

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <https://naukovedenie.ru/>

Том 9, №6 (2017) <https://naukovedenie.ru/vol9-6.php>

URL статьи: <https://naukovedenie.ru/PDF/72TVN617.pdf>

Статья опубликована 21.12.2017

Ссылка для цитирования этой статьи:

Саинов М.П., Гапеев Д.С., Кудрявцев Г.М. Влияние напряжённого состояния каменно-земляной плотины на устойчивость её откосов // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №6 (2017)

<https://naukovedenie.ru/PDF/72TVN617.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 626.01, 624.136, 624.137

Саинов Михаил Петрович

ФГОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Россия, Москва¹
Доцент кафедры «Гидравлики и гидротехнического строительства»

Кандидат технических наук

E-mail: mp_sainov@mail.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=427608

Гапеев Дмитрий Сергеевич

ФГОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Россия, Москва

Студент магистратуры

E-mail: gapeev.mitya@yandex.ru

Кудрявцев Григорий Михайлович

ФГОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Россия, Москва

Старший преподаватель кафедры «Гидравлики и гидротехнического строительства»

E-mail: gregik@mail.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=689820

Влияние напряжённого состояния каменно-земляной плотины на устойчивость её откосов

Аннотация. С помощью специально разработанной вычислительной программы проведено исследование влияния напряжённого состояния плотины на коэффициенты устойчивости её откосов при основном и особом сочетании нагрузок. Использовался метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения. Целью исследования явилась оценка неточностей результатов расчётов устойчивости откосов по приближённому инженерному методу, которые вносят упрощением расчётной схемы восприятия нагрузок. Исследование проводилось для каменно-земляной плотины высотой 133 м. Путём численного моделирования были определены напряжённо-деформированное состояние плотины, её формы собственных колебаний и действующие на неё сейсмические нагрузки. Учёт характера распределения напряжений в теле плотины выявил дополнительный запас устойчивости откосов плотины при основном сочетании нагрузок по сравнению с результатами, полученными по упрощённой схеме. Это объясняется перераспределением напряжений в теле плотины. При расчёте устойчивости откосов на особое сочетание нагрузок (с учётом сейсмического воздействия) учёт напряжённого состояния выявил понижение запаса устойчивости верхового откоса. Это объясняется неблагоприятным напряжённым состоянием верховой упорной призмы при сейсмическом воздействии. Можно ожидать, что при высоких сейсмических воздействиях за

¹ 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26

счёт образования зон разуплотнения грунта запас устойчивости верхового откоса будет ниже нормативного.

Ключевые слова: каменно-земляная плотина; устойчивость откосов; напряжённо-деформированное состояние; численное моделирование; сейсмические нагрузки

Введение

Взаимосвязь напряжённо-деформированного состояния (НДС) и устойчивости сооружения является очевидной. Эта связь чётко проявляется в грунтовых сооружениях (плотин, склонов и др.) – потеря устойчивости откоса всегда вызвана нарушением прочности грунта и представляет собой быстроразвивающийся процесс разрушения грунтового массива.

По этой причине многие исследователи занимались вопросами влияния НДС сооружения на устойчивость его откосов [4, 9, 12].

Однако при расчётном обосновании грунтовых сооружений расчёты НДС и расчёты устойчивости как правило проводятся отдельно друг от друга и не увязываются между собой. Это объясняется кардинальным различием задач о НДС и об устойчивости сооружений – они имеют разные цели и расчётные предпосылки. Расчёты устойчивости проводятся с целью оценить запас устойчивости сооружения, поэтому в них рассматривается гипотетический случай возможного разрушения сооружения. А расчёты НДС проводятся для реального состояния сооружения, их задача – определить действительные деформации сооружения и напряжения в нём для проверки прочности. По этой причине эти задачи решаются отдельно и как правило при решении задач об устойчивости не учитывают результаты решения задач о НДС сооружения.

Чаще всего расчёты устойчивости откосов ведут по упрощённым инженерным методикам, в которых НДС грунтового массива определяется на основе упрощающих допущений [6, 8]. С развитием численного моделирования стали применять методы расчёта устойчивости, основанные на решении задачи о НДС в предельном состоянии. Такие возможности дают вычислительные комплексы Plaxis [3], Midas и другие. Методика решения задачи заключается в доведении сооружения до разрушения. Это достигается искусственными способами – либо производят занижение прочностных показателей материалов, либо завышают действующие на него нагрузки. Оценка запаса устойчивости сооружения проводят как отношение действительных параметров к тем, которые понадобились для разрушения сооружения. Однако результаты, полученные по данной методике, тоже являются приближёнными, т. к. при использовании искажаются характер и условия работы сооружения.

Таким образом, можно утверждать, что не существует строгих решений задач об устойчивости сооружения, что запас устойчивости сооружения не может быть определён точно.

По этой причине при увязывании задач о НДС и об устойчивости сооружения мы решили пойти более простым путём. Он заключается в том, чтобы при подсчёте сил сопротивления грунтов сдвигу учитывать распределение напряжений, полученное из решения задачи о НДС сооружения.

Метод и методика

Для учёта НДС сооружения при расчёте устойчивости откосов использовалась специальная вычислительная программа Otkos_N. Для оценки устойчивости в программе использован метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения в интерпретации Терцаги

[1, 2, 13, 14]. Рассматривается множество круговых (для плоской задачи) поверхностей скольжения, различающихся положением центра и радиусом, и из них выбирается наиболее вероятная – та, которая имеет минимальный запас устойчивости. Коэффициент (запаса) устойчивости массива грунта, ограниченного поверхностью скольжения, определяется как отношение момент удерживающих сил (сил трения и сцепления) к моменту опрокидывающих сил. Для определения удерживающей силы сопротивления грунта сдвигу используется закон Кулона-Мора [1, 5, 13].

Отличием методики расчёта, реализованной в вычислительной программе, от общепринятой является то, что при подсчёте силы трения на поверхности скольжения используется распределение нормальных напряжений, полученное из решения задачи о НДС сооружения. Чтобы отразить сложный характер распределения напряжений в теле сооружения, оно разбивается на множество мелких элементов, в каждом из которых имеется информация о напряжённом состоянии. Подробнее методика расчёта, реализованная в вычислительной программе, описана в [11].

Для определения НДС сооружения использовалась вычислительная программа Nds_N, которая позволяет вести расчёт с учётом технологической схемы возведения и нагружения сооружения, а также нелинейный характер деформирования грунтов [10]. Программа использует метод конечных элементов. Для описания нелинейности деформирования грунтов использовалась модель проф. Рассказова Л. Н. [7]. Принятые параметры деформирования грунтов приближённо соответствуют следующим значениям модулей деформации грунтов E : для гравийно-галечникового грунта $E = 100$ МПа, для горной массы $E = 60$ МПа, для суглинка $E = 27$ МПа. При расчётах учитывался эффект различия деформируемости грунтов на траекториях активного нагружения и разгрузки. Принималось, что модуль деформации грунта при разгрузке в 5 раз выше, чем при активном нагружении.

Чтобы иметь возможность исследовать НДС и устойчивость сооружения при сейсмических воздействиях, использовался комплекс вычислительных программ Sm2 по определению сейсмических нагрузок. Сейсмические нагрузки определялись по линейно-спектральной методике в соответствии с СП 14.13330.2014². Расчёт сейсмических сил требует предварительного определения форм собственных колебаний сооружения и сейсмических ускорений.

Все перечисленные выше программы разработаны к.т.н. Саиновым М. П.

Исследования проводились на примере каменно-земляной плотины проектируемой Аксаутской ГЭС. Рассматривалось сечение плотины, имеющее максимальную высоту – 133 м. Противофильтрационным элементом плотины является ядро из суглинка. Боковые призмы выполнены из гравийно-галечникового грунта, их поверхность укрыта слоем горной массы.

Для рассматриваемой плотины была составлена конечно-элементная модель (рис. 1). Она включала в себя 389 конечных элементов высокого порядка (с кубической аппроксимацией перемещений внутри элемента). Общее количество степеней свободы сооружения составило 3728. В каждом из конечных элементов информация о НДС фиксировалась в 25 точках. При расчётах устойчивости откосов каждый из конечных элементов разбивался на 25 частей, в каждую из которых переносилась информация о НДС. Общее количество элементов модели плотины, использованной при расчётах устойчивости откосов, составило 9725.

² СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*.
– М.: ФАУ «ФЦС», 2014. – 126 с.

