

Транспортные сооружения / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2026, Том 13, № 1 / 2026, Vol. 13, Iss. 1 <https://t-s.today/issue-1-2026.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/13SATS126.pdf>

DOI: 10.15862/13SATS126 (<https://doi.org/10.15862/13SATS126>)

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Лейер, Д. В. Численный анализ влияния уровня воды в оросительном канале на напряженно-деформированное состояние грунтового массива на примере строительства мостового перехода в Краснодарском крае / Д. В. Лейер, Д. А. Чернявский, А. В. Николайчук, К. А. Жихарева // Транспортные сооружения. — 2026. — Т. 13. — № 1. — URL: <https://t-s.today/PDF/13SATS126.pdf>. DOI: 10.15862/13SATS126.

For citation:

Leyer D.V., Chernyavsky D.A., Nikolaychuk A.V., Zhikhareva K.A. Numerical analysis of the effect of water level in an irrigation canal on the stress-strain state of a soil mass: case study of bridge construction in Krasnodar Krai. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2026;13(1): 13SATS126. Available at: <https://t-s.today/PDF/13SATS126.pdf>. DOI: 10.15862/13SATS126. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 69.034

Лейер Дарья Валерьевна

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», Краснодар, Россия
Заведующий кафедрой «Оснований и фундаментов»
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: dasha_leyer@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9893-030X>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=794169
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57219278136>

Чернявский Денис Алексеевич

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», Краснодар, Россия
Доцент
Кандидат технических наук
E-mail: asp_projekt93@mail.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=919374

Николайчук Александр Витальевич

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», Краснодар, Россия
Доцент
Кандидат географических наук
E-mail: geomor@rambler.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6401-0679>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=588433

Жихарева Ксения Алексеевна

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», Краснодар, Россия
E-mail: ksyushazhixareva0409@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1006-3796>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1328388

Численный анализ влияния уровня воды в оросительном канале на напряженно-деформированное состояние грунтового массива на примере строительства мостового перехода в Краснодарском крае

Аннотация. В статье представлено исследование, направленное на решение проблемы строительства мостовых переходов на слабых грунтах в условиях переменного уровня грунтовых вод (УГВ) и сейсмических воздействий. Исследование отвечает на вопросы о количественном влиянии колебаний УГВ на напряженно-деформированное состояние конструкции и эффективности предлагаемых геотехнических решений. Был выполнен комплексный анализ с применением численного моделирования методом конечных элементов в программном комплексе Plaxis 2D. Исследование проводилось на примере мостового перехода в станице Троицкой Краснодарского края с учетом двух положений уровня грунтовых вод и сейсмического воздействия интенсивностью 8 баллов. В результате установлено, что повышение УГВ приводит к увеличению изгибающих моментов в центральной зоне трубы на 4,6–5,6 % и их снижению в краевой зоне на 7,6–8,0 %. Напряжения под трубой в центральной зоне снижаются на 13,6–20,9 %, тогда как у края трубы наблюдается их рост на 4,6–5,6 %. Разработанные геотехнические решения, включая замену слабого грунта на бутовый камень, показали высокую эффективность — максимальные напряжения не превышают 10 % от нормативной несущей способности основания. Ключевым результатом является установленная разнонаправленность влияния УГВ, при которой водонасыщение центральной части основания приводит к разгрузке конструкции (снижение моментов и напряжений), тогда как в приконтурных зонах фиксируется рост контактных напряжений, что требует обязательного учета при проектировании. Выявленные количественные закономерности позволяют прогнозировать изменение напряженно-деформированного состояния основания и конструкции при сезонных колебаниях УГВ, а также обосновывать необходимость усиления слабого грунта заменой на высокомодульный материал.

Ключевые слова: слабые грунты; напряженно-деформированное состояние; метод конечных элементов; уровень грунтовых вод; геотехнические решения; численное моделирование; несущая способность

Введение

Строительство земляных сооружений с применением геосинтетических материалов активно развивается в течение последних двух десятилетий, включая районы со сложными инженерно-геологическими условиями, такие как сейсмически активные зоны [1]. Нехватка участков с устойчивыми грунтами вынуждает реализовывать проекты транспортной инфраструктуры, промышленных и коммерческих объектов на слабых основаниях: техногенных массивах, просадочных грунтах, прибрежных территориях с илистыми и глинистыми почвами, характеризующимися низкой несущей способностью, что подтверждается исследованиями стабильности откосов гидротехнических каналов [2]. Особую сложность представляет строительство в сейсмоопасных регионах, где требования к проектированию фундаментов ужесточаются [3; 4]. В таких случаях применяются специализированные методы: замена грунта, свайные фундаменты или создание искусственных оснований [5]. Мировой опыт подтверждает, что модернизация свойств грунтов не только повышает безопасность, но и оптимизирует затраты на нулевой цикл строительства [6; 7] и снижает риски, что особенно важно для регионов с высокой оползневой опасностью [8–10].

Технологии инженерной подготовки оснований, получившие развитие с 1960-х гг. благодаря работам французского инженера Луи Менара, стали основой для современных геотехнических решений. Менар, являясь основоположником методов «под ключ», предложил подход, гарантирующий прогнозируемые сроки работ и трансформацию свойств грунтов. Сегодня эти технологии масштабированы до промышленного уровня и применяются для решения большинства задач нулевого цикла. В статье акцентируется внимание на ключевых

методиках, используемых в мировой и российской практике, исключая узкоспециализированные направления, такие как химическое и термическое закрепление грунтов.

Несмотря на то, что теоретические основы многих методов инженерной подготовки оснований были заложены в отечественных исследованиях [3; 4], их практическая реализация достигла пика в Европе [6; 11; 12]. Современный арсенал технологий включает механическое уплотнение грунтов, гидравлическую консолидацию, вертикальное армирование, грунтоперемешивание и заполнение пор (рис. 1). Каждое из этих направлений имеет строгую теоретическую базу и детально проработанную механику процессов, однако их полное описание невозможно в рамках одной публикации из-за масштаба темы, ежегодно обсуждаемой на международных конференциях [13; 14].

