20,0 м (при проектном положении 23,0 м). Сопоставление с данными съёмки 2013 года показывает наличие динамики размывов каменной отсыпки вдоль левого берега канала ГЭС. Глубины размывов в этой зоне увеличились до 2,0 м;

- бетон правой и левой стенок отводящего канала ГЭС, а также бетон быков и полубыков здания ГЭС находится в удовлетворительном состоянии, имеются незначительные поверхностные разрушения бетона, в основном приуроченные к строительным швам. Имеющиеся разрушения бетона не оказывают влияние на работоспособность и безопасность ГЭС. Подмыва правой и левой стенок отводящего канала ГЭС не наблюдается;

- бетонное крепление отводящего канала водосливной плотины находится в проектном положении. Деформаций и разрушений рисбермы не отмечается. Подмывов наклонной части рисбермы не отмечается;

- дно ковша, располагающегося за наклонной рисбермой, имеет отметки выше проектных отметок. Величина превышения отметок дна ковша

над проектными отметками в среднем составляет от 0,5 до 1,5 м. В ковше имеется тенденция к понижению отметок дна. В среднем величина размывов дна ковша за 5 лет не превышает 0,5 м;

- неукрепленный участок дна отводящего канала за пределами ковша размыт по всей его ширине и на всей обследованной длине. Глубина размывов достигает отметки -6,0 м. Имеется тенденция к увеличению глубин размыва на неукрепленном участке отводящего канала водосливной плотины;

- гидроакустическое обследование подпорных стенок, шашек гасителей, рассекателей и водобойных стенок отводящего канала водосливной плотины показало, что критических дефектов, влияющих на безопасность гидросооружения, не отмечается. Нарушений целостности шашек гасителей, рассекателей и водобойных стенок, а также подмыва правой и левой подпорных стенок отводящего канала водосливной плотины не отмечается. Имеющиеся размывы неукрепленного участка дна за ковшом в настоящее время опасности для подмыва ковша и наклонной рисбермы не создают;

- на расстоянии 500 м от дамбы №49 отмечается зона понижения отметок подводной части верхового откоса грунтовой плотины. Зона понижения отметок захватывает берму на отметке 41,0 м. Отметки в зоне понижения на берме достигают 37,0 м. Сопоставление с данными съёмки 2008 года показывает понижение отметки в этой зоне до 2,0 м;

- подмывов откоса грунтовой плотины и русловых процессов, которые могут влиять на безопасность грунтовой плотины, не отмечается. Сравнительный анализ с промерами 2008 г. показал, что величина размывов и намывов не превышает 1,0 м, что свидетельствует о незначительном переформировании рельефа дна за счёт перераспределения намыва и размыва грунтов, слагающих дно реки.

По результатам подводно-технического обследования, выполненного в 2018 году, рекомендуется:

- выполнить отсыпку участка за ковшом напротив секций 2 - 4 здания ГЭС;

- выполнить отсыпку участка каменного крепления вдоль левого берега канала ГЭС со стороны дамбы №49 до проектных отметок;
- с целью планового предотвращения прогрессирующих размывов в ковше напротив секций 12 – 14 здания ГЭС, предлагается выполнить крепление откоса ямы размыва;
- произвести отсыпку участков размыва дна ковша напротив секций 7 и 10 здания ГЭС;
- для уточнения состояния крепления откоса грунтовой плотины в зоне понижения отметок подводной части верхового откоса на расстояние 500 м от дамбы №49 необходимо провести дополнительное водолазное обследование и по результатам проведённого водолазного обследования определить состояние железобетонного крепления, установить по возможности причину понижения отметок и определить мероприятия по дальнейшей безопасной эксплуатации верхового откоса грунтовой плотины. В настоящее время выявленное понижение отметок не оказывает влияния на работоспособное состояние верхового откоса грунтовой плотины, однако, необходимо периодичность промеров дна собственными силами на данном участке изменить с 5 лет на ежегодное.

## **РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЭС**

В результате выполненных исследований состояние гидротехнических сооружений Жигулевской ГЭС оценивается следующим образом.

### ***Здание ГЭС***

Основные осадки здания ГЭС произошли до 1975 г., за последние 44 года эксплуатации интенсивность осадки составила 0,8 мм/год и имеет затухающий характер.