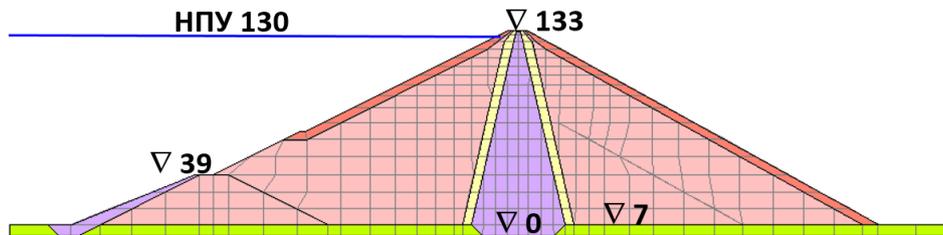


Рисунок 1. Конечно-элементная модель каменно-земляной плотины (составлено автором)

Расчёты устойчивости откосов проводились для двух сочетаний нагрузок. В расчётах на основное сочетание нагрузок учитывался собственный вес сооружения и гидростатическое давление воды.

Физико-механические свойства грунта, принятые в расчётах устойчивости откосов, приведены в табл. 1. Для крупнообломочных грунтов учитывался эффект снижения угла внутреннего трения при росте напряжений. Снижение угла внутреннего трения грунта при замачивании в расчётах не учитывалось.

Таблица 1

Расчётные физико-химические свойства грунтов

Наименование грунта	Удельный вес грунта, кН/м ³		Угол внутреннего трения	Удельное сцепление, кПа
	в сухом состоянии	во взвешенном состоянии		
Суглинок	18,8	10,8	21,3	20
Гравийно-галечниковый грунт плотины	22,2	14,1	46÷36°	0
Гравийно-галечниковый грунт основания	22,0	14,0	35°	0
Горная масса	20,0	11,7	53÷34°	
Песчаный грунт переходных зон	17,7	10,9	30°	

Составлено автором

В качестве особого сочетания нагрузок рассматривался случай сейсмического воздействия. Направление сейсмического воздействия принималось наиболее опасным. При расчётах для низового откоса принималось, что сейсмические силы направлены горизонтально из верхнего бьефа в нижний, а при расчётах верхового откоса – из нижнего бьефа в нижний.

Т. к. сейсмичность района строительства составляет 8 баллов, то ускорение основания плотины при землетрясении принималось равным 0,16 g.

Общая последовательность расчётов включала в себя несколько этапов:

1. Расчёт НДС плотины при действии нагрузок основного сочетания. Расчёт проводился для последовательности этапов возведения плотины и наполнения водохранилища;
2. Расчёт устойчивости откосов плотины при действии нагрузок основного сочетания;
3. Определение форм собственных колебаний плотины и действующих на неё сейсмических сил для выбранных моментов времени;
4. Расчёт НДС плотины при действии сейсмических нагрузок;
5. Расчёт устойчивости откосов плотины при действии сейсмических нагрузок.

Расчёты устойчивости откосов проводились для двух расчётных, наиболее опасных случаев. При расчёте устойчивости низового откоса рассматривался случай, когда водохранилище наполнено до НПУ 130 м. При расчёте верхового откоса водохранилище принималось сработанным до УСВ 78 м.

Результаты

Результаты решения поставленной задачи будем рассматривать последовательно, в соответствии с последовательностью расчётов.

Результаты расчётов НДС плотины при статических нагрузках представлены на рис. 2-7. По результатам расчётов в момент окончания заполнения водохранилища максимальные строительные осадки плотины составили около 160 см (рис. 2б). Максимальное смещение плотины в сторону нижнего бьефа составило 64 см (рис. 2а).

Для распределения вертикальных напряжений σ_y (рис. 3а, 4а) характерно наличие арочного эффекта, т. е. перераспределения напряжений между элементами конструкции плотины. Об этом свидетельствуют результаты сравнения напряжений σ_y рис. 3а с вертикальным давлением от веса грунта и воды, которое представлено на рис. 5а. Можно заметить, что, во-первых, наблюдается увеличение напряжений σ_y в приоткосных зонах. В слое горной массы напряжения σ_y в процентном отношении превышают давление от веса грунта, хотя в количественном выражении это превышение весьма невелико (до 0,1 МПа). Наоборот во внутренней зоне упорных призм происходит некоторое уменьшение σ_y . Этот эффект хорошо известен и был описан нами в [9] для склона однородного строения.

Во-вторых, происходит перераспределение напряжений между ядром плотины и боковыми упорными призмами, т. н. эффект «зависания» ядра (рис. 3а, 4а). В центральной части ядра напряжения σ_y примерно на треть меньше, чем давление выше лежащих слоёв грунта, а на контакте ядра с переходными зонами – примерно наполовину.

Для распределения горизонтальных нормальных напряжений σ_x в каменно-земляной плотине характерно различие между верховой и низовой частями плотины (рис. 6а, 7а), которое объясняется тем, что напорная грань верхнего бьефа расположена внутри тела плотины. Ядро и низовая упорная призма испытывают бóльший уровень сжатия по напряжениям σ_x , чем верховая упорная призма. При наполнении водохранилища до НПУ напряжения σ_x уменьшились практически до 0 (рис. 6а), а на поверхности верхового откоса образовались даже зоны разуплотнения грунта.

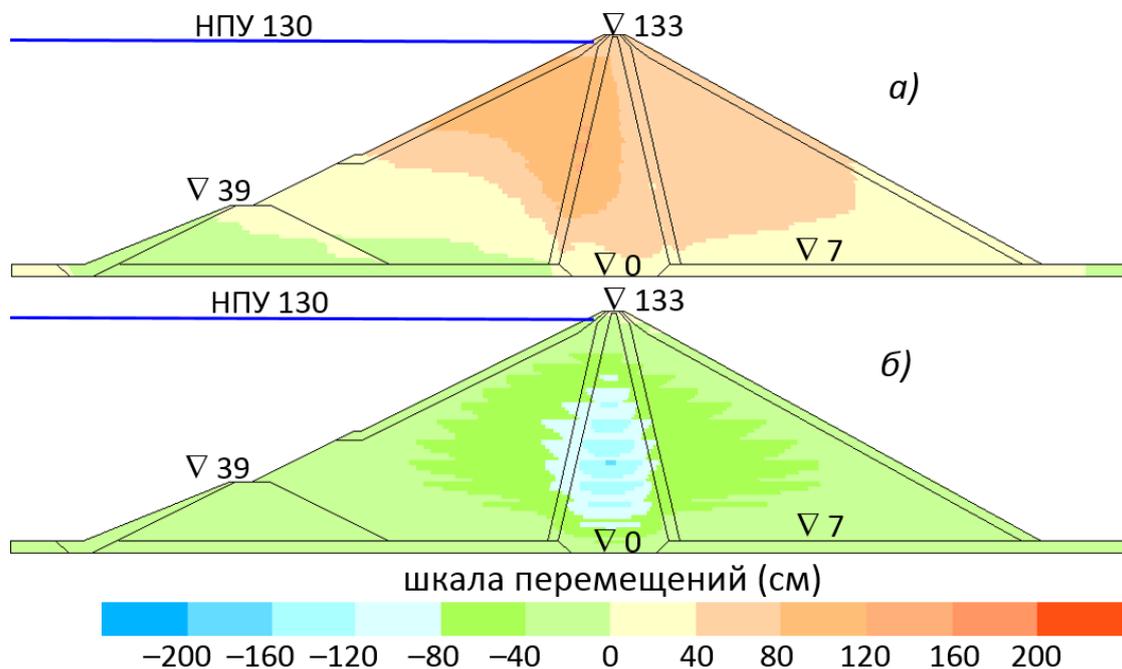


Рисунок 2. Перемещения плотины на момент окончания наполнения водохранилища: а – горизонтальные смещения, б – осадки (составлено автором)