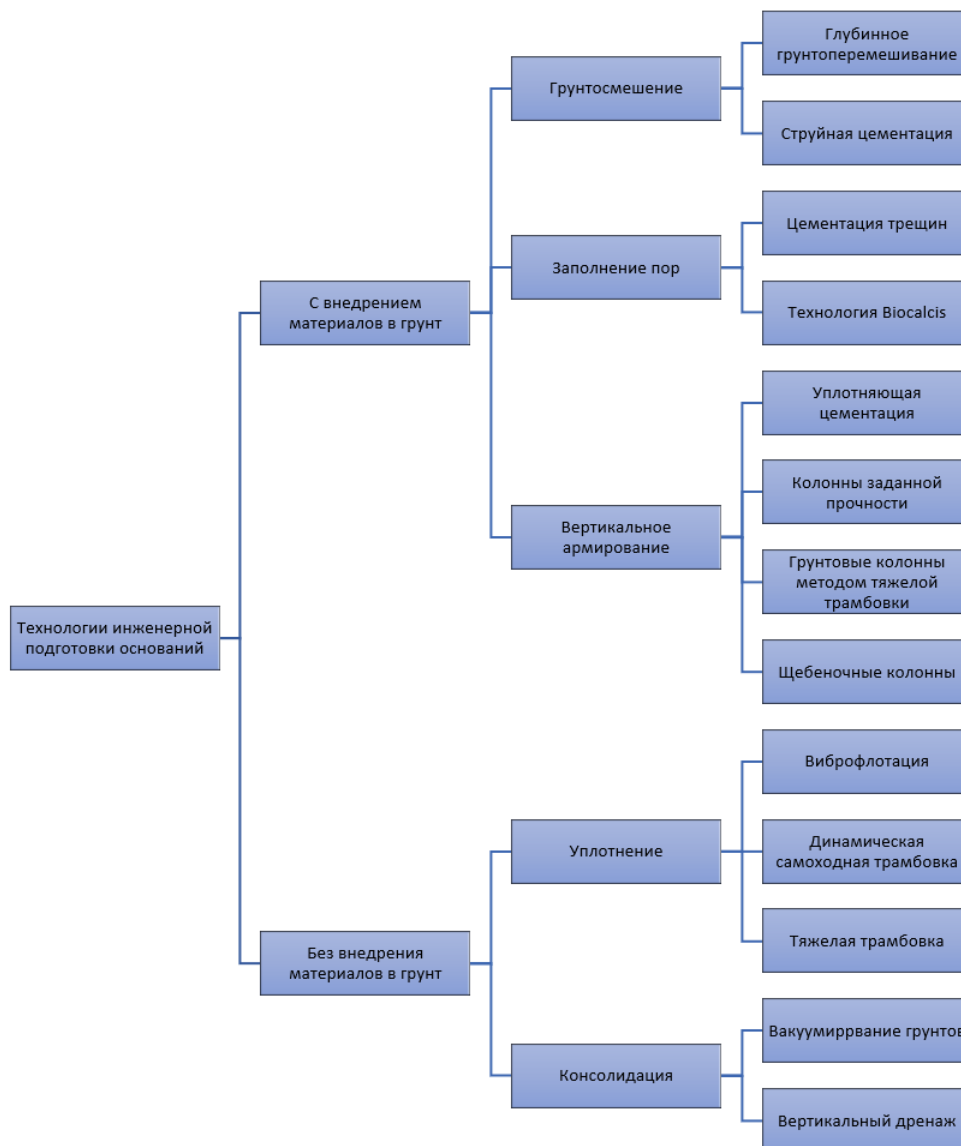


Рисунок 1. Классификация технологий инженерной подготовки слабых оснований (разработано автором)

В данной статье рассматриваются наиболее распространенные методы: вертикальный дренаж (гидравлическая консолидация), тяжелая трамбовка (механическое уплотнение) и вертикальное армирование с использованием колонн заданной прочности. Эти технологии, несмотря на различия в подходах, объединены общей целью — обеспечение устойчивости сооружений на слабых грунтах при минимизации экономических и временных затрат [15–17].

Методы исследований

На основе теоретического анализа информация была применена на практическом объекте «Автомобильная дорога х. Новотроицкий — х. Евсеевский — ст-ца Троицкая, в Крымском районе». Существующее водопропускное сооружение на участке ремонтируемой автодороги — малый трехпролётный мост через канал, длиной 18,05 м (рис. 2).



Рисунок 2. Участок перехода автодороги через мост (фото автора)

Компьютерное моделирование методом конечных элементов

Расчет прочности и деформаций конструкций выполнен в программе Plaxis (соответствие п. 6.2.6 ОДМ 218.2.001-2009) для анализа взаимодействия грунтового массива и конструкции.

Исходные данные приняты на основании:

- инженерно-геологических изысканий (ИГИ);
- проектной документации.

Характеристики грунтов:

- основные грунты — по данным ИГИ (доверительная вероятность $\alpha = 0,95$) с выделением инженерно-геологических элементов (ИГЭ) (табл. 1);
- грунт обратной засыпки — по табличным данным методических рекомендаций для проектирования земляного полотна.

По данным продольного и поперечного разрезов (рис. 3, 4) построена конечно-элементная расчетная схема. Для анализа напряженно-деформированного состояния грунтового массива и конструкции использован метод конечных элементов, позволивший учесть нелинейные свойства грунтов [18–20].

В расчетах рассмотрены два положения (повышенный и пониженный) уровня грунтовых вод (УГВ), а также два сочетания нагрузок: основное (постоянные + транспортные) и особое (сейсмическое воздействие 8 баллов). Сейсмические нагрузки учтены через коэффициент динамической сейсмичности $k_c = 0,05$, принятый по ОДМ 218.2.053-2015 и методикам Л.К. Гинзбурга [5].

Таблица 1

Характеристика грунтов

Характеристика грунта	Номер ИГЭ					
	1	1a	2	3	4	5
	Насыпной грунт: Глина легкая пылеватая твердая	Насыпной грунт: Суглинок легкий пылеватый тугопластичный	Глина тяжелая полутвердая непросадочная сильнодеформируемая	Глина легкая пылеватая мягкопластичная непросадочная сильнодеформируемая	Суглинок легкий песчанистый текучий очень сильно деформируемый	Глина текучепластичная: Очень сильно деформируемая
Нормативные значения						
Влажность природная W, д.е.	0,18	0,24	0,38	0,37	0,27	0,43
Коэффициент водонасыщения S _r , д.е.	0,62	0,86	0,97	0,99	0,95	0,98
Плотность част. грунта ρ _s , г/см ³	2,73	2,71	2,71	2,73	2,70	2,74
Плотность грунта ρ, г/см ³	1,81	1,92	1,82	1,83	1,92	1,78
Коэффициент пористости e	0,779	0,754	1,055	1,078	0,844	1,189
Удельное сцепление C, кПа	32	9	18	10	5	10
Угол внутреннего трения φ, град.	13	23	18	8	15	7
Модуль общ. деформации E с учетом коэф. мк, МПа	16,2	14,1	6,4	6,7	1,4	1,3
Расчетные значения C, φ, ρ по несущей способности (α = 0,95)						
Удельное сцепление C, кПа	21	6	12	7	4	7
Угол внутреннего трения φ, град.	11	20	16	7	15	6
Плотность грунта ρ, г/см ³	1,73	1,89	1,78	1,82	1,86	1,74