Фильтрационный режим в основании станции имеет установившийся характер и практически меняется на протяжении последних 20 лет. Эпюра противодействия в основании здания ГЭС не превышает проектных значений и обеспечивает устойчивость сооружения. Количество установленной КИА обеспечивает надежный контроль состояния здания ГЭС.

Обследование бетона здания ГЭС показало упрочнение бетона за время эксплуатации более чем на 30%. Выявленные дефекты бетонных поверхностей относятся к категории «В» и не создают угрозы снижения прочности сооружения.

В рамках инструментальных обследований проведены измерения основных линейных размеров конструкции, существенных отклонений от проектной документации не обнаружено. Выполненные расчеты показали, что устойчивость здания ГЭС при основном и особом сочетании нагрузок обеспечивается полностью.

### ***Водосливная плотина***

Максимальные осадки секции водосливной плотины в настоящее время не превысили 210 мм, интенсивность роста осадки составляет 0,2-0,3 мм/год, что свидетельствует о практическом затухании осадок. Шесть рядов закладных пьезометров надежно контролируют фильтрационный режим в основании плотины. Противофильтрационные элементы работают эффективно, поэтому остаточный напор под плотиной отсутствует. За последние 50 лет значения пьезометрических уровней практически не менялись, то есть фильтрационный

режим в основании имеет установившийся характер. Согласно расчетам, устойчивость плотины обеспечена с запасом.

Установленная КИА полностью обеспечивает контроль безопасного состояния сооружения.

Автоматизированная система опроса КИА, введенная в строй в 2017 г., позволяет оценивать изменения в состоянии сооружения в режиме реального времени.

Прочность бетона водосливной плотины по данным инструментальных обследований повысилась относительно проектных значений в 1,3 - 1,6 раза. Выявленные в ходе обследований поверхностные дефекты относятся к категории «В» и при их развитии не представляют опасности для сооружения.

В рамках инструментальных обследований проведены измерения основных линейных размеров конструкции, существенных отклонений от проектной документации не обнаружено.

#### ***Сороудерживающее сооружение и подпорные стенки правого и левого берега***

По результатам проведенных обследований составлены ведомости и даны рекомендации по выполнению ремонтных работ.

#### ***Блок монтажной площадки, блок грязеспуска***

Дефектов и повреждений категории «А» и «Б» не обнаружено. Устранение дефектов категории «В»: должны выполняться в процессе ремонтных работ.

#### ***Блок грязеспуска***

В рамках выполнения обследований дефектов и повреждений категории «А», «Б» не выявлено, срочного устранения дефектов и повреждений не требуется.

#### ***Пристройка к монтажной площадке***

По результатам проведенных обследований составлены ведомости и даны рекомендации по выполнению ремонтных работ.

### ***Грунтовая плотина***

Максимальные осадки грунтовой плотины за весь период эксплуатации составили 230 мм. Осадки имеют слабозатухающий характер, интенсивность их составляет 2,2 - 3,0 мм/год. Часть осадки плотины формируется за счет осадки основания, интенсивность осадки которого составляет 0,8 мм/год. Депрессионная поверхность в теле плотины значительно ниже расчетной кривой. Фильтрационный режим в теле плотины и в основании является установившимся. Расчеты устойчивости верхового и низового откосов плотины показали, что коэффициенты запаса устойчивости при учете статических и сейсмических воздействий превышают нормативные.

### ***Дамба №49***

Фильтрационный режим в теле дамбы за последние 20 лет носит установившийся характер.

Имеющееся количество пьезометров обеспечивает надежный контроль состояния дамбы.

### ***Дамба №50***

Фильтрационный режим в теле дамбы имеет установившийся характер. Имеющихся пьезометров достаточно для осуществления контроля за состоянием сооружения.

### ***Дамба №53***

Фильтрационный режим дамбы №53 стабилизировался. Имеющиеся пьезометры обеспечивают полный контроль состояния, размещение дополнительных пьезометров не требуется.

***Подводно-техническое обследование*** отводящего канала ГЭС, отводящего канала водосливной плотины, верхнего и нижнего бьефов грунтовой плотины показало, что дефектов, которые могут повлиять на работоспособность и безопасность гидротехнических сооружений, не наблюдается.