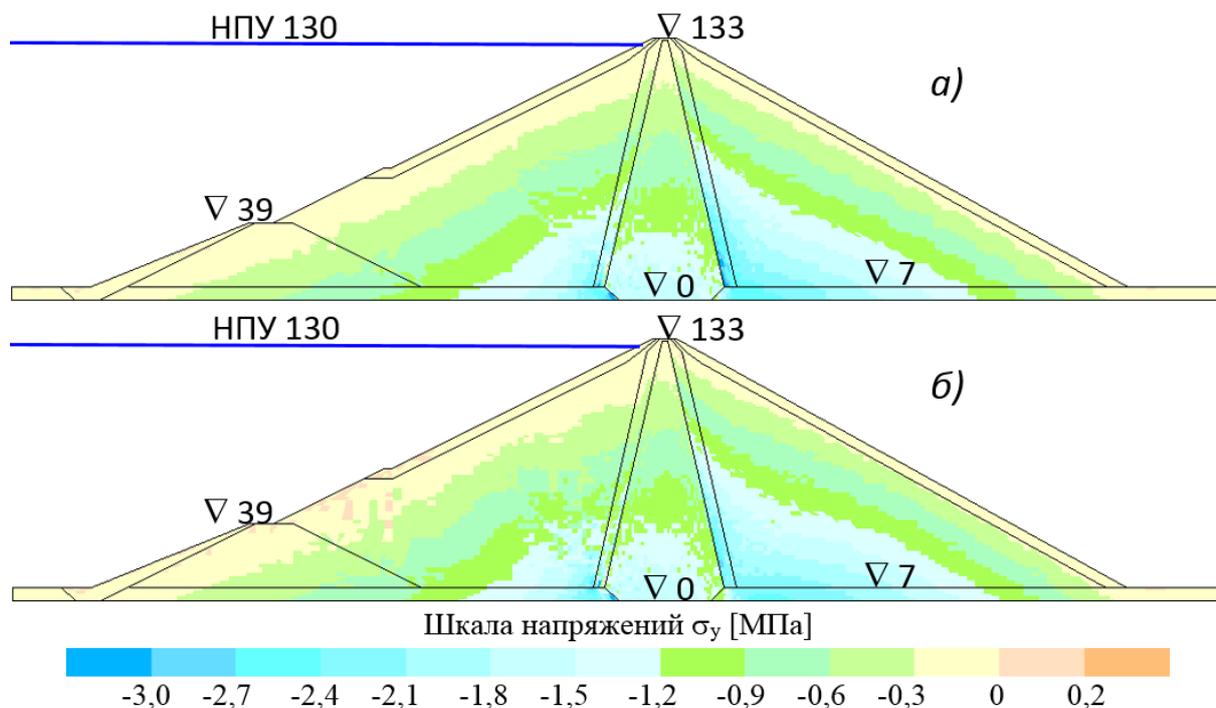


Рисунок 3. Распределение напряжений σ_y в теле плотины по результатам расчёта НДС (при наполнении водохранилища до НПУ): а – без учёта сейсмических сил, б – при действии сейсмических сил в направлении в сторону нижнего бьефа (составлено автором)

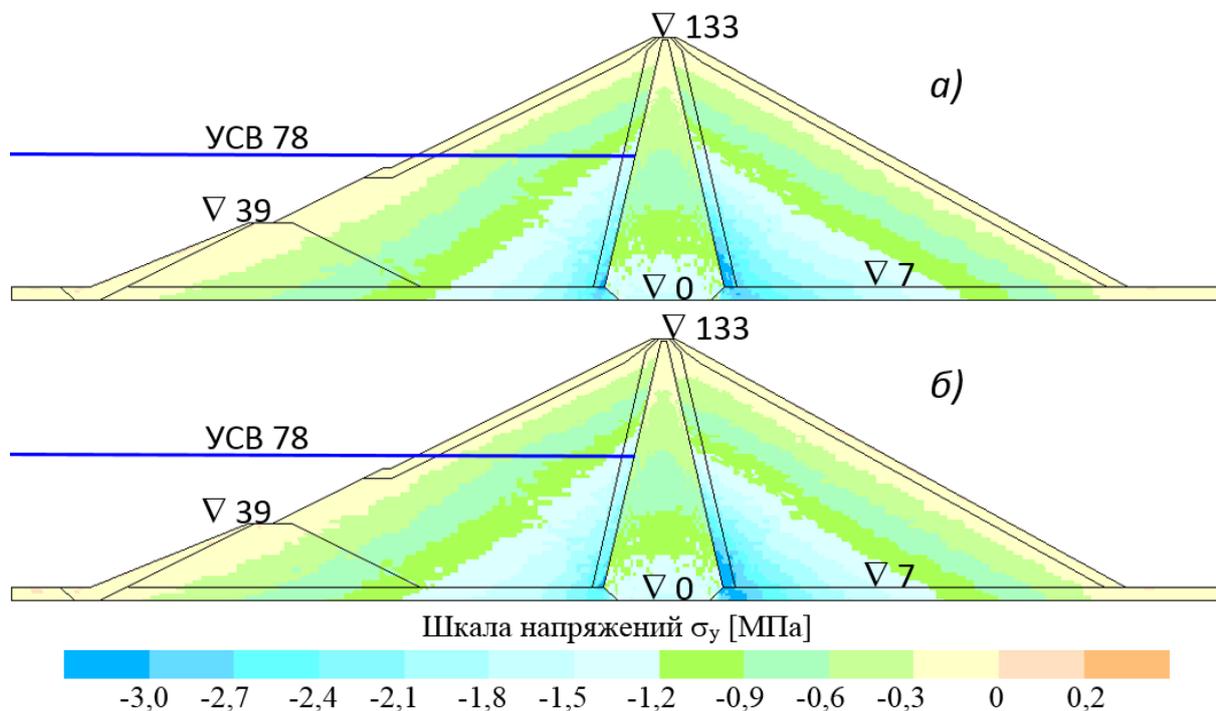


Рисунок 4. Распределение напряжений σ_y в теле плотины по результатам расчёта НДС (при наполнении водохранилища до UCSB): а – без учёта сейсмических сил, б – при действии сейсмических сил в направлении в сторону верхнего бьефа

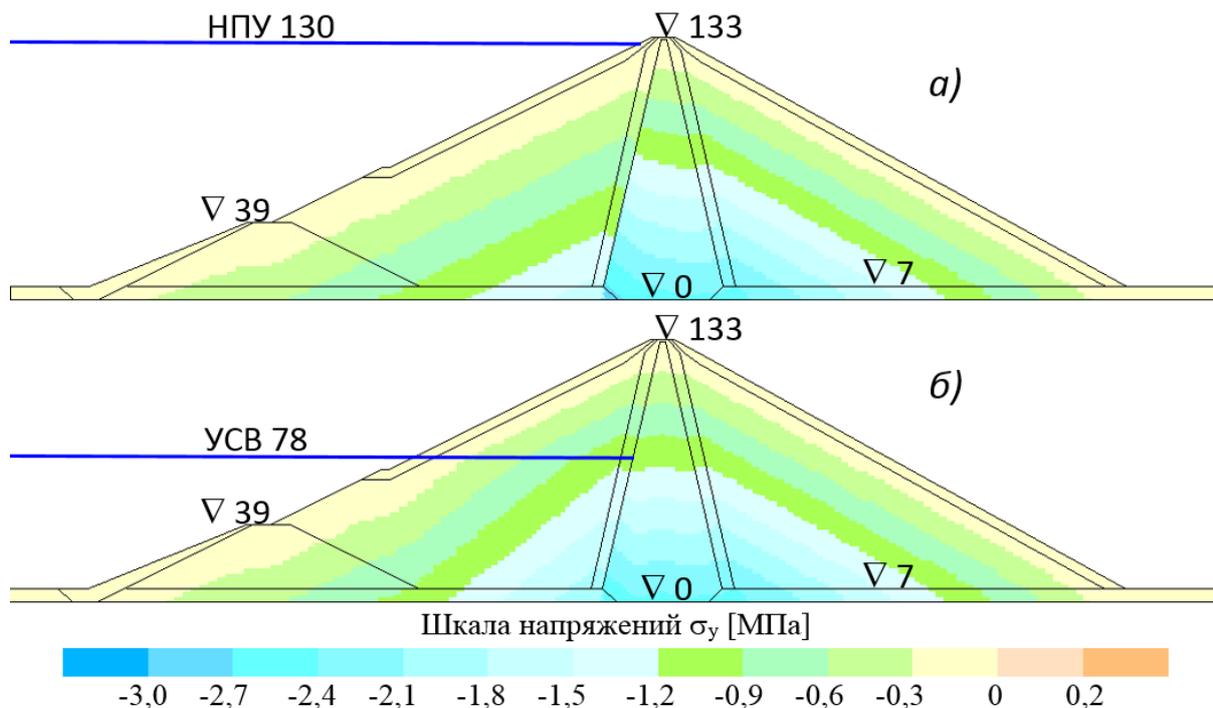


Рисунок 5. Распределение в теле плотины вертикального давления от собственного веса грунта и воды (напряжения σ_y при расчёте по упрощённой схеме): а – при наполнении водохранилища до НПУ, б – при наполнении водохранилища до УСВ