Разработано автором

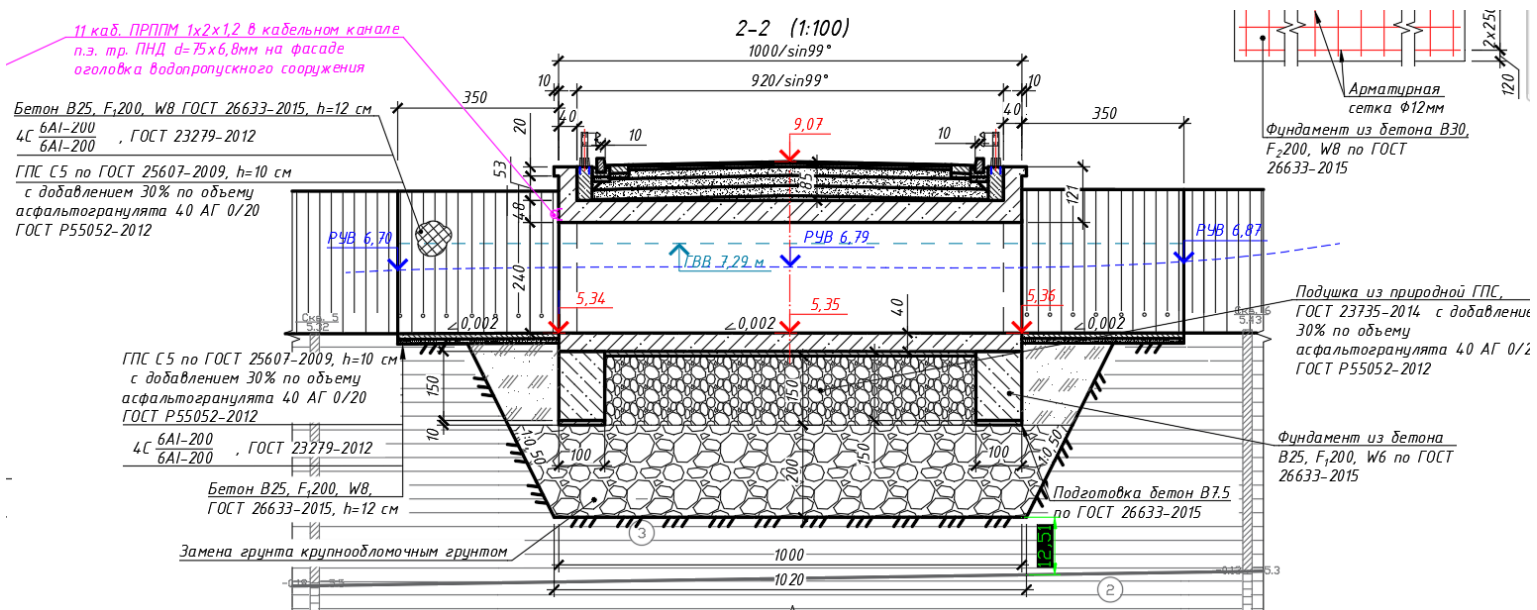


Рисунок 3. Продольный разрез проектируемой трубы на ПК1+93 (разработано автором)

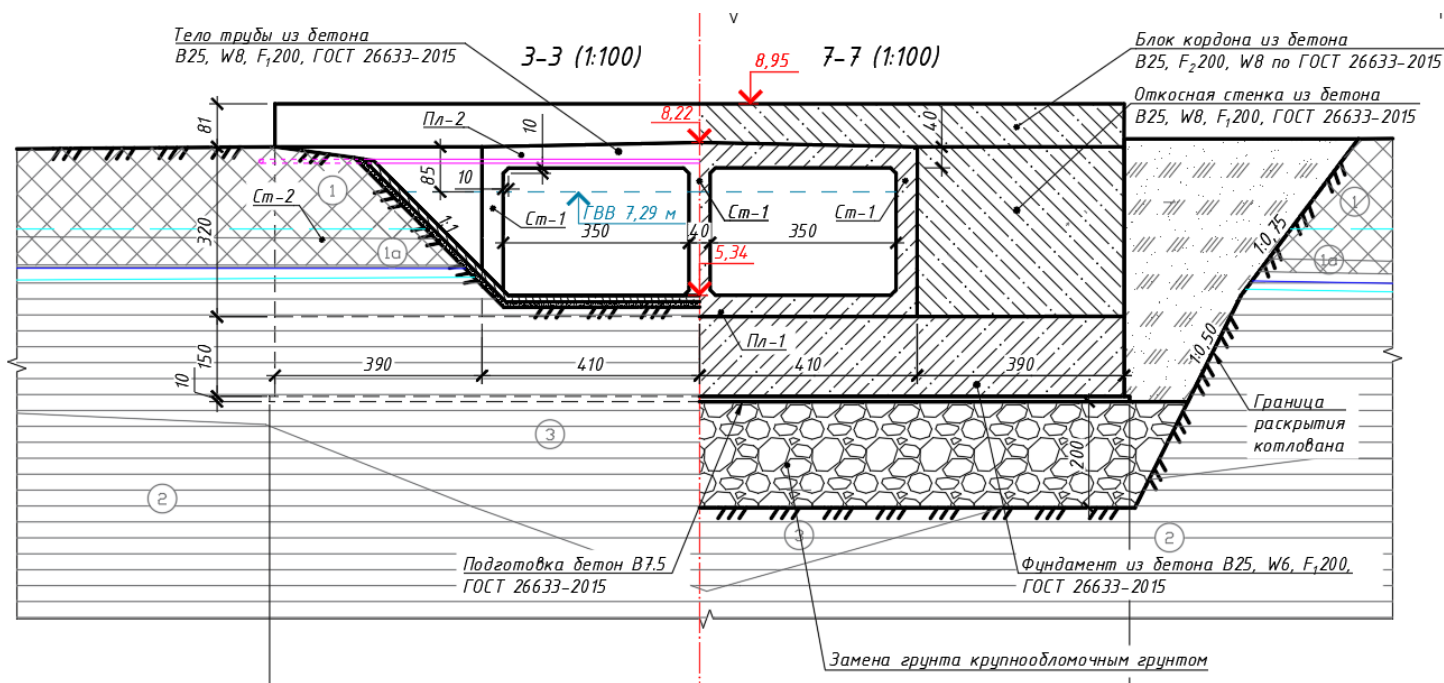


Рисунок 4. Поперечный разрез проектируемой трубы на ПК1+93 (разработано автором)

Результаты моделирования показали, что максимальные напряжения под трубой (мостовым переходом) на участке ПК1+93 достигают 127,8 кПа при несущей способности грунта 1 373,62 кПа (табл. 2), что подтверждает безопасность конструкции.