### ***Рекомендации по обеспечению безопасной эксплуатации ГЭС***

В ходе проведения обследований гидротехнических сооружений Жигулёвской ГЭС не обнаружено дефектов и повреждений, влияющих на работоспособность сооружений, сооружения находятся в работоспособном техническом состоянии и пригодны для дальнейшей эксплуатации.

### ***Здание ГЭС***

Для поддержания сооружения в работоспособном состоянии необходимо выполнить следующие рекомендации:

- В щитовом отделении нижнего бьефа (отм. 41,5 м) провести ремонт бетонной поверхности с оголенной арматурой под ливневыми стоками.
- На отм. 28,9 м выявлено трещинообразование на потолочных плитах перекрытия, необходимо устранить протечки масла и провести ремонтные работы по восстановлению защитного слоя с зачисткой поверхностей, устранением поврежденных участков, заделкой трещин, оштукатуриванием и побелкой.
- На отм. 37,25 м (турбинное отделение) необходимо выполнить усиление перекрытий в секциях 1-10 по разработанному специализированной организацией проекту, до усиления продолжать наблюдения по установленным маякам и дополнительно установить маяки в секциях 1 - 9.
- При анализе результатов особое внимание уделять контролю за пьезометрическими напорами за верховым зубом в основании фундаментной плиты здания ГЭС под секциями 3 и 4, где фиксируются наибольшие градиенты фильтрационного напора (ПЗ-3 и ПЗ-4).

### ***Водосливная плотина***

Для поддержания сооружения в работоспособном состоянии необходимо выполнить следующие рекомендации:

- выполнить работы по устранению повреждений железобетонной поверхности водосливных граней с оголением арматурной сетки (в пролетах №№ 2, 3, 9, 13, 14, 15, 17, 21, 28, 35, 38), локальные разрушения защитного слоя бетона с оголением арматуры: бычок №19 - правобережная грань со стороны

НБ; бычок №25 – правобережная грань со стороны НБ вблизи площадки на отм. 55,7 м; левобережная грань бычка №12 вблизи границы с мачтовой стенкой; левобережная грань со стороны НБ бычка №29 вблизи площадки на отм. 55,7 м; потолок потерны (секция 10).

- произвести замену металлических листов-настилов, закрывающих межсекционные швы на отм. 55,7 м со стороны НБ.

Восстановление водосливной поверхности проводить после прохождения паводка при закрытых затворах, температурах не ниже 10°C, первоочередными для выполнения ремонтных работ являются поверхности пролетов №№13, 15, 35, 38, очередность проведения ремонтных работ по устранению остальных дефектов определяется службой эксплуатации.

### ***Сороудерживающее сооружение и подпорные стенки правого и левого берега***

Для поддержания сооружения в работоспособном состоянии необходимо выполнить ремонтные работы по восстановлению участков разрушенного бетона с оголением арматуры под ливневыми стоками, расположенными напротив пролетов I – VII со стороны блока монтажной площадки и пристройке к ней.

### ***Грунтовая плотина***

Для поддержания сооружения в работоспособном состоянии рекомендуется:

- силами станции проводить ежегодное подводно-техническое обследование состояния верхового откоса грунтовой плотины в зоне выявленного понижения отметок.

- не допускать зарастания откосов низового крепления грунтовой плотины деревьями и кустарниками.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 2**

## **1) МНОГОФАКТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ СО СРОКОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ БОЛЕЕ 25 ЛЕТ**

### **Программа многофакторных исследований ГТС. Проведение натуральных (полевых) работ по комплексному обследованию и геодезическим измерениям**

#### **ВЫВОДЫ**

В рамках инструментальных обследований проведены измерения основных линейных размеров конструкции водосливной плотины, существенных отклонений от проектной документации не обнаружено. В рамках инструментального обследования определялась прочность бетона неразрушающим методом. Результаты произведённых измерений показали: прочность бетона бычков водосливной плотины составляет 31÷37 МПа, береговых устоев – 36÷37 МПа, в потерне водосливной плотины в районе береговых устоев – 37 МПа, в секциях – 19÷33 МПа.