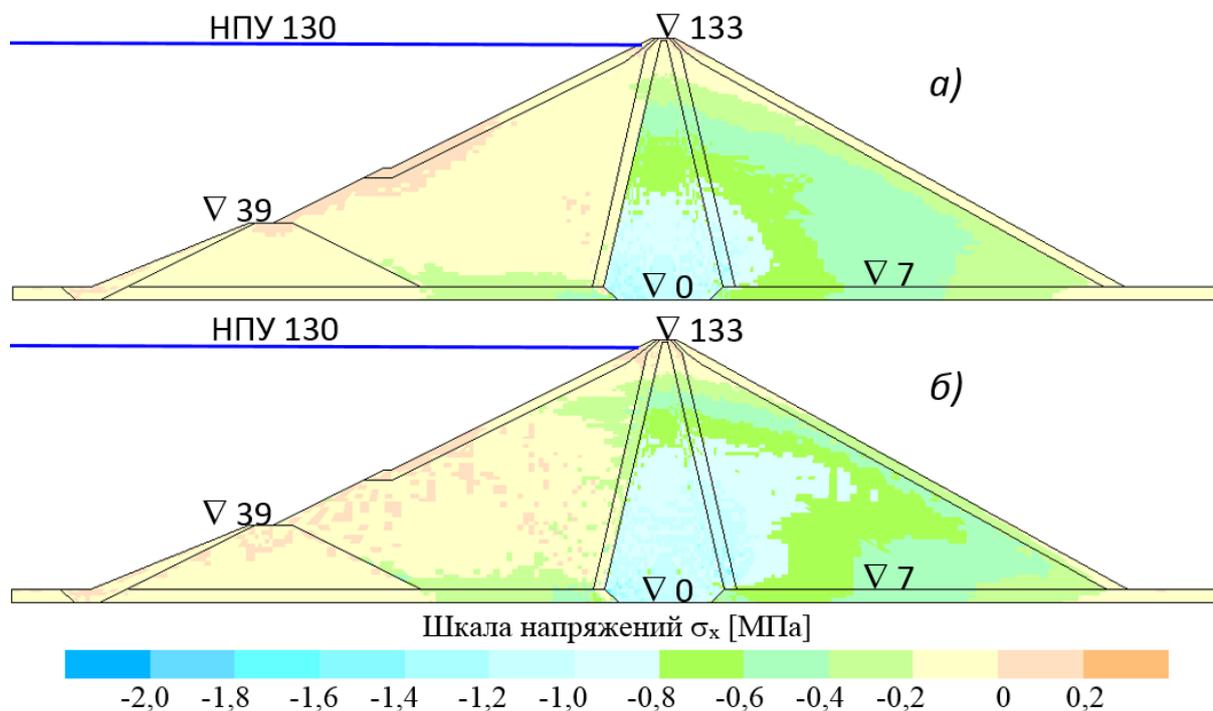


Рисунок 6. Распределение напряжений σ_x в теле плотины по результатам расчёта НДС (при наполнении водохранилища до НПУ): а – без учёта сейсмических сил, б – при действии сейсмических сил в направлении в сторону нижнего бьефа (составлено автором)

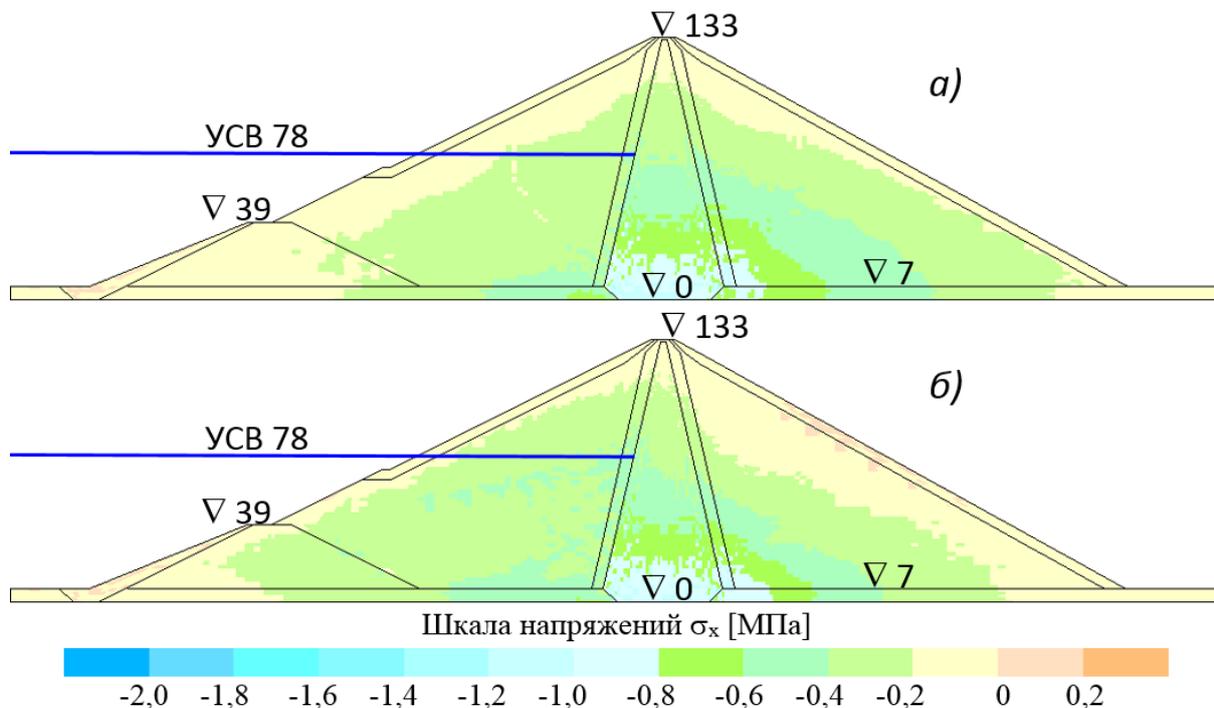


Рисунок 7. Распределение напряжений σ_x в теле плотины по результатам расчёта НДС (при наполнении водохранилища до УСВ): а – без учёта сейсмических сил, б – при действии сейсмических сил в направлении в сторону верхнего бьефа (составлено автором)

Теперь рассмотрим, как характер НДС каменно-земляной плотины сказался на запасе устойчивости её откосов. Для возможности сравнения были проведены две серии расчётов. В первой серии расчётов нормальные напряжения на поверхности скольжения определялись по упрощённой схеме – через давление от веса грунта, т. е. так, как это принято в методике инженерных расчётов. Использовалась следующая формула для определения напряжения σ_n в направлении нормали к поверхности скольжения:

$$\sigma_n = \sum_i [\gamma_i h_i] \cos^2 \alpha \quad (1)$$

где: γ_i и h_i – соответственно удельный вес и толщина i -того слоя грунта;

α – угол наклона поверхности скольжения.

Соответственно, в данном способе учитываются только вертикальные напряжения и то приближённо.

Во второй серии расчётов напряжение σ_n определялось через компоненты тензора напряжений:

$$\sigma_n = \sigma_x \sin^2 \alpha + \sigma_y \cos^2 \alpha + \sigma_{xy} \cos 2\alpha \quad (2)$$

Уже из сравнения между собой формул (1) и (2) видно, что учёт НДС может выявить дополнительный запас устойчивости сооружения за счёт расширения состава слагаемых.

Но об этом также свидетельствуют и результаты расчётов устойчивости откосов, представленные на рис. 8-11. При расчёте с использованием формулы (1) коэффициент запаса устойчивости низового откоса составил 1,542 (рис. 8), а верхового – 1,709 (рис. 9). При расчёте с учётом НДС данные коэффициенты составили соответственно 1,683 (рис. 10) и 1,780 (рис. 11). Соответственно рост коэффициентов устойчивости составил соответственно 9 % и 4 %.

Данный рост объясняется характером напряжённого состояния плотины – тем, что в приоткосных зонах наблюдается повышение уровня сжатия и учётом сжатия в горизонтальном направлении. То, что увеличение коэффициента устойчивости верхового откоса произошло в меньшей степени, чем у низового, объясняется тем, что сжимающие напряжения σ_y в низовой призме больше, чем в низовой.

