

УДК 627.824.2

DOI: 10.17213/mgvgif/2026-5-499-508

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПЛОТИНЫ КАЖЫМСКОГО ГИДРОУЗЛА ПРИ УСТРОЙСТВЕ В ЕЕ ТЕЛЕ ВОДОСПУСКА

Д. В. Кашарин

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия

Аннотация. Статья посвящена оценке устойчивости плотины Кажымского водохранилища в створе водоспускного сооружения. Разработана геомеханическая модель основания плотины с учетом устройства водоспускного устройства. Осуществлены расчеты устойчивости сооружения с помощью программного комплекса Plaxis с применением упругих и упругопластических моделей. Определена устойчивость плотины гидроузла с учетом размещения сооружений водоспуска приведены сравнения сооружения до и после устройства водоспускного сооружения.

Ключевые слова: плотина, водоспуск, поровое давление, фильтрационная устойчивость, коэффициент надежности, геотехнические расчеты, упругопластических моделей

ASSESSMENT OF THE STABILITY OF THE KAZYM RESERVOIR DAM WHEN INSTALLING A SPILLWAY IN ITS BODY

D. V. Kasharin

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia

Annotation. The article is devoted to the assessment of the stability of the dam of the Kazhim reservoir at the site of the spillway. A geomechanical model of the dam foundation was developed, taking into account the spillway device. The stability of the structure was calculated using the Plaxis software package using elastic and elasto-plastic models. The stability of the hydroelectric complex dam was determined, taking into account the placement of the spillway structures, and comparisons were made between the structure before and after the spillway was installed.

Keywords: dam, spillway, pore pressure, filtration stability, reliability factor, total incremental displacements geotechnical calculations, elastic-plastic models

Расчётно-пояснительная записка составлена на основе результатов расчётов сооружений и конструкций по устройству водоспуска через плотину. [1].

Введение

Основные гидротехнические сооружения плотины Кажымского водохранилища, находящегося в Республики Коми, у пос. Кажым Койгородского района, в 240 км от г. Сыктывкар в 1758 году неоднократно реконструировались, в том числе построен водосброс железобетонный открытого типа. В настоящее время в связи с закрытием приплотинной гидроэлектростанцией мощностью 300 кВт, обеспечивающей ранее попуски в нижний бьеф и спуск

водохранилища, возникла необходимость в создании водоспускного сооружения. В связи с тем, что водохранилище и ряд строений в границах его водоохранной зоны объявлено соответственно памятниками природы и культурного наследия числится в Российском реестре, водоспуск, включающий две нитки полимерных труб с диафрагмами прокладывается закрытым способом под телом плотины (рис. 1) [1].

В 2025 году в связи с переоценкой ущерба при гидродинамической аварии плотины класс сооружений гидроузла по ответственности при отказе был повышен до III [1].