По результатам проведенных обследований составлены ведомости и схемы дефектов, даны рекомендации по выполнению ремонтных работ. Первоочередными являются работы по устранению повреждений железобетонной поверхности водосливных граней с оголением арматурной сетки, локальные разрушения защитного слоя бетона с оголением арматуры. Необходимо произвести замену металлических листов-настилов, закрывающих межсекционные швы на отм. 55,7 м со стороны НБ. Очередность выполнения работ по устранению остальных дефектов определяется службой эксплуатации.

В ходе проведения обследований водосливной плотины дефектов и повреждений, влияющих на работоспособность сооружения, не обнаружено. Сооружение соответствует требованиям нормативной документации по прочностным характеристикам, находится в работоспособном техническом состоянии и пригодно для дальнейшей эксплуатации.

\*...\*...\*

В рамках инструментальных обследований проведены измерения основных линейных размеров конструкции здания ГЭС, существенных

отклонений от проектной документации не обнаружено. С помощью неразрушающих методов контроля выполнено определение прочности бетона. Результаты измерений в щитовом отделении верхнего бьефа (отм. 55,5 м), показали прочность бетона 26÷32 МПа. На отм. 28,9 м трещинообразование на потолочных плитах перекрытия, необходимо устранить протечки масла и провести ремонтные работы по восстановлению защитного слоя: зачистка поверхностей трещинообразования с устранением поврежденных участков, заделка трещин, оштукатуривание и побелка.

В ходе проведения обследований здания ГЭС дефектов и повреждений, влияющих на работоспособность сооружения, не обнаружено. Сооружение соответствует требованиям нормативной документации по прочностным характеристикам, находится в работоспособном техническом состоянии и пригодно для дальнейшей эксплуатации.

\*...\*...\*

Для анализа состояния волнозащитного крепления верхового откоса грунтовой плотины выбраны участки с нарушениями плит крепления или уплотнения швов.

Инструментально обследованы с помощью импульсной дефектоскопии 63 плиты в прибойной зоне верховых откосов грунтовой плотины и дамб №№49, 50 и 53, а также на низовых откосах дамб №№49 и 50. Георадаром обследованы 35 плит верхового откоса грунтовой плотины и 6 плит низового откоса дамбы №49.

Контакт плит с основанием для верхового откоса грунтовой плотины и дамбы № 50, а также дамб №49 и №53 (верховой и низовой откосы) нормальный, за исключением 8 из обследованных плит, где контакт ослаблен. Возможны наличия пустот глубиной от 4 до 20 см.

Георадарное обследование волнозащитного крепления откоса грунтовой плотины подтвердило наличие контакта плит с основанием на верховом откосе грунтовой плотины.

Ведомости дефектов контакта плит крепления откосов с основанием представлены в таблице 5.4.

## **2) МНОГОФАКТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ СО СРОКОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ БОЛЕЕ 25 ЛЕТ**

### **Анализ данных натуральных наблюдений за поведением гидротехнических сооружений**

#### **ВЫВОДЫ**

1. В рамках проведения многофакторных исследований гидротехнических сооружений Жигулевской ГЭС был выполнен анализ данных натуральных наблюдений за поведением гидротехнических сооружений Жигулевской ГЭС.

2. Контроль за деформациями здания ГЭС и сопрягающих устройств осуществляется по 361-й осадочной марке, 76-и щелемерам и 30-ти створным знакам.

Для наблюдений за осадками здания ГЭС и сородерживающего сооружения на них были размещены поверхностные бетонные марки и щелемеры, установленные в 6-ти продольных створах.

Все марки располагались в непосредственной близости от межсекционных швов. Таким образом, они позволяли определить не только общую осадку, но и неравномерную осадку каждой секции здания ГЭС, как в поперечном, так и в продольном направлениях.

Наблюдаемые осадки здания ГЭС соответствуют геологии основания. Основная осадка здания ГЭС произошла до 1975 г., то есть относится к периоду окончания строительства и наполнения водохранилища. За последние 44 года эксплуатации интенсивность осадок всех секций составляла 0,8 мм/год. Только по секции 9 в примыкании к грунтовой плотине интенсивность осадки составляла 1,1 мм/год до 2003 г. После 2003 г. интенсивность осадок по всем маркам снизилась.