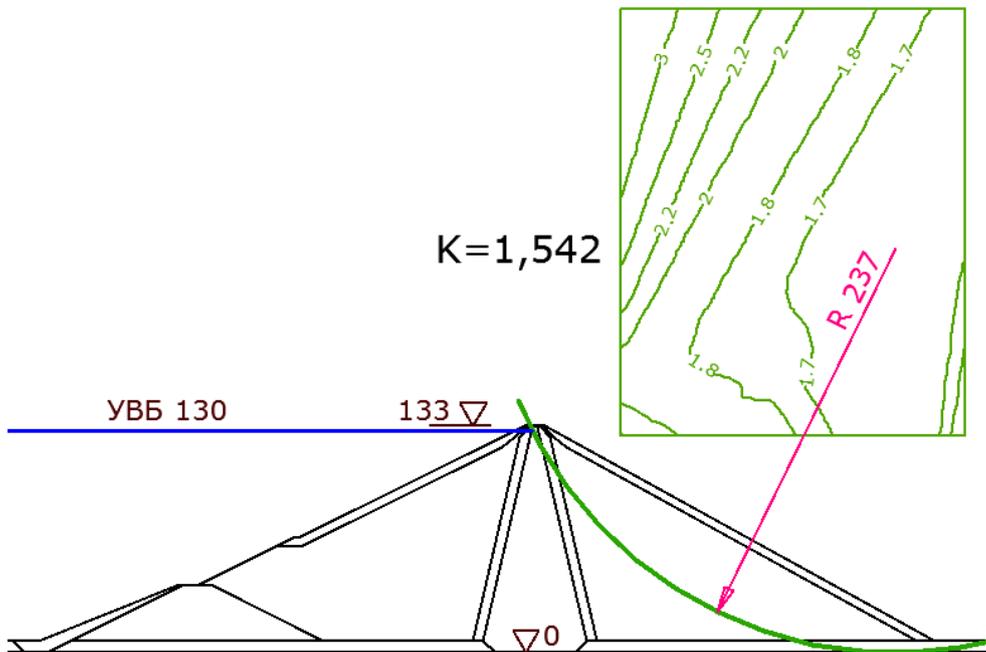


Рисунок 8. Результаты расчёта устойчивости низового откоса при основном сочетании нагрузок (расчёт без учёта НДС) (составлено автором)

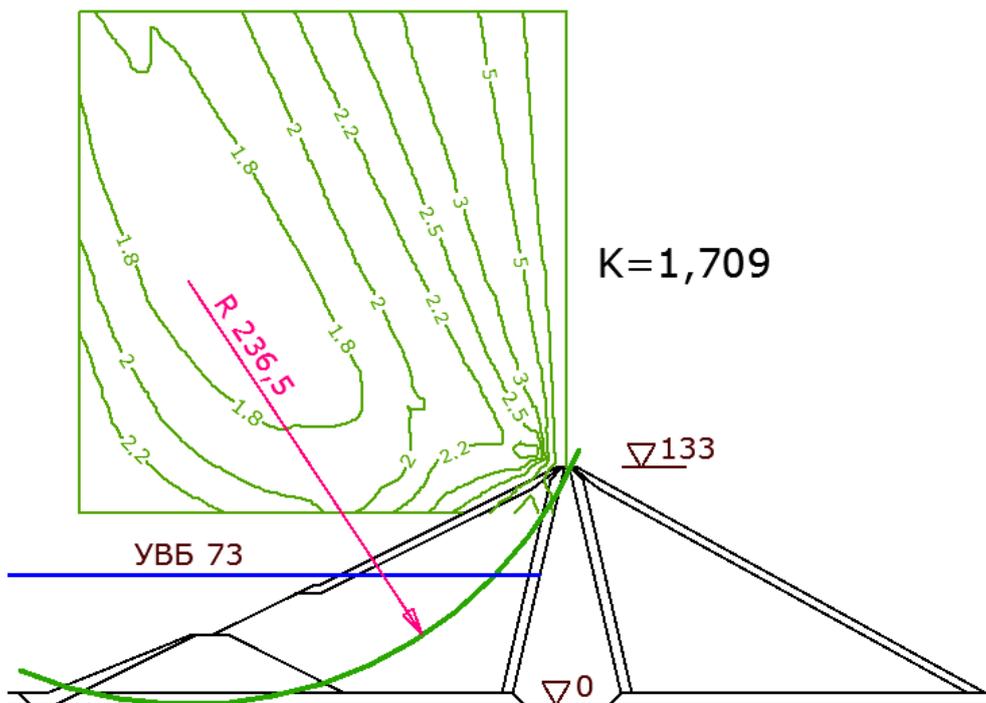


Рисунок 9. Результаты расчёта устойчивости верхового откоса при основном сочетании нагрузок (расчёт без учёта НДС) (составлено автором)

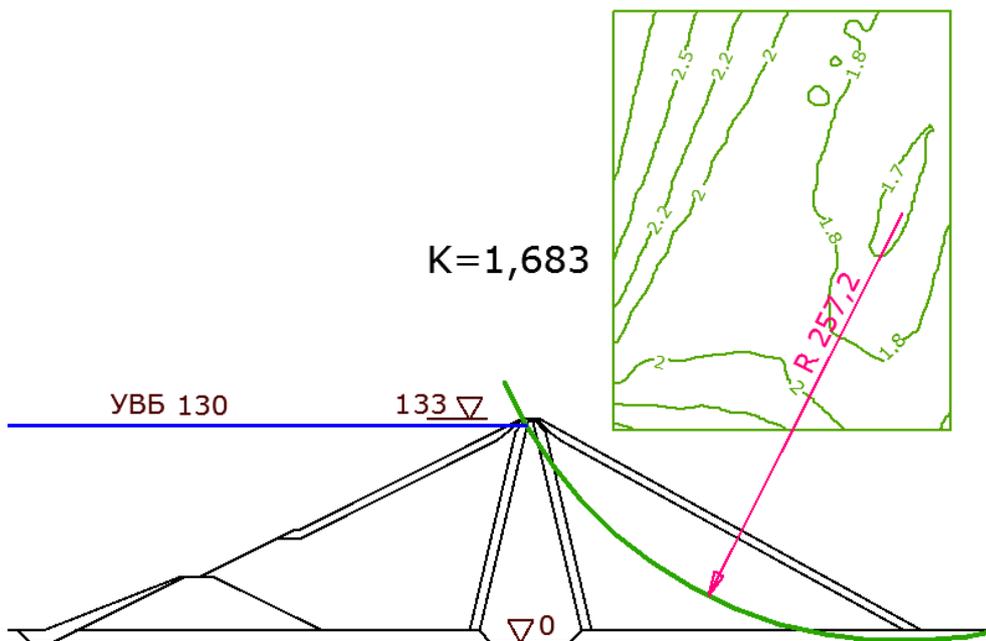


Рисунок 10. Результаты расчёта устойчивости низового откоса при основном сочетании нагрузок (расчёт с учётом НДС) (составлено автором)

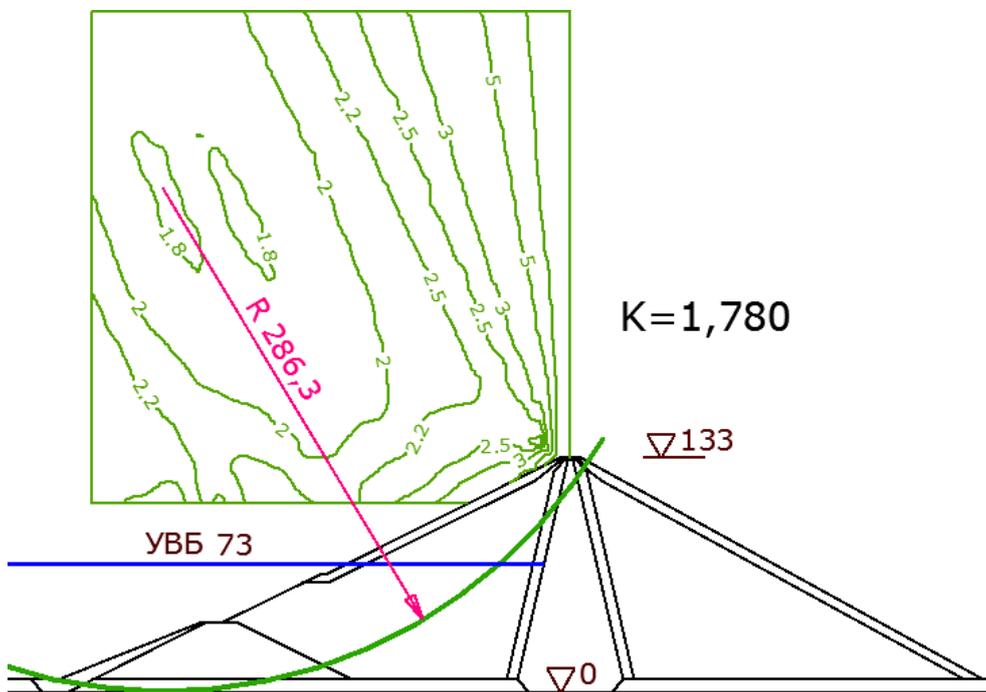


Рисунок 11. Результаты расчёта устойчивости верхового откоса при основном сочетании нагрузок (расчёт с учётом НДС) (составлено автором)

Для определения сейсмических нагрузок были определены для каждого из расчётного случая (наполнение водохранилища до НПУ или УСВ) 30 низших форм и частот собственных колебаний плотины (рис. 12). При этом частоты собственных колебаний плотины со сработанным водохранилищем несколько выше, чем при наполненном (рис. 13). Частота колебаний основного тона составила примерно 1,4 Гц.