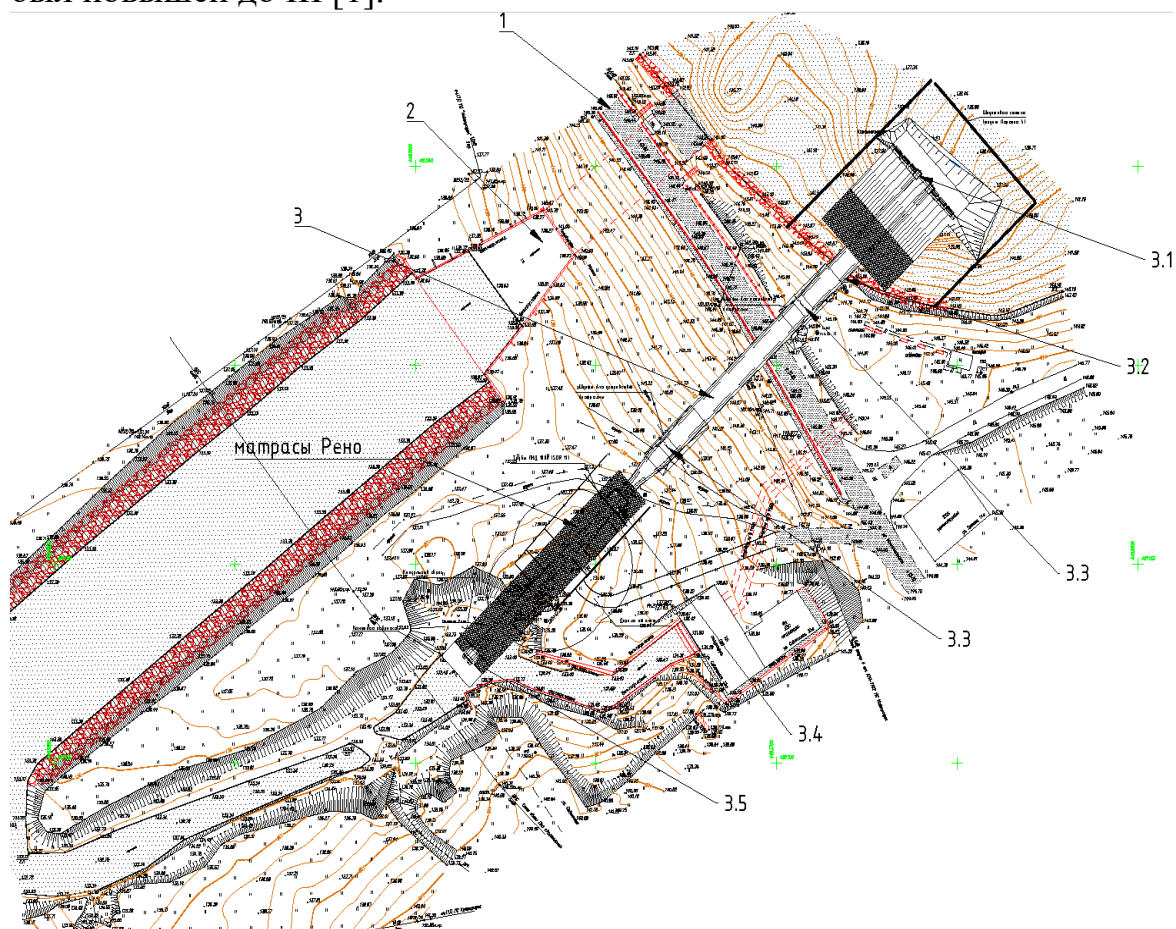


Рис. 1. Генеральный план проектируемого водоспускного сооружения:

1 – земляная плотина; 2 – паводковый водосброс; 3 – безбашенный водоспуск;
3.1 – входной оголовок вихревого типа; две нити трубы 1000 мм; 3.3 – диафрагмы;
колодец с регулирующими задвижками; консольный сброс

Тело плотины представлено техногенными водопроницаемыми грунтами представлены песками средней крупности, средней плотности, в интервале глубин 0.8-8.8 м (отм. 130,89-143,73 м). К «специфическим» грунтам относятся техногенные песчаные и глинистые грунты (ИГЭ 1, 2), вскрытые повсеместно под почвенно-растительным слоем (0.1-0.2 м). Грунтовые воды по характеру залегания поровые, по гидродинамическим особенностям — безнапорные (рис. 2).

Критерий устойчивости дамбы определяется нормативным значением коэффициента устойчивости в соответствии с п. 4.3 СП 23.13330.2018 по формуле [2].

$$K_s = \frac{R_0}{F_0} \geq \frac{\gamma_n \cdot \gamma_{1c}}{\gamma_c}, \quad (1)$$

где F_0 — расчетное значение обобщенного силового воздействия (сила, момент, напряжение), деформации или другого параметра, по которому производится оценка предельного состояния, определенного с учетом коэффициента надежности по нагрузке γ_f ; R_0 — расчетное значение обобщенной несущей способности, деформации или другого параметра, устанавливаемого с учетом коэффициентов надежности по грунту γ_g [3]. Методы статистической обработки результатов испытаний; γ_n — коэффициент надежности по ответственности сооружения; γ_{1c} — коэффициент сочетаний нагрузок; γ_c — коэффициент условий работы, для предельных состояний первой группы значение коэффициентов приведено в табл. 1 [2].