Максимальная неравномерность осадки здания ГЭС за весь период наблюдений не превышала 150 мм на длине 130 м. Основная неравномерность осадки формировалась в основании пристройки только по секциям 1 и 9, по остальным секциям осадка их в направлении вдоль потока была равномерной.

В целом осадки здания ГЭС следует считать затухающими. Количество марок, установленных для контроля осадок, полностью обеспечивает предъявляемые требования по оценке деформации секции здания ГЭС.

3. Для наблюдения за осадками водосливной плотины размещены 2 створа поверхностных марок и 2 створа щелемеров. Кроме того, в потерне водосливной плотины располагается створ щелемеров и створных знаков. Всего на водосливной плотине установлено 143 марки и 67 щелемеров. Полные осадки водосливной плотины по показаниям щелемеров составляют на текущий момент 175...230 мм, по показаниям осадочных марок – 160 ... 200 мм. Разница в осадках объясняется тем, что осадочные марки были установлены позже щелемеров. Основная осадка плотины произошла в период строительства и в первый период эксплуатации.

К 1969 году осадки водосливной плотины, измеренные по щелемерам, находились в пределах 165 ... 200 мм, по маркам – в пределах 145 ... 180 мм. За последующие 50 лет (до 2019 г.) осадка секции водосливной плотины увеличилась всего на 20 ... 30 мм. Осадки водосливной плотины по ее длине достаточно равномерны; исключения составляют секции 1 и 2, где наблюдается увеличение осадки, связанное с наличием в основании этих секций глинистых песков и глин. После 1969 года интенсивность осадки по средним секциям не превышает 0,2 ... 0,3 мм в год, по примыкающим к устоям секциям интенсивность осадки составляет 0,5 ... 0,6 мм в год. В целом, характер изменения осадок секций водосливной плотины свидетельствует о процессе их затухания.

Установленная КИА полностью обеспечивает контроль состояния водосливной плотины при всех режимах работы.

4. Для контроля за осадками земляная плотина оснащена большим количеством грунтовых марок (ПК) и рабочих реперов (РР), оставшихся от строительного периода. Грунтовые марки размещены на гребне плотины через каждые 100 м по длине. Кроме того, в пяти поперечных створах размещены по три марки ПГМ для определения осадок в поперечном направлении. Для контроля осадок основания по подошве земляной плотины были заложены

глубинные плиты - марки, с помощью которых можно было разделить осадку тела плотины и основания. Глубинные марки были размещены по четыре плиты-марки во II, III, IV створах, по две плиты – марки в створах V и VII и одна плита-марка в створе VIII.

Всего на плотине для контроля за осадками установлено 82 измерительных устройства (поверхностные марки, плиты-марки, рабочие реперы).

Осадки всех марок имеют слабозатухающий характер. В пойменной части их значения находятся в диапазоне от 145 до 190 мм на середину 2018 г. В русловой части максимальные значения осадок достигают 230 мм (ПК 34 и ПК 38). Интенсивность осадок марок в пойменной части оставляет 2,2 мм/год, а в русловой части 3,0 мм/год.

Осадка основания за строительный и эксплуатационный периоды составила 360...410 мм.

Интенсивность осадок плит-марок, начиная с 1978 года, составляет 0,8 мм/год в то время, как поверхностная марка на гребне плотины в этом месте фиксирует 1,6 мм/год.

В целом, осадки земляной плотины еще продолжаются, причем интенсивность осадки основания плотины составляет 1,5 мм/год, и примерно с такой же интенсивностью консолидируются грунты тела плотины.

Установленные геодезические измерительные приборы полностью обеспечивает контроль деформаций земляной плотины.

5. Для контроля фильтрационного режима по подошве здания ГЭС были размещены шесть створов закладных пьезометров. Эти пьезометры измеряют фильтрационное противодавление по подошве сооружения в пределах каждой из секций здания. Наблюдения показали, что противодавление под фундаментной плитой и понуром различается от секции к секции, что связано с геологией основания. Анкерный понур расположен на слабопроницаемых грунтах, верховой зуб врезан в водоупорные глины, а наиболее водопроницаемые грунты расположены со стороны нижнего бьефа, выполняя функции естественной дрены под зданием ГЭС. Фильтрационный режим в

основании здания ГЭС под разными секциями различен. Так, шпунт под фундаментной плитой СУС и анкерный понур под секциями 1, 5, 6, 7 гасят 20-30% напора, под секциями 8-10 - 30-40%, а под секциями 3 и 4 напор гасится незначительно. Указанный характер фильтрационного режима свидетельствует о том, что противofильтрационные элементы на входном участке здания ГЭС в конкретных геологических условиях оказались не очень эффективными.