Таблица 2

Результаты численного моделирования железобетонной трубы

Пикет	Положение УГВ	Сочетание нагрузок	Развивающиеся усилия		Напряжения под трубой σ , кПа	Напряжения на контакте ИГЭ-2 и камня бутового σ , кПа	
			Изгибающий момент M, кНм	Поперечная сила Q, кН			
ПК1+93	Нагрузка по центру трубы	Повышенный	Основное	165,0	159,8	96,36	95,58
		Повышенный	Особое	166,6	162,3	91,19	89,94
		Пониженный	Основное	157,7	164,4	111,5	112,2
		Пониженный	Особое	157,8	166,7	115,3	115,6
	Нагрузка с краю трубы	Повышенный	Основное	124,6	153,9	124,1	115,6
		Повышенный	Особое	119,9	156,6	122,6	123,5
		Пониженный	Основное	134,8	151,3	123,5	115,6
		Пониженный	Особое	130,3	153,8	127,8	113,6
Предельный изгибающий момент			257,7	—	—	—	
Предельная поперечная сила			—	570,9	—	—	
Минимальная несущая способность грунта R, кПа основания			—	—	—	1 373,62	

Разработано автором

При анализе изгибающих моментов при нагружении по центру трубы влияние УГВ на усилия при основном сочетании нагрузок проявилось в увеличении момента на 4,6 % при переходе от пониженного (157,7 кН) к повышенному уровню (165 кН). В особом сочетании этот рост составил 5,6 %. Различия между сочетаниями при одинаковом УГВ оказались незначительными: 0,06 % для пониженного и 0,97 % для повышенного уровня. Полученные результаты демонстрируют, что основное воздействие на величину изгибающего момента оказывает изменение уровня грунтовых вод, особенно выраженное в условиях особого сочетания нагрузок, что согласуется с исследованиями влияние водонасыщения на работу слабых оснований [21; 22] (рис. 5).

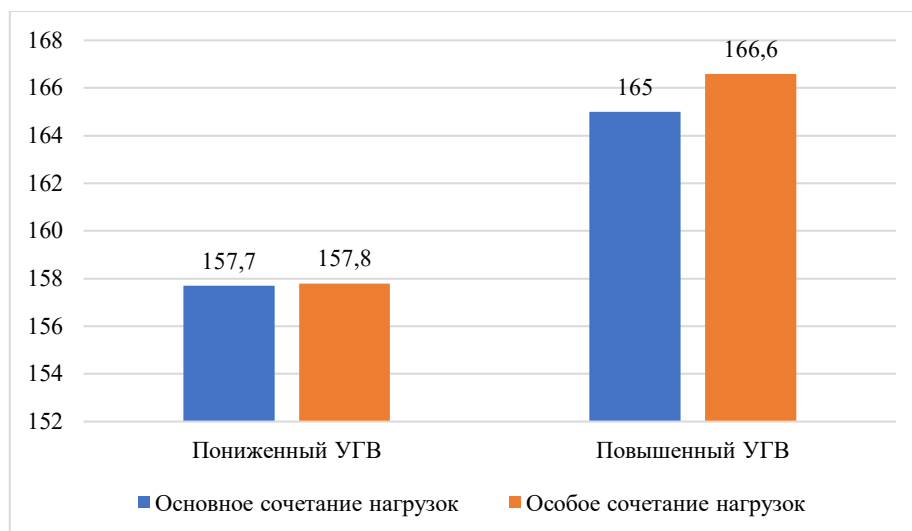


Рисунок 5. График изменения изгибающего момента M при расположении нагрузки по центру трубы (разработано автором)

При анализе поперечных сил при нагружении по центру трубы влияние УГВ на усилия при основном сочетании нагрузок проявилось в снижении силы на 2,8 % при переходе от пониженного (164,4 кН) к повышенному уровню (159,8 кН). В особом сочетании это уменьшение составило 2,6 %. Различия между сочетаниями при одинаковом УГВ составили 1,4 % для пониженного уровня и 1,6 % для повышенного уровня. Полученные результаты показывают, что в отличие от изгибающих моментов, повышение УГВ приводит к уменьшению поперечных сил, при этом наибольшее влияние оказывает именно изменение УГВ, тогда как разница между основным и особым сочетаниями не превышает 1,6 % (рис. 6).

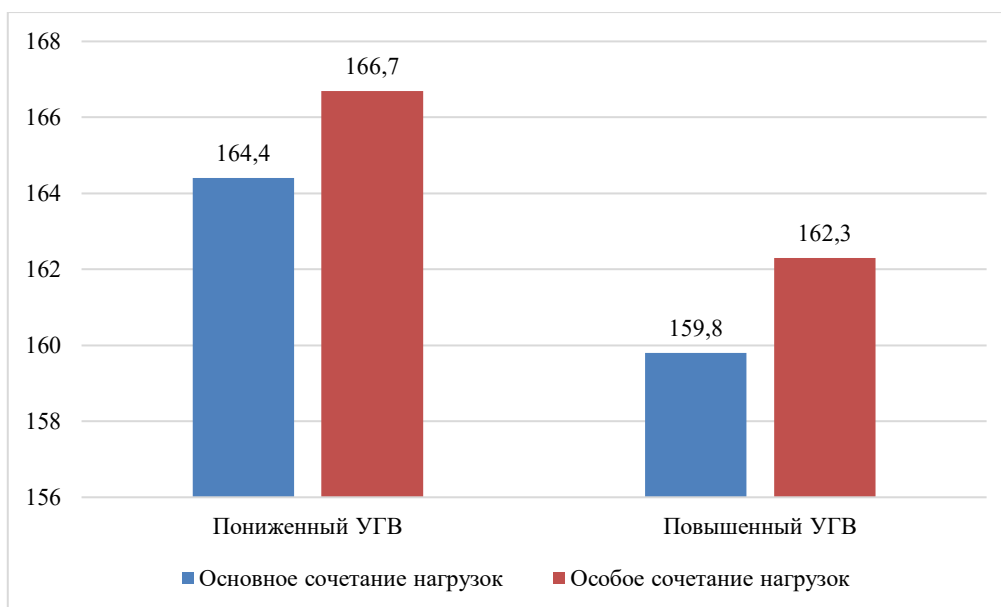


Рисунок 6. График изменения поперечной силы Q при расположении нагрузки по центру трубы (разработано автором)

При анализе напряжений под трубой влияние изменения уровня грунтовых вод (УГВ) на распределение напряжений при основном сочетании нагрузок проявилось в снижении напряжения на 13,6 % при переходе от пониженного (111,5 кН) к повышенному уровню УГВ (96,36 кН). В особом сочетании нагрузок это уменьшение оказалось более существенным и составило 20,9 %. Разница между основным и особым сочетаниями при одинаковом УГВ

показала увеличение напряжений на 3,4 % для пониженного уровня и снижение на 5,4 % для повышенного уровня. Полученные данные свидетельствуют, что повышение УГВ приводит к значительному уменьшению напряжений под трубой, причем этот эффект усиливается в условиях особого сочетания нагрузок, тогда как переход между типами сочетаний при фиксированном УГВ оказывает менее выраженное влияние на величину напряжений [23; 24] (рис. 7).