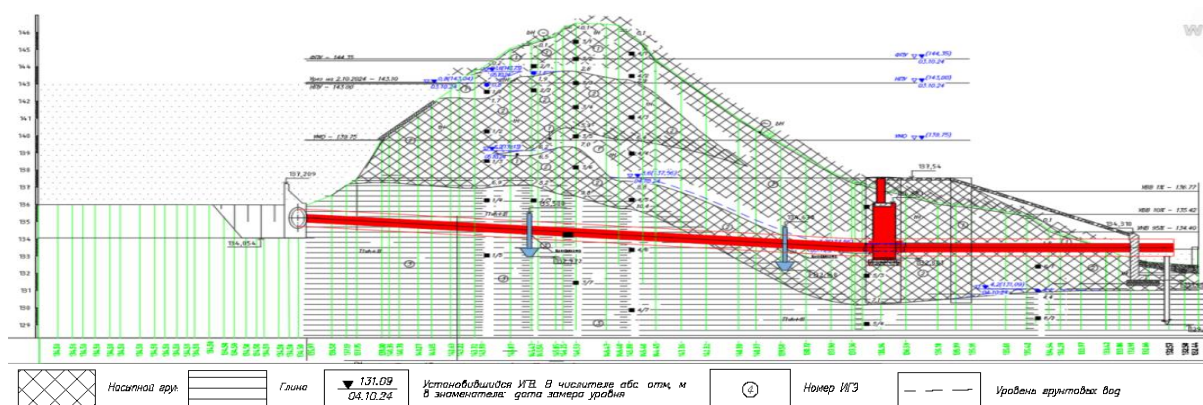


Рис. 2. Поперечный разрез плотины в месте устройства водоспуска с геологическим строением

Для оценки устойчивости плотины при изменении фильтрационного воздействия, связанного реконструкцией водоспускного сооружения [1].

Таблица 1. Нормативные коэффициенты устойчивости

№ п/п	Сочетание нагрузок	γ_c	γ_{1c}	γ_n	[Ks]
1	Основное сочетание нагрузок	1,0	1,00	1,15	1,15
2	Особое сочетание нагрузок	1,0	0,95	1,15	1,10

Для учета порового давления в основании плотины и гидравлический градиент положение последней определялось расчетной в нескольких положениях обеспеченности уровней грунтовых вод (УГВ) в верхнем и нижнем

бьефах депрессионной кривой. За первоначальное приближение принимались данные по УГВ из инженерно-геологических изысканий (данные из скважин по УГВ). Для интерполяции данных по УГВ в расчетных разрезах была создана отдельная поверхность УГВ по данным из скважин.

Фильтрация в пористой среде описывается по закону закона Дарси. При рассмотрении фильтрации в вертикальной плоскости $X-Y$ применяются следующие уравнения компонентов удельного расхода (1):

$$q_x = -k_x \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad q_y = -k_y \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad (1)$$

где k_x , k_y — соответственно коэффициент фильтрации м/сут по направлению x , y ; φ — определяется по следующим зависимости (2)

$$\varphi = y - \frac{p}{\gamma_w}, \quad \varphi_p = y - \frac{p}{\gamma_w}, \quad (2)$$

где y — вертикальная ордината; p — давление в поровой жидкости (отрицательное давление при сжатии) и γ_g — объемный вес поровой жидкости.

Для фильтрации применяется следующее условие неразрывности (3):

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + c \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0, \quad (3)$$

где c — удельное сцепление грунта кПа

Уравнение (3) отражает присутствие притока или оттока воды через элементарные площадки за единицу времени для установившейся фильтрации

При получении численного решения по депрессионной кривой задаем данные поданные по коэффициенту фильтрации и граничные условия (уровень и градиент грунтовых вод на левой и правой границе) для оценки фильтрации и проявление суффозии на низовом откосе.

Для оценки устойчивости основания плотины необходимо провести геотехнический расчет его деформации при различных условиях спуска из труб диаметром 1000 мм проложенных закрытым способом под плотиной Кажымского водохранилища.