Наибольшие градиенты фильтрационного напора наблюдаются на верхнем зубе фундаментной плиты здания ГЭС и составляют под секцией 3-0,74, а под секцией 4 – 0,60. Учитывая, что допустимые градиенты напора для Кеннельских глин составляет 1,35, максимальные измеренные значения градиентов фильтрации меньше допустимых.

Установленная фильтрационная КИА обеспечивает контроль фильтрационного режима здания ГЭС.

6. Для контроля фильтрационного режима в основании водосливной плотины по ее подошве установлено 6 рядов закладных пьезометров: ряд П-2 непосредственно за понурным шпунтом, ряд П-1 в середине понура, П-3 перед королёвым шпунтом, П-4 – за королёвым шпунтом, П7 и П8 под фундаментной плитой плотины со стороны нижнего бьефа.

Всего фильтрационный режим в основании контролируется 175 напорными и 10 безнапорными пьезометрами. В последние годы большая часть пьезометров (130 напорных) была автоматизирована, что позволило контролировать изменение фильтрационного потока в режиме реального времени.

За последние 50 лет измеренные значения пьезометрических уровней практически не менялись. Для оценки фильтрационной прочности основания были проверены градиенты фильтрации по контакту фундаментной плиты. Все фактические градиенты напора по своим значениям находятся ниже допустимых для данного вида грунта.

Установленная на водосливной плотине контрольно-измерительная фильтрационная аппаратура работоспособна и обеспечивает надежный контроль безопасной эксплуатации сооружения.

7. Для контроля фильтрационного режима в теле и основании земляной плотины установлено 6 створов пьезометров по 4 пьезометра в каждом створе. Расстояние между створами 400 м. Часть пьезометров заглублена в основание, однако и они фиксируют уровни воды, соответствующие отметкам депрессионной поверхности в теле плотины.

По показаниям всех пьезометров депрессионная поверхность имеет линейно понижающийся характер в сторону НБ, одинаковый по всем шести створам. понижаясь на 1-2 м за последние 20 лет Исключение составляет створ IV-VI, в котором кривая расположена выше примерно на 2,5 м относительно других створов.

По данным наблюдений можно констатировать, что фильтрационный режим в теле и в основании земляной плотины является установившемся. Положение фактической депрессионной кривой в теле плотины существенно ниже расчетной кривой.

Крепление верхового откоса железобетонными плитами обеспечивает падение напора на 10-12 м.

**Фильтрация в дамбе 49.** На дамбе 49 замеры снимаются по 52 приборам.

Все пьезометры фиксируют положение депрессионной кривой на отм. 29,0...42,0 м. Исключение составляют пьезометры, расположенные в непосредственной близости от водохранилища (П81А\*5, П81\*5, П76\*5, П39А/72), показания которых синхронны с колебаниями уровней верхнего бьефа и близки к ним по значениям.

Фильтрационный режим в теле дамбы 49 за последние 20 лет носит установившийся характер.

Имеющееся количество работоспособных пьезометров обеспечивает надежный контроль состояния дамбы.

**Фильтрация в дамбе 50.** На дамбе 50 замеры ведутся по 27 приборам. Кроме того, вблизи сопряжения с водосливной плотиной размещены 5 плит – марок – пьезометров.

Большинство установленных пьезометров фиксируют уровни воды в теле дамбы на отм. 31,0...39,0 м. Колебания уровней в пьезометрах синхронны с колебаниями уровней в нижнем бьефе (рис. 2.5.2). Исключение составляют показания пьезометров, расположенных вблизи верхнего бьефа (П13\*7, П14\*7, ПМП1\*7, ПМП2\*7, ПМП3\*7), уровни воды в которых синхронны с колебаниями уровней верхнего бьефа, и находятся в пределах отм. 37,0...45,0 м.

В целом, фильтрационный режим в теле дамбы 50 имеет установившийся характер. Работоспособных пьезометров достаточно для осуществления контроля за состоянием сооружений.