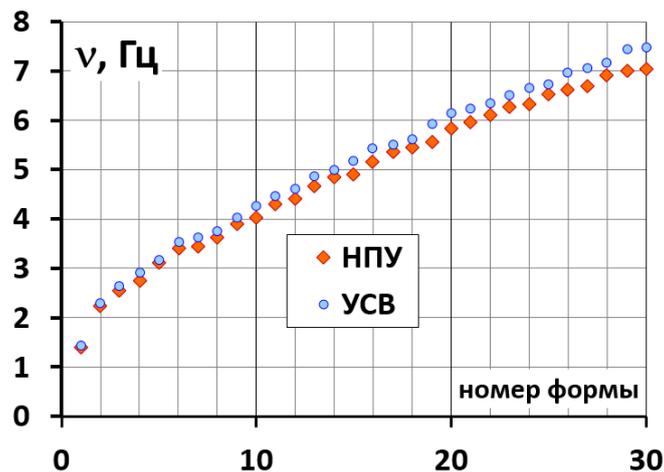


Рисунок 13. Частоты собственных колебаний плотины (составлено автором)

Расчёты сейсмических сил проводились в соответствии с СП 14.13330.2014 для 8-балльного землетрясения. По результатам расчёта максимальное ускорение наблюдается на гребне плотины и составляет примерно 0,24 g (рис. 14).

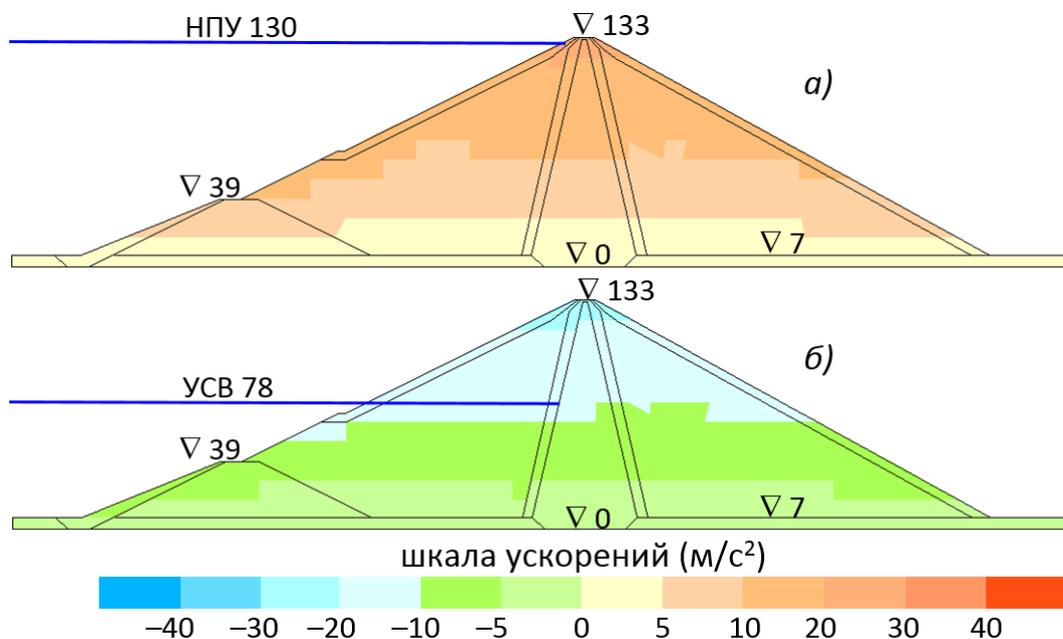


Рисунок 14. Ускорения плотины при 8-балльном землетрясении при различных направлениях сейсмического воздействия: а – направление в нижний бьеф, б – направление в верхний бьеф (составлено автором)

Полученные сейсмические силы позволили определить НДС плотины при сейсмическом воздействии. При расчётах условно принималось, что модуль деформации грунта при восприятии кратковременных сейсмических сил в 2 раза превышает статический.

По результатам расчётов максимальное остаточное смещение плотины составило: при сейсмическом воздействии в сторону нижнего бьефа – 37 см (рис. 15а), в сторону верхнего бьефа – 19 см (рис. 15б). Различие величин смещений объясняется тем, что восприятие сейсмических сил, направленных в нижний бьеф, вызывает в основном активное нагружение грунта, а сил, направленных в верхний бьеф – в основном разгрузку.

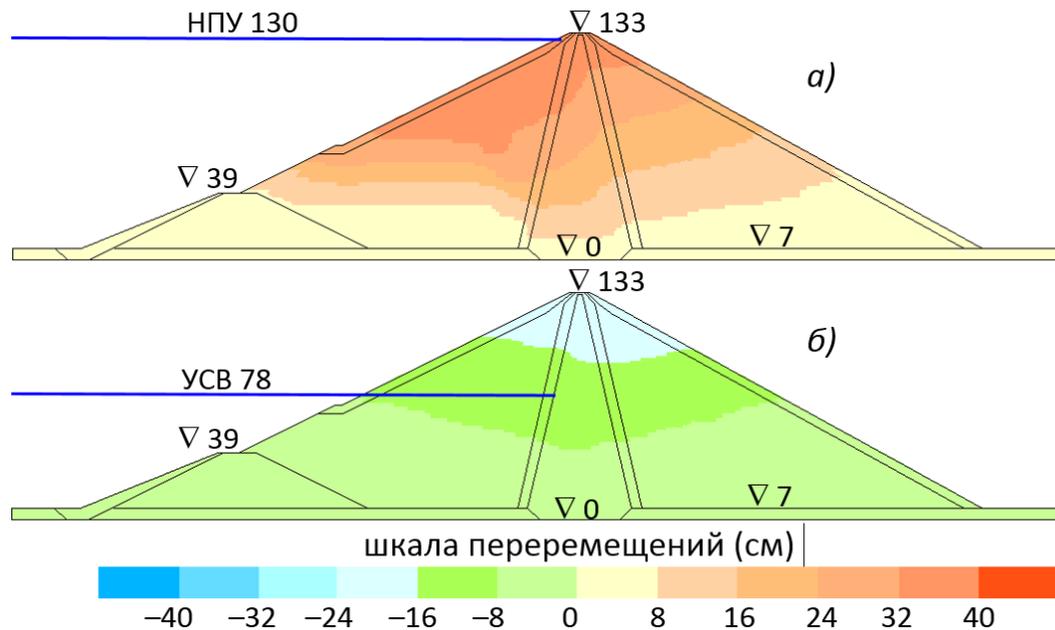


Рисунок 15. Перемещения плотины от сейсмических нагрузок: а – при направлении сейсмических сил в сторону нижнего бьефа, б – при направлении сейсмических сил в сторону верхнего бьефа (составлено автором)

Возникновение горизонтальных смещений сопровождается изменением напряжённого состояния плотины (рис. 3б, 4б, 6б, 7б). При сейсмическом воздействии в одной из упорных призм происходит увеличение сжимающих напряжений (σ_y и σ_x), а в другой – их уменьшение. Например, при действии сейсмических сил в направлении нижнего бьефа происходит увеличение сжатия в низовой призме и уменьшение в верховой. Наиболее отчётливо это проявляется именно при направлении сейсмических сил в сторону нижнего бьефа, т. к. оно сопровождается большими по величине смещениями. Опасность представляет напряжённое состояние верховой призмы – область разуплотнения грунта в ней увеличивается.

Рассмотрим, как влияет НДС на запас устойчивости откосов при сейсмическом воздействии. Для возможности сравнения расчёт был произведён для трёх случаев. В первом случае напряжения на поверхности скольжения определялись по формуле (1), а во втором и третьем – по формуле (2). Различие случаев 2 и 3 состоит в том, что в одном из них (случай 2) напряжения соответствовали моменту времени, когда сейсмические силы отсутствуют, а в другом они определялись из НДС плотины при сейсмическом воздействии. Только случай 3 учитывает изменение НДС плотины от действия сейсмических сил, а случаи 1 и 2 соответствуют допущению, принимаемому в инженерных расчётах о том, что горизонтальные сейсмические силы не вызывают изменение вертикальных напряжений.