Предусматриваются расчеты устойчивости плотины до и после устройства водоспуска

Расчеты выполнялись в программном комплексе Plaxis. Для моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) конструктивных материалов и инженерно-геологических элементов тела плотины были использованы следующие математические модели (ММ):

– упругая и упругопластическая для моделирования работы элементов железобетонных конструкций;

– идеально-упругопластическая модель с критерием прочности Кулона-Мора, достаточная для определения НДС тела плотины, основанная на определении общих деформаций как суммы упругих и пластических деформаций, приращение последствий в точке как:

$$d\varepsilon_p = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma},$$

где λ — скалярный пластический множитель; f — функции текучести; σ — напряжение, МПа.

Физико-механические показатели инженерно-геологических элементов (ИГЭ) для модели сооружения (МС) принимались в соответствии с проектно-изыскательскими работами (табл. 2) [3].

Таблица 2. Исходные данные по грунтам и материалам

№	Ед изм.	Порядковый номер грунта в модели				
		1	2	4	5	6
ИГЭ		3-Глина пылевая	2-Суглинок тугопластический	2-Глина пылевая полутвердая	1-Техногенный грунт	Песок средней плотности
Модель грунта		Мора-Кулона	Мора-Кулона	Мора-Кулона	Мора-Кулона	Мора-Кулона
Тип		Дрен. грунт	Дрен. грунт	Дрен. грунт	Дрен. грунт	Дрен. грунт
Удельный вес естественном состоянии γ_{unsat}	кН/м ³	18,80	22,00	18,90	17,00	17,00
Удельный вес насыщенного грунта γ_{sat}	кН/м ³	19,14	22,00	19,23	19,79	19,79
Начальный коэффициент пористости e_{init}		0,851	0,574	0,814	0,648	0,648
Модуль Юнга E'_{ref}	кПа	$15,5 \cdot 10^{-3}$	$20 \cdot 10^{-3}$	7400,0	$24,5 \cdot 10^{-3}$	$24,5 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент Пуассона ν	-	0,40	0,30	0,35	0,30	0,30
G_{ref}	кН/м ²	5536,00	7692,00	2741,00	9423,00	9423,00
E_{oed}	кН/м ²	0	0	0	0	0
v_s	м/с	53,75	58,57	37,72	73,74	73,74
v_p	м/с	131,60	109,6	78,51	138	138
c'_{ref}	кН/м ²	49,00	15	22	1	1
ϕ'	°	17	45	21	33	33
ψ	°				30	30

Области равновесия грунтов с минимальными коэффициентами устойчивости определяются с использованием расчетной процедуры Phi-s reduction ПК PLAXIS, основанной на итерационном снижении прочности грунта до разрушения в некотором множестве пластических точек грунтового массива, положение которых на геомеханической модели в створе плотины определяют границу потери устойчивости. Для обнаружения локализации деформации грунта, определения границ пластических зон по методу полных приращений смещений (перемещений) (Total incremental displacements) находится линия скольжения по границе облака точек, в которых значения полных приращений смещений превышают величину $t_0 \geq 0,05\text{м}$. Затем определяется коэффициент устойчивости как отношение значений параметров прочности. На первом этапе расчет проводился при отсутствии водопускного устройства согласно исходных данных в табл. 1 и железобетонной облицовке, ФПУ 144.35м, в нижнем бьефе УНВ 95% 134,40м (рис. 3–5).