**Фильтрация в дамбе 53.** Дамба 53 сопрягает грунтовую и водосливную плотины. Замеры выполняются по 52 пьезометрам.

По всем пьезометрам за последние 20 лет уровни воды не изменялись и характер колебаний их в зависимости от изменения уровня бьефов остался постоянным.

Все это свидетельствует о стабилизировавшемся фильтрационном режиме и работоспособности дамбы 53. Действующие пьезометры обеспечивают полный контроль состояния дамбы 53, размещение дополнительных пьезометров не требуется.

Установленная на земляной плотине и на дамбах контрольно-измерительная фильтрационная аппаратура работоспособна и обеспечивает контроль фильтрационного режима.

8. Сопоставление величин, полученных в ходе натурных наблюдений, с критериальными значениями показало, что превышений критериальных значений не отмечается.

9. В рамках проведения многофакторных исследований гидротехнических сооружений Жигулевской ГЭС были выполнены лабораторные испытания образцов бетона фундаментной плиты здания ГЭС и грунтов основания (в пределах секции 4).

### **3) МНОГОФАКТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ СО СРОКОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ БОЛЕЕ 25 ЛЕТ**

#### **Расчеты НДС и устойчивости ГТС, оценка технического состояния. Рекомендации по обеспечению безопасной эксплуатации**

#### **ВЫВОДЫ**

1. Расчётные исследования, выполненные в соответствии с требованиями СП 39.13330.2012, позволяют оценить фактическое состояние гидротехнических сооружений.

2. Анализируя различные методы расчёта, можно сделать вывод, что для оценки состояния грунтовых гидротехнические сооружения на однородных основаниях, не имеющих линз слабых грунтов, возможно использовать любые методы (численные, приближенные, инженерные, аналитические).

3. Численные методы (PLAXIS) позволяют получить более точные коэффициенты устойчивости грунтовых сооружений, при этом коэффициент  $\gamma_c$  принимается равным 1.0, а не 0,95, как в инженерных (упрощённых) расчетах. Это в итоге даёт равные величины запасов относительно абсолютных значений  $k_n$ .

4. Характерным примером корректного выбора метода расчёта являются результаты, полученные в таблице 1.10.5. Для грунтовых плотин на сложных неоднородных основаниях, перемежающихся слабыми грунтами, иловыми отложениями, прослойками увлажнённой глины инженерные методы дают высокие значения коэффициентов устойчивости, которые соответствуют нормативным значениям. Однако фактическое состояние иное, слабые грунты в основании (линза илов) создают ослабленную зону, которая изменяет классическую кривую обрушения. При этом расчёты численными методами показывают, что коэффициент ниже нормативной величины и требуются работы по предотвращению повреждения объекта.

5. При наличии линзы слабого грунта оползание откоса будет происходить по этой линзе в отличие от теории круглоцилиндрических поверхностей скольжения. В расчетах произойдет усреднение данной линзы и её влияние сведётся к минимуму.

6. Для расчётов ГТС в сложных инженерно-геологических условиях необходимо использовать современные численные расчётные комплексы, позволяющие учитывать нелинейное поведение грунтов.

7. При проектировании необходимо принимать ответственные решения по выбору правильного программного комплекса и метода расчётных исследований, исходя из условий возведения объекта, его геологического строения, а также изученности физико-механических характеристик. В ряде случаев инженерная ошибка может привести к необратимым последствиям, повреждению или разрушению гидротехнического сооружения.

*Учебное издание*

**Рубин Олег Дмитриевич  
Ханов Нартмир Владимирович  
Лисичкин Сергей Евгеньевич  
Антонов Антон Сергеевич**

**МНОГОФАКТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ СО  
СРОКОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ БОЛЕЕ 25 ЛЕТ**

**Расчеты НДС и устойчивости ГТС, оценка технического состояния.  
Рекомендации по обеспечению безопасной эксплуатации**

*Учебное пособие*

Обложка художника  
Компьютерная верстка  
Корректор

---

Подписано в печать    Формат 60×84 1/16

Бумага писчая    Гарнитура шрифта «Times New Roman»    Печать офсетная

Печ. л.    Тираж    экз.    Изд. Заказ    Тип заказа

---