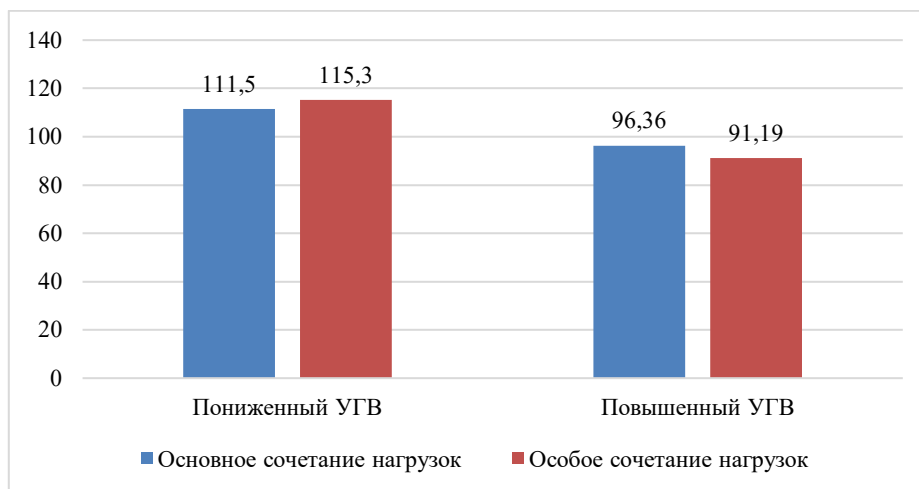


Рисунок 7. График изменения нормальных напряжений под трубой σ при расположении нагрузки по центру трубы (разработано автором)

При анализе изгибающих моментов на краю трубы влияние изменения уровня грунтовых вод (УГВ) при основном сочетании нагрузок проявилось в снижении момента на 7,6 % при переходе от пониженного (134,8 кН) к повышенному УГВ (124,6 кН), тогда как в особом сочетании это уменьшение составило 8,0 %. Различия между основным и особым сочетаниями при одинаковом УГВ показали снижение моментов на 3,3 % для пониженного уровня и на 3,8 % для повышенного уровня. Полученные результаты демонстрируют, что в краевой зоне трубы повышение УГВ приводит к уменьшению изгибающих моментов, причем этот эффект выражен сильнее, чем влияние перехода от основного к особому сочетанию нагрузок. Наибольшее воздействие на величину момента оказывает именно изменение уровня грунтовых вод, вызывая снижение на 7,6–8,0 %, в то время как смена типа сочетания нагрузок при фиксированном УГВ дает уменьшение на 3,3–3,8 % (рис. 8).

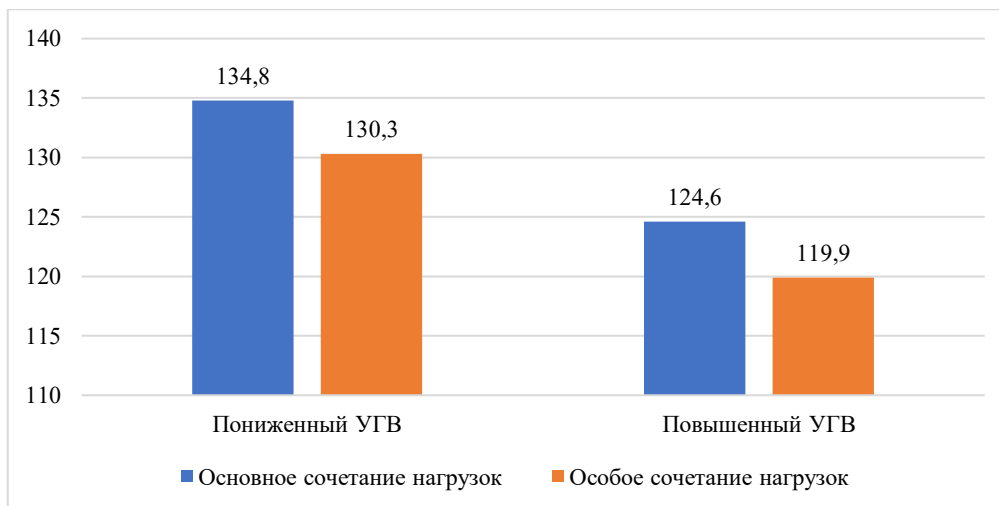


Рисунок 8. График изменения изгибающего момента M при расположении нагрузки с краю трубы (разработано автором)

При анализе поперечных сил на краю трубы влияние изменения уровня грунтовых вод (УГВ) при основном сочетании нагрузок проявилось в увеличении поперечной силы на 1,7 % при переходе от пониженного (151,3 кН) к повышенному УГВ (153,9 кН), тогда как в особом сочетании этот рост составил 1,8 %. Различия между основным и особым сочетаниями при одинаковом УГВ показали увеличение поперечных сил на 1,6 % для пониженного уровня и на 1,8 % для повышенного уровня. Полученные результаты демонстрируют, что в краевой зоне трубы повышение УГВ приводит к незначительному росту поперечных сил (1,7–1,8 %), причем этот эффект сопоставим с влиянием перехода от основного к особому сочетанию нагрузок (1,6–1,8 %). Наибольшие значения поперечных сил наблюдаются при сочетании повышенного УГВ и особого сочетания нагрузок, однако общее влияние обоих факторов остается относительно небольшим, не превышая 2 % изменения величины поперечной силы (рис. 9).

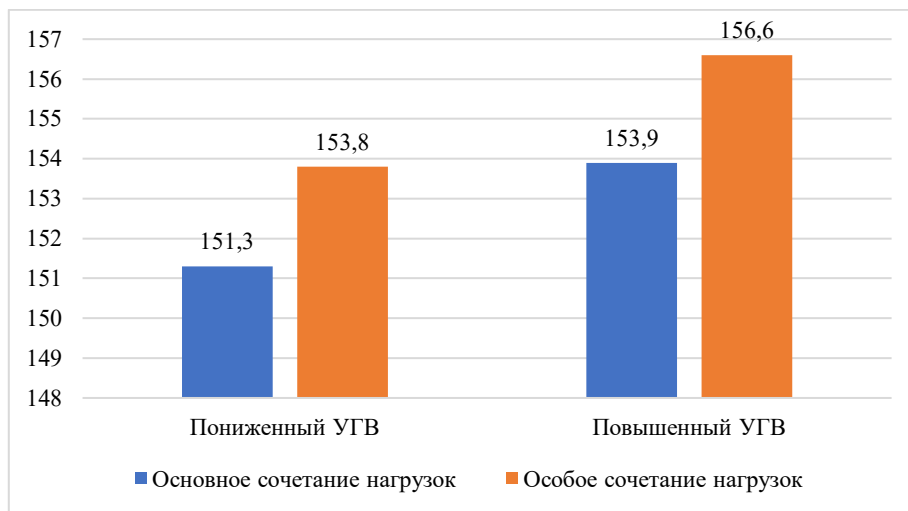


Рисунок 9. График изменения поперечной силы Q при расположении нагрузки с краю трубы (разработано автором)

При анализе напряжений под краем трубы было выявлено, что повышение уровня грунтовых вод приводит к существенному росту напряжений — при основном сочетании нагрузок увеличение составило 4,6 %, а при особом сочетании рост достиг 5,6 %. При этом разница между основным и особым сочетаниями нагрузок оказалась незначительной: всего 0,06 % для пониженного УГВ и 1,0 % для повышенного.