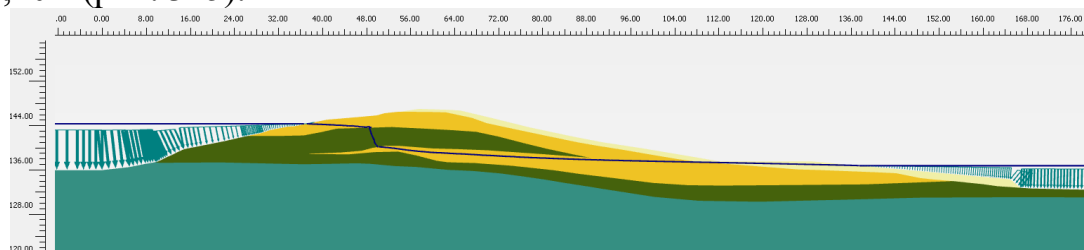


Рис. 3. Геомеханическая модель основания плотины

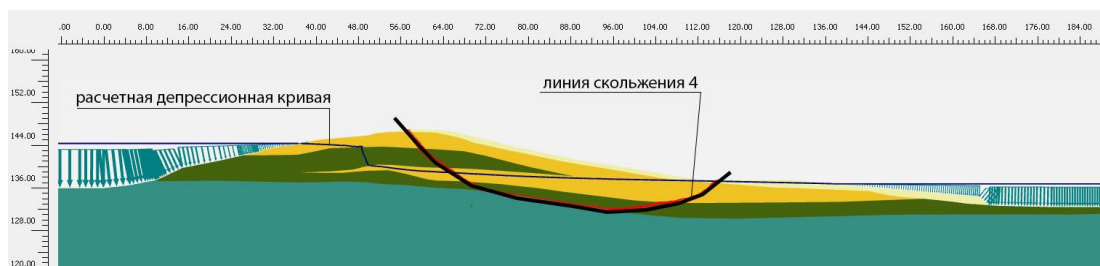


Рис. 4. Основное сочетание нагрузок. Нижняя граница области полных приращений смещений в редуцированной геомеханической модели основания («линия скольжения 4»). Коэффициент устойчивости равен $K_s = 3.02$

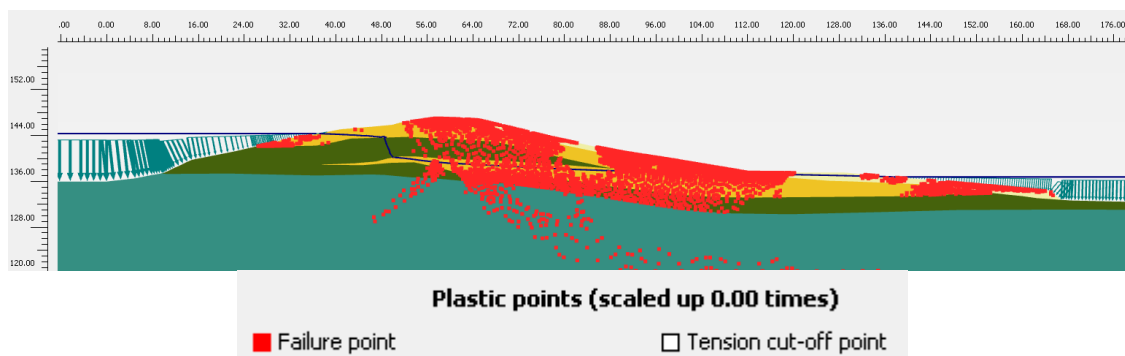
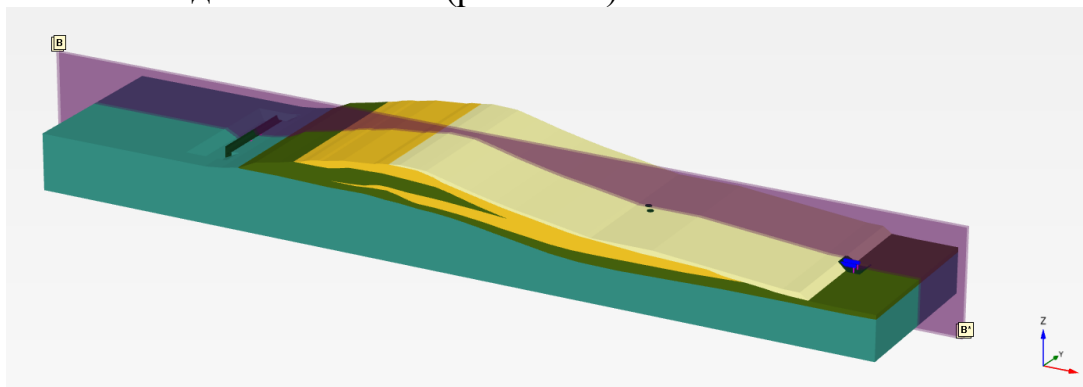
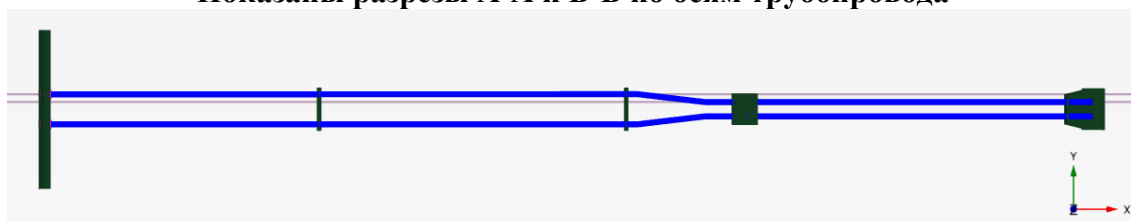