Результаты расчёты устойчивости откосов для случая 1 (приближённый расчёт) представлен на рис. 16-17. Видим, что коэффициент устойчивости низового откоса составил 1,373 (рис. 16), а верхового – 1,359 (рис. 17). Оба значения существенно больше нормативного (1,184 для I класса сооружений). По сравнению с основным сочетанием нагрузок коэффициенты устойчивости уменьшились соответственно на 11 и 21 %. Это снижение – невелико, т. к. расчёт вёлся для землетрясения силой 8 баллов.

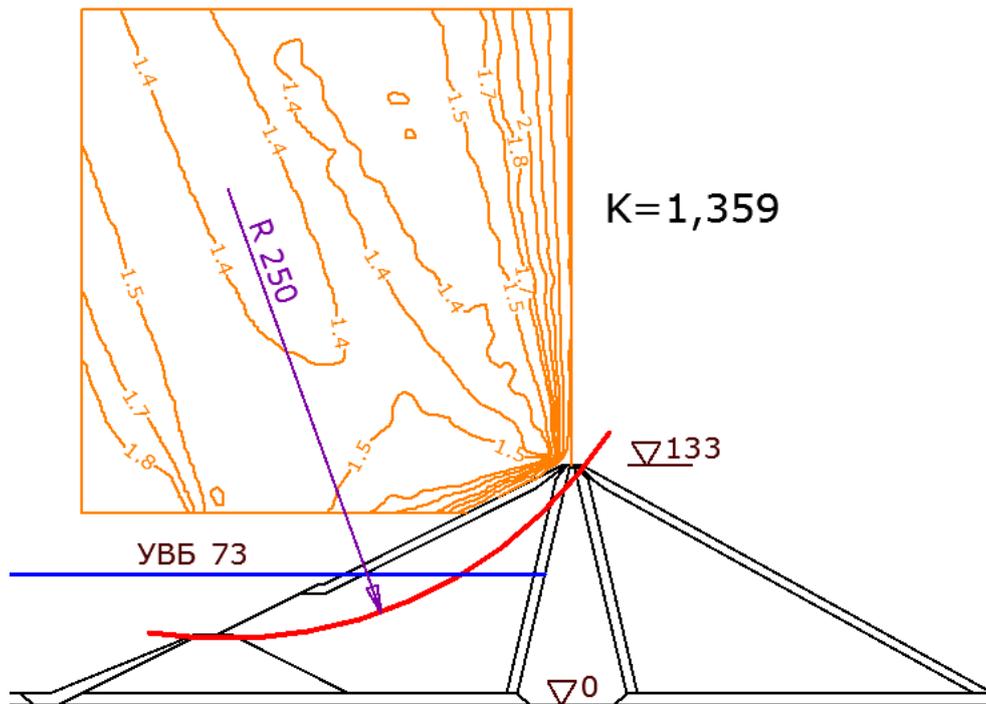


Рисунок 16. Результаты расчёта устойчивости низового откоса при сейсмическом воздействии (расчёт без учёта НДС) (составлено автором)

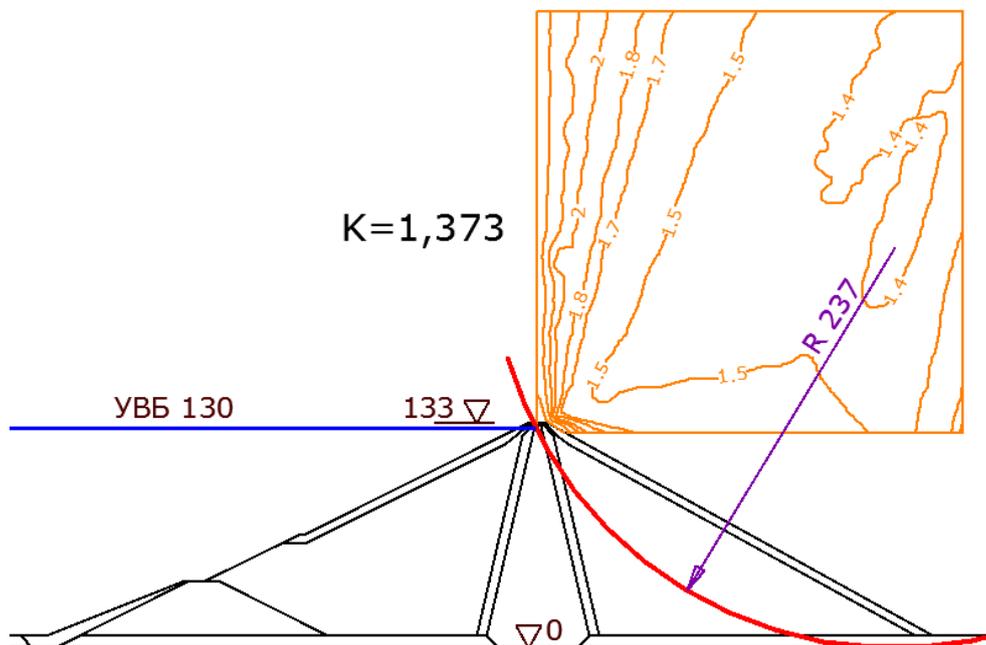


Рисунок 17. Результаты расчёта устойчивости верхового откоса при сейсмическом воздействии (расчёт без учёта НДС) (составлено автором)

Расчёт для случая 2 выявил несколько меньший запас устойчивости откосов. Коэффициент устойчивости низового откоса составил 1,278, для верхового – 1,320 (табл. 2).

Результаты расчёта для случая 3, т. е. для наиболее точной расчётной схемы, представлены на рис. 18 и 19. Коэффициент устойчивости низового откоса составил 1,395 (рис. 18), верхового – 1,212 (рис. 19). Анализируя полученные значения можно заметить, что для низового откоса учёт НДС выявил небольшое (на 1,6 % по сравнению со случаем 1 и на 9 % по

сравнению со случаем 2) увеличение запаса устойчивости. Это объясняется увеличением уровня сжатия в низовой призме при восприятии сейсмических сил.

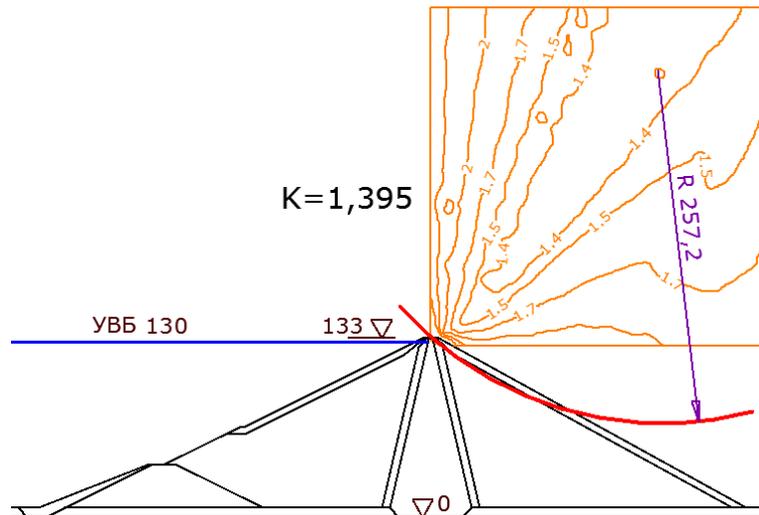


Рисунок 18. Результаты расчёта устойчивости низового откоса при сейсмическом воздействии (расчёт с учётом НДС) (составлено автором)

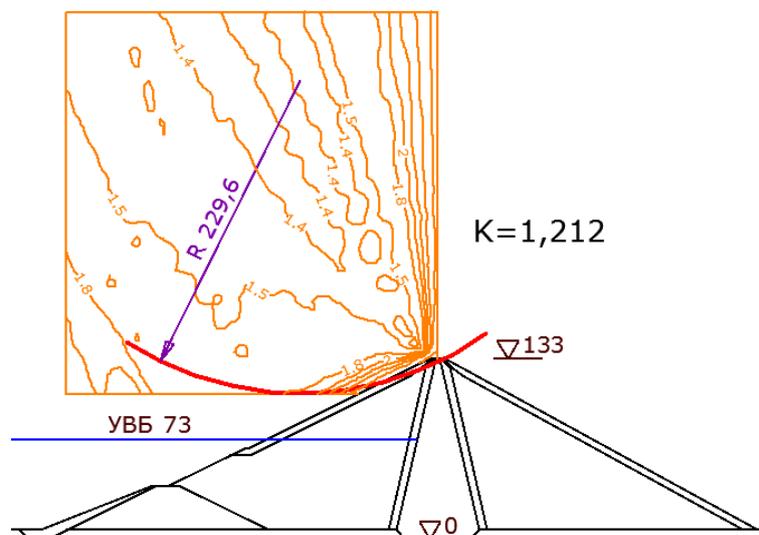


Рисунок 19. Результаты расчёта устойчивости верхового откоса при сейсмическом воздействии (расчёт с учётом НДС) (составлено автором)