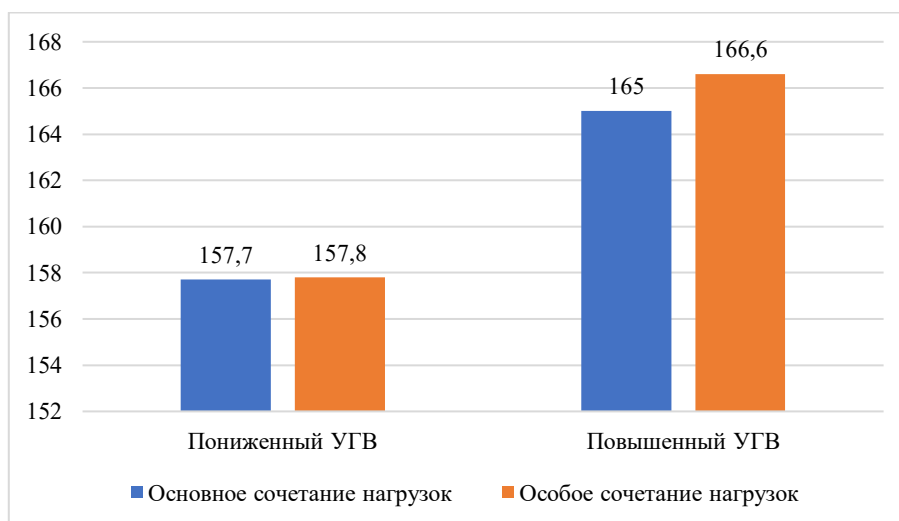


Рисунок 10. График изменения нормальных напряжений под трубой σ при расположении нагрузки с краю трубы (разработано автором)

Наибольшие значения напряжений были зафиксированы при сочетании повышенного уровня грунтовых вод с особым сочетанием нагрузок. Полученные данные наглядно демонстрируют, что основное влияние на величину напряжений под краем трубы оказывает именно изменение уровня грунтовых вод, тогда как переход между типами сочетаний нагрузок играет второстепенную роль. Это подчеркивает важность тщательного учета гидрогеологических условий при проектировании, поскольку колебания УГВ вызывают наиболее существенные изменения напряженного состояния конструкции (рис. 10).

Таблица 3

Результаты расчетов прочности подстилающего слоя грунта

<i>Определение вертикального давления от подвижной нагрузки</i>				
№	Наименование параметра	Ус. обозн.	Единица измерения	Величина
1	Коэффициент надежности по нагрузке	γ_f	[-]	1,0
2	Диаметр водопропускной трубы	d	[м]	7,0
3	Динамический коэффициент	$1+\gamma$	[-]	1,1
4	Линейная нагрузка	γ	[кН/м]	65,9
<i>Определение расчетного вертикального давления на обрез блока</i>				
1	Объем одного погонного метра звена трубы	$V_{зв}$	[м ³]	9,72
2	Удельный вес железобетона трубы	γ_f	[кН/м ³]	24,0
3	Нагрузка от веса одного погонного метра трубы	$G_{зв}^p$	[кН]	243,00
4	Удельный вес воды	γ_w	[кН/м ³]	9,81
5	Внутренний диаметр водопропускной трубы	d_0	[м]	8,2
6	Погонная нагрузка от гидростатического давления	$G_{г}^p$	[кН]	164,8
<i>Определение расчетного вертикального давления грунта</i>				
1	Удельный вес грунта обратной засыпки	g	[кН/м ³]	18,0
2	Нормативный угол внутреннего тения	ϕ	[град.]	28,0
3	Коэффициент нормативного бокового давления грунта	t	[-]	0,333
4	Расстояние от основания до верха трубы	a	[м]	3,2
5	Внутренний диаметр водопропускной трубы	$d_{мп}$	[м]	7,0
6	Толщина стенки водопропускной трубы	d	[м]	0,40
7	Коэффициент	S	[-]	1,0
8	Внешний диаметр трубы	$d_{мп}$	[м]	8,2
9	Коэффициент	B_0	[-]	0,15
10	Коэффициент надежности по нагрузке	g_f	[-]	1,1
11	Коэффициент вертикального давления грунта	c_v	[-]	1,03
12	Нормативное вертикальное давление грунта	p_v	[кПа]	15,66
13	Расчетное вертикальное давление грунта	P_v^p	[кПа]	17,22
14	Суммарная вертикальная нагрузка на обрез фундамента	ΣP	[кН/м]	502,31
<i>Определение расчетного сопротивления грунта (приложение 2 СП 35.13330.2011).</i>				
<i>Опираение на заменяемый грунт камня бутового</i>				
1	Условное сопротивление грунта (табл. 2.2 прил. 2 СП 35.13330.2011)	R_0	[кПа]	980
2	Ширина подошвы блока	b	[м]	8,2
3	Глубина заложения фундамента	d	[м]	4,1
4	Осредненное по слоям расчетное значение удельного веса грунта	γ	[кН/м ³]	18,0
5	Коэффициент	k_1	[-]	0,02
6	Коэффициент	k_2	[-]	1,50
7	Расчетное сопротивление грунта	R	[кПа]	1 923,1
<i>Определение несущей способности грунта (приложение 4 СП 35.13330.2011).</i>				
<i>Опираение на заменяемый грунт камнем бутовым</i>				
1	Среднее давление на грунт, действующее под подошвой лекального блока	p	[кПа]	61,26
2	Расстояние от подошвы фундамента до поверхности подстилающего слоя	z_i	[м]	0,40
3	Коэффициент, принимаемый по табл. 4.1 приложения 4 СП 35.13330.2011	γ	[-]	1,0
4	Коэффициент надежности по назначению сооружения	γ_n	[-]	1,40
5	Расчетная нагрузка для проверки несущей способности	P_{max}	[кПа]	68,46
6	Расчетная несущая способность грунта	R	[кПа]	1 373,62

Разработано автором

Геотехнические решения включали замену слабого грунта ИГЭ-3 ($R_0 = 196$ кПа) на бутовый камень фракции 70–300 мм марки М800. Проверка несущей способности подстилающего

слоя выполнена по СП 35.13330.2011, в частности по методике Приложения 4, регламентирующего расчет оснований на сопротивление местному продавливанию (пробую) слабого подстилающего грунта. Согласно этой методике, предельное состояние основания наступает при превышении расчетного давления (P_{max}) от сооружения над сопротивлением подстилающего слоя (R). Для обеспечения надежности должно выполняться условие $P_{max} \leq R$, где R определяется с учетом коэффициентов условий работы (γ), надежности (γ_n), характеристик грунта (R_{sub}) и его слоистости [25]. В данном случае критическим параметром стала толщина слоя замены ($z_i = 0,4$ м), через который нагрузка передается на подстилающий глинистый грунт ИГЭ-2. Расчеты подтвердили, что даже при минимальной толщине бутового камня давление на кровлю ИГЭ-2 ($P_{max} = 68,46$ кПа) значительно ниже его расчетного сопротивления продавливанию ($R = 1\,373,62$ кПа), что исключает риск развития недопустимых деформаций (табл. 3).