Рис. 5. Основное сочетание нагрузок. Показаны зоны предельного состояния (пластических точек) в редуцированной геомеханической модели склона

Результаты расчетов деформаций основания (вместе с гидротехническими сооружениями - ГТС) и плотины после устройства водоспуска. Этому состоянию соответствует этап 1 расчетов. Для 1 этапа расчетов принимается уровень воды в верхнем бьефе водохранилища равным НПУ 143.0м. В нижнем бьефе в зоне водовыпуска уровень воды равен УНВ 95% 134.40м. Рассчитываются дополнительные вертикальные деформации основания и ГТС для этого этапа (рис. 6–10).



**Рис. 6. Геотехническая модель основания плотины. Вид 3D.
Показаны разрезы А-А и В-В по осям трубопровода**



**Рис. 7. Геомеханическая модель основания плотины. Вид сверху.
Грунты условно не показаны**

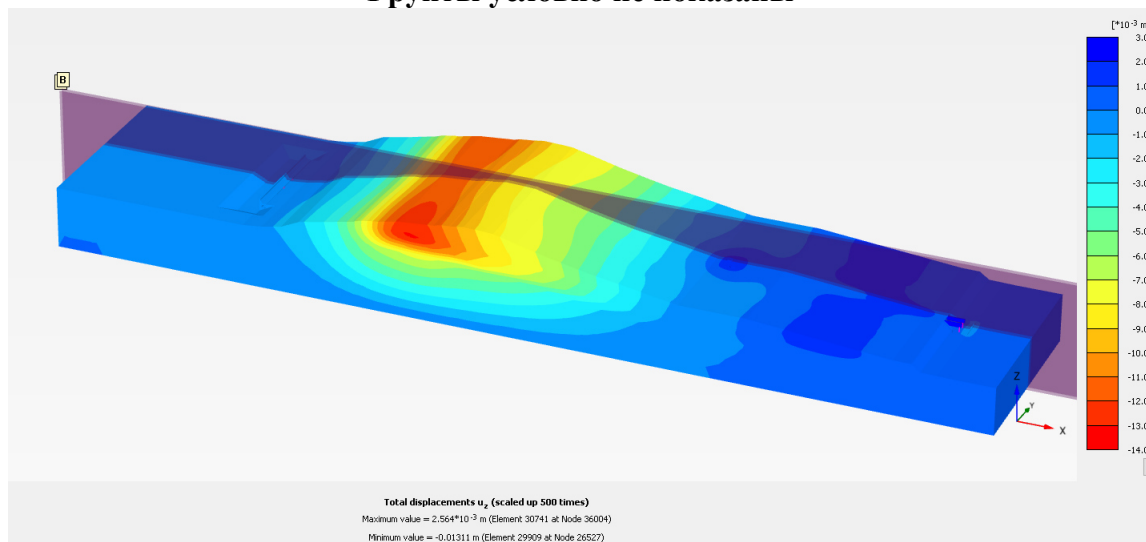


Рис. 8. Основное сочетание нагрузок. Вид 3D. Дополнительные вертикальные деформации (осадка, поднятие) основания плотины после устройства водоспуска. Осадка основания вместе с плотиной не превысит 1.3см, поднятие не превысит 0.3см. Уровень воды в верхнем бьефе Нпу 143.0 м, в нижнем бьефе УНВ 95 % 134.40 м