Таблица 2

Коэффициенты устойчивости откосов плотины по результатам расчётов с использованием различных способов определения напряжений в плотине

откос	сочетание нагрузок	Способ определения		
		приблизительно	по НДС без сейсмике	по НДС с сейсмикой
низовой	основное	1.542	1.683	
	особое	1.373	1.278	1.395
верховой	основное	1.709	1.780	
	особое	1.359	1.320	1.212

Составлено автором

Для верхового откоса расчёт устойчивости с учётом НДС выявил заметное снижение запаса устойчивости верхового откоса (на 11 % по сравнению со случаем 1). Коэффициент

устойчивости оказался близким к нормативному. Наиболее опасные поверхности скольжения проходят в приоткосной зоне и затрагивают небольшой массив грунта, в котором при сейсмическом воздействии наблюдается разуплотнение грунта. Таким образом, снижение запаса устойчивости верхового откоса объясняется неблагоприятным НДС верховой призмы.

Это подтверждает мысль о том, что учёт НДС плотины имеет значение при обосновании устойчивости её откосов, особенно при расчётах на сейсмическое воздействие.

Выводы

1. Используемая нами методика уточняет используемый в практике проектирования инженерный метод расчёта устойчивости откосов (метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения в интерпретации Терцаги). Она позволяет более точно отразить характер работы сооружения, т. к. учитывает влияние на устойчивость откосов каменно-земляной плотины характера напряжённого состояния. Благодаря этому была дана качественная и количественная оценка неточности инженерного метода, которая была вызвана одним из принятых упрощений, связанного со схематизацией напряжённого состояния сооружения.

2. Исследования показали, что влияние НДС на устойчивость сооружения – неоднозначное. В некоторых случаях оно позволяет выявить дополнительный резерв устойчивости сооружения, а других – обнаружить в нём уязвимые зоны, угрожающие сооружению потерей устойчивости. По этой причине считаем, что данный вопрос требует дополнительного изучения.

3. Для случая восприятия плотиной нагрузок основного сочетания уточнение методики расчёта позволяет выявить дополнительный резерв устойчивости откосов. Это связано с двумя факторами. Первый – это наличие «арочного» эффекта в распределении напряжений в теле плотины, который выражается в том, что в приоткосных зонах напряжения σ_y выше, чем вертикальное давление от веса грунта. Вторым фактором – это учёт влияния напряжений σ_x . Учёт первого фактора приводит к повышению запаса устойчивости приоткосных зон плотины, а учёт второго – к повышению запаса устойчивости по заглубленным кривым скольжения. Однако выявленный резерв – невелик. Он составил всего 4÷9 %.

4. Используемая нами методика позволяет учесть при расчёте устойчивости откосов плотины при сейсмическом воздействии очень важный эффект – перераспределение напряжений в теле плотины от сейсмических сил. Для рассмотренной задачи влияние характера НДС сооружения на его устойчивость оказалось небольшим – до 10 %. Однако можно предположить, что сейсмическом воздействии бóльшей (выше 8 баллов) интенсивности это влияние будет расти.

5. Учёт реального характера НДС выявляет пониженный уровень запаса устойчивости верхового откоса каменно-земляной плотины при восприятии горизонтального сейсмического воздействия в направлении из верхнего бьефа в нижний. Это объясняется тем, что восприятию плотиной сейсмических сил в её верховой призме происходит снижение сжимающих напряжений – как вертикальных напряжений σ_y , так и горизонтальных σ_x . Опасность представляет случай, когда напряжения σ_x перейдут 0 и образуется зона разуплотнения грунта. Учёт при расчётах устойчивости откосов плотины наличия зон разуплотнения грунта – яркий пример взаимосвязи задач об НДС и об устойчивости откосов плотины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гидротехнические сооружения (речные). Учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Строительство" и специальности "Гидротехническое строительство": в 2 частях / Рассказов Л. Н., Орехов В. Г., Анискин Н. А., Малаханов В. В., Бестужева А. С., Саинов М. П., Солдатов П. В., Толстиков В. В. Москва, 2011. Том Часть 1 (2-е издание, исправленное и дополненное) – 576 с.
2. Гольдин А. Л., Рассказов Л. Н. Проектирование грунтовых плотин – М.: Изд-во АСВ, 2001. – 384 с.
3. Ивахов И. Plaxis – геотехнические расчёты // CADmaster. 2002. №1. С. 58-60.
4. Ломбардо В. Н., Грошев М. Е., Олимпиаев Д. Н. Учет напряженно-деформированного состояния при расчетах устойчивости откосов грунтовых плотин // Гидротехническое строительство. 1986. №7. С. 16-18.
5. Механика грунтов, основания и фундаменты: Учеб. пособие для строит. спец. вузов / С. Б. Ухов, В. В. Семенов, В. В. Знаменский и др.; Под С. Б. Ухова. – 4-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2007. – 566 с.
6. «Откос». Анализ устойчивости откосов и склонов. Руководство пользователя. Версия 1.5 / Перельмутер М. А., Федоровский В. Г. SCAD Soft, 2007. 15 с.
7. Рассказов Л. Н., Джха Дж. Деформируемость и прочность грунта при расчете высоких грунтовых плотин // Гидротехническое строительство. 1987. №7. С. 31-36.
8. Руководство пользователя. GeoStab 5.2.4. Расчет устойчивости склонов и откосов. URL: <http://www.geo-soft.ru/download/guides/GeoStab%205%20UserGuide.pdf>. (дата обращения: 01.12.2017).
9. Саинов М. П. Влияние напряженного состояния склона из однородного грунта на его устойчивость // Вестник МГСУ. 2012. № 12. С. 111-116.
10. Саинов М. П. Вычислительная программа по расчету напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин: опыт создания, методики и алгоритмы // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2013. Volume 9. Issue 4. С. 208-225.
11. Саинов М. П. Методика расчета устойчивости откосов по пространственным поверхностям скольжения в виде эллипсоида вращения // Вестник МГСУ. 2013. №4. С. 188-200.
12. Табуев В. П. Оценка устойчивости откосов строящейся каменнонабросной плотины Богучанской ГЭС // Вестник РУДН, серия Инженерные исследования. 2010. №2. С. 123-131.
13. Терцаги К. Строительная механика грунта. – М.-Л.: Геостройиздат, 1933. – 510 с.
14. Чугаев Р. Р. О расчете устойчивости земляных откосов // Гидротехническое строительство. 1968. № 2. С. 26-28.
15. Федоровский В. Г., Курилло С. В. Метод переменной степени мобилизации сопротивления грунту для расчета прочности грунтовых массивов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1998. № 4-5. С. 18-22.

Sainov Mikhail Petrovich

Moscow state university of civil engineering (national research university), Russian, Moscow
E-mail: mp_sainov@mail.ru

Gapeev Dmitriy Sergeevich

Moscow state university of civil engineering (national research university), Russian, Moscow
E-mail: gapeev.mitya@yandex.ru

Kudryavtsev Grigoriy Mikhaylovich

Moscow state university of civil engineering (national research university), Russian, Moscow
E-mail: gregik@mail.ru

Impact of the rock-earthfill dam stress state on stability of its slopes

Abstract. A specially developed computer program was used for studying the impact of the dam stress state on its slopes stability factors under usual and unusual load combinations. The method of slices was used. The purpose of study was estimation of uncertainty of calculated values of slope stability using engineering approximation method. The results are introduced by simplification of the computational scheme of loads perception. The investigation was conducted for 133 m high rock-earthfill dam. By numerical modeling there was determined the dam stress-strain state, the forms of its self-oscillations and seismic loads acting on it. Consideration of distribution pattern of stresses in the dam body revealed additional stability factor of the dam slopes at usual load combination as compared with the results obtained using the simplified scheme. This is explained by redistribution of stresses in the dam body. At slope stability analysis during the unusual load combination (with consideration of seismic loads) consideration of the stress state revealed decrease of the upstream slope stability factor. This is explained by unfavorable stress state of the upstream shell at seismic load. It may be expected that at high seismic loads the upstream slope stability factor will have the value lower than the standard one due to formation of soil loosening zones.

Keywords: rock-earthfill dam; stability of slopes; stress-strain state; numerical modeling; seismic loads