Проведенный расчет по методике Приложения 4 СП 35.13330.2011 показал значительный запас прочности подстилающего слоя с расчетным сопротивлением $R = 1\,373,62$ кПа при максимальном давлении $P_{max} = 68,46$ кПа. Сравнительный анализ методов определения несущей способности выявил особенности различных подходов.

Расчет по Приложению 2 СП 35.13330.2011 для слоя бутового камня дал значение $R = 1\,923,1$ кПа, характеризующее общую несущую способность основания. В отличие от этого, методика Приложения 4 специально оценивает сопротивление продавливанию с учетом толщины распределяющего слоя ($z_i = 0,4$ м). Результаты численного моделирования в Plaxis показали максимальные контактные напряжения $127,8$ кПа, что превышает осредненное значение P_{max} по нормативной методике, но подтверждает достаточность запаса прочности. Комплексное применение различных методик позволило установить, что даже при неблагоприятных условиях фактические напряжения не превышают 10 % от нормативной несущей способности, что обеспечивает достоверность проектных решений для объектов в сложных инженерно-геологических условиях [26] (рис. 11–15).

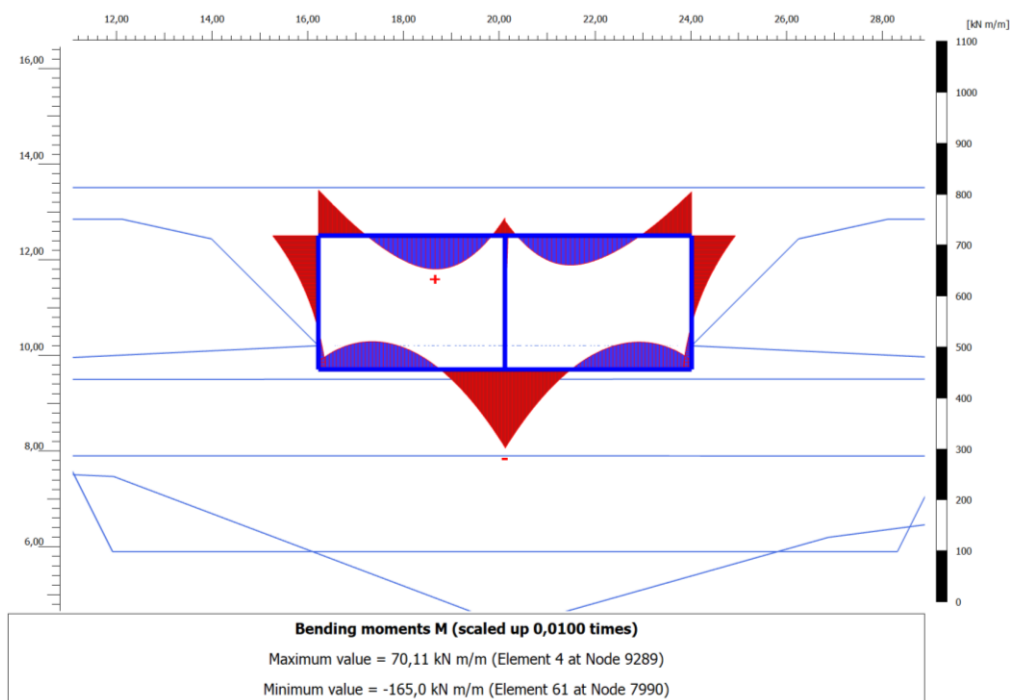


Рисунок 11. Эпюра изгибающих моментов. Транспортная нагрузка по центру трубы. Повышенный УГВ. Основное сочетание нагрузок (разработано автором)

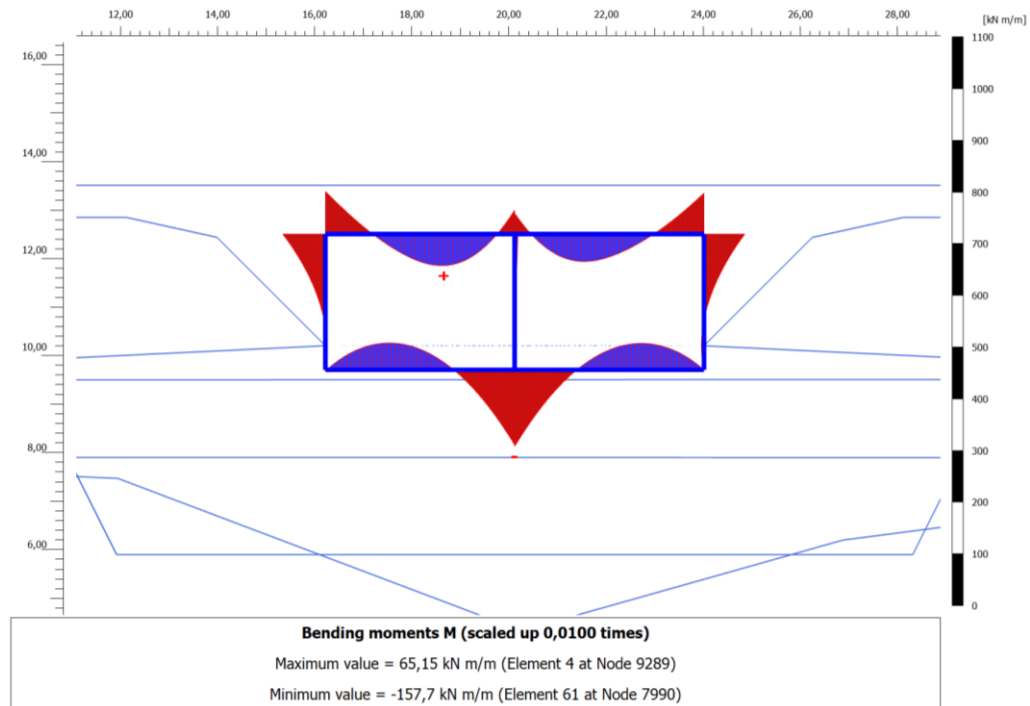


Рисунок 12. Эпюра изгибающих моментов. Транспортная нагрузка по центру трубы. Пониженный УГВ. Основное сочетание нагрузок (разработано автором)

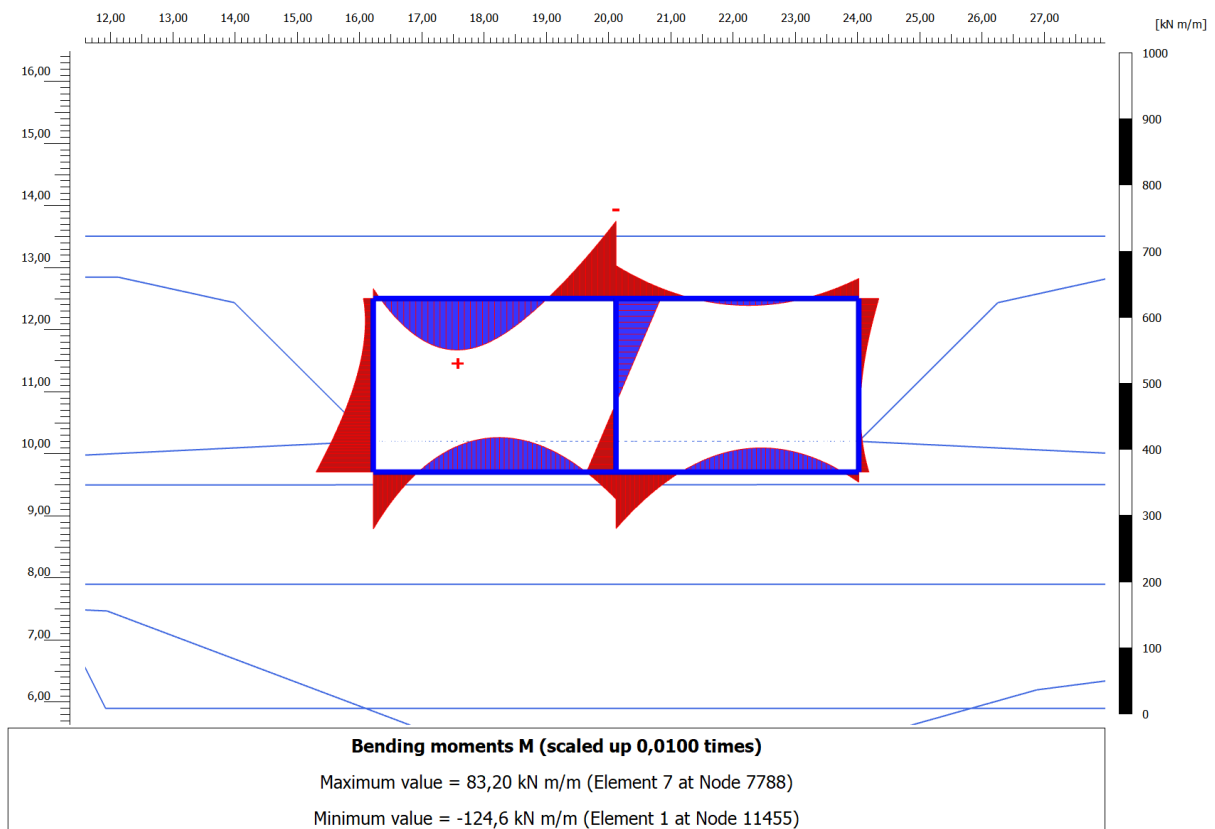


Рисунок 13. Эпюра изгибающих моментов. Транспортная нагрузка по краю трубы. Повышенный УГВ. Основное сочетание нагрузок (разработано автором)

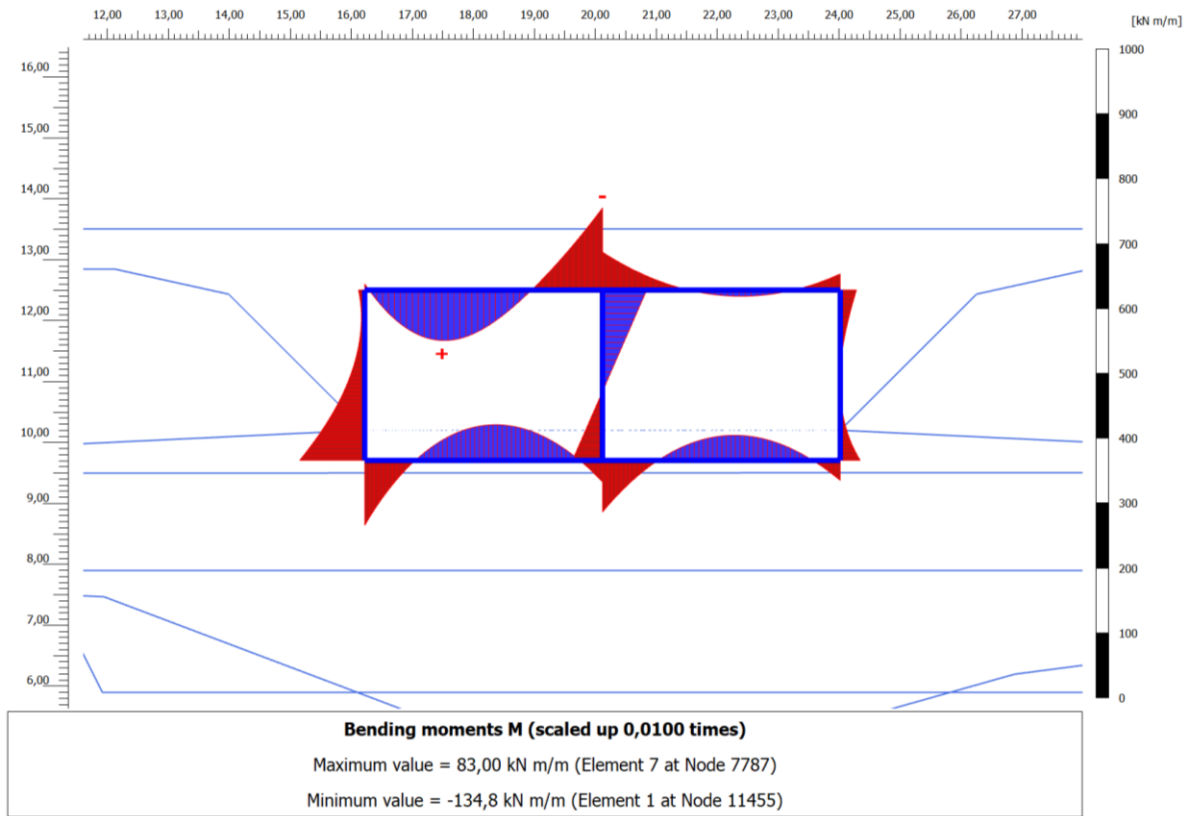


Рисунок 14. Эпюра изгибающих моментов. Транспортная нагрузка по краю трубы. Пониженный УГВ. Основное сочетание нагрузок (разработано автором)