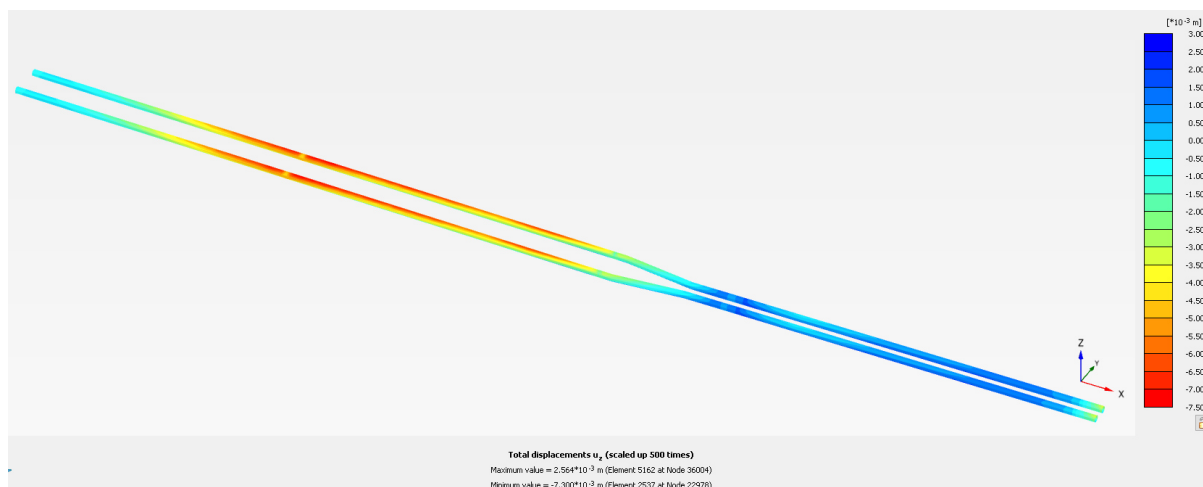


Рис. 9. Основное сочетание нагрузок. Вид 3D. Дополнительные вертикальные деформации(осадка, поднятие) труб водоспуска после устройства водоспуска. Осадка не превысит 0.7 см, поднятие не превысит 0.3 см

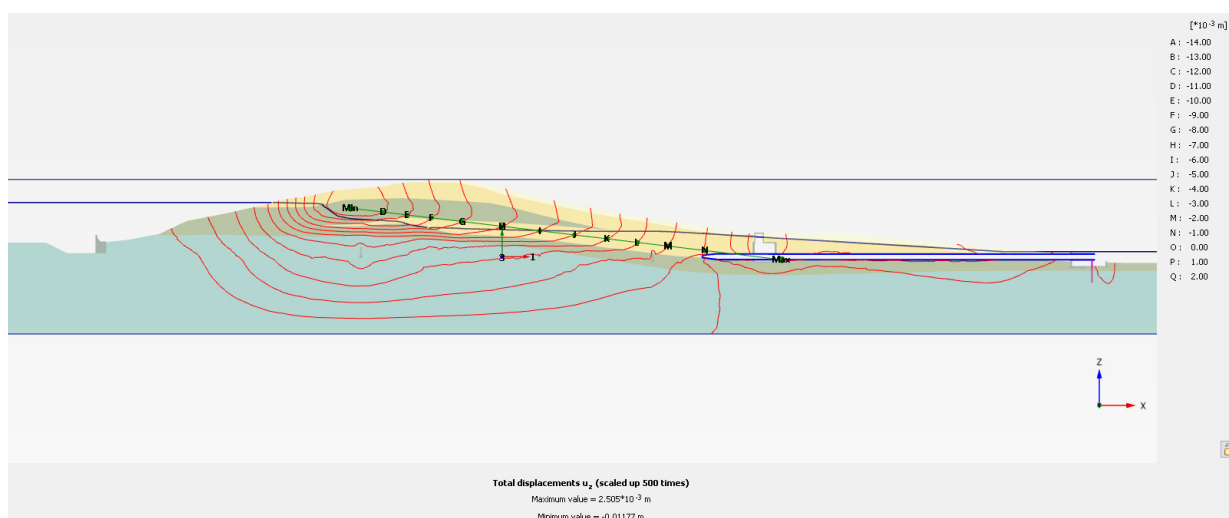


Рис. 10. Основное сочетание нагрузок. Сечение А-А. Дополнительные вертикальные деформации(осадка, поднятие) основания плотины после устройства водоспуска. Осадка основания вместе с плотиной не превысит 1.2 см, поднятие не превысит 0.3 см

Результаты расчета устойчивости плотины до и после устройства водоспуска приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты расчета общей устойчивости

№ линии скольжения	Характеристика склона или площадки строительства	Оценка створа плотины без водоспуска			После устройства водоспуска			
		сочетание нагрузок	Коэффициент устойчивости		Характеристика склона	Осадка основания/труб водоспуска, см	Поднятие основания/труб водоспуска, см	Осадка тела плотины/поднятие тела плотины, см
			расчет-ный	норма-тивный				
1	Уровень воды в верхнем бьефе УМО 139.75м, в нижнем бьефе УНВ 95% 134.40м. Модель грунта МС. Расчет по схеме плоской деформации.	основное	3,44	1,15	устойчив	2,5 / 0,4	1,5/0,3	2,5/0,3
2	Уровень воды в верхнем бьефе НПУ 143.0м, в нижнем бьефе УНВ 95% 134.40м. Модель грунта МС. Расчет по схеме плоской деформации.	основное	3,30	1,15	устойчив	1,3/0,3	0,7/0,3	1,2/0,3
3	Уровень воды в верхнем бьефе ФПУ 144.35м, в нижнем бьефе УНВ 95% 134.40м. Модель грунта МС. Расчет по схеме плоской деформации.	основное	3.13	1.15	устойчив			
4	Уровень воды в верхнем бьефе ФПУ 144.35м, в нижнем бьефе УВВ 1% 136.77м. Модель грунта МС. Расчет по схеме плоской деформации.	основное	3.02	1.15	устойчив	0,2/0,2	0,7/0,5	0,2/0,7
5	Уровень воды в верхнем бьефе УМО 139.75м, в нижнем бьефе УВВ 1% 136.77м. Модель грунта МС. Расчет по схеме плоской деформации.	основное	3.21	1.15	устойчив			
6	Уровень воды в верхнем бьефе НПУ 143.0м, в нижнем бьефе УВВ 1% 136.77м. Модель грунта МС. Расчет по схеме плоской деформации.	основное	3.14	1.15	устойчив			

Заключение

По результатам математического моделирования плотины Кажымского гидроузла произведена оценка НДС и устойчивости грунтового сооружений с учетом устройства водоспускного сооружения ПК Plaxis (результаты сведены в табл. 3). В дальнейшем данные модели можно использоваться для трубчатых сооружений гидроузлов IV – III класса.

Список источников

1. Раздел 3. Технологические и конструктивные решения линейного объекта. Искусственные сооружения. Реконструкция ГТС Кажымского водохранилища на р. Кажым, п. Кажым Койгородского района, бассейн р. Северная Двина (устройство водоспуска), 2024 г.
2. СП 23.13330.2018 Основания гидротехнических сооружений.
3. ГОСТ 20522 -2012 Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний.
4. Леонтьев, Н. Е. Основы теории фильтрации: учебное пособие / Н. Е. Леонтьев. – 2-е изд. – Москва: МАКС Пресс, 2017. – 88 с.
5. Власов, М. А. Выбор рациональных параметров геомеханической модели грунтового основания сооружения в ПК PLAXIS 3D / М. А. Власов, С. М. Простов, М. В. Соколов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2023. – № 5 (159). – С. 4-14. DOI: 10.26730/1999-41252023-5-4-14, EDN: YXSEYA
6. Патронова, О. С. PLAXIS — инструмент инженера-геотехника. Примеры расчетов / О. С. Патронова // CADmaster. – 2002. – № 3(13). URL: http://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_13_plaxis.html.

© Кашарин Д. В., 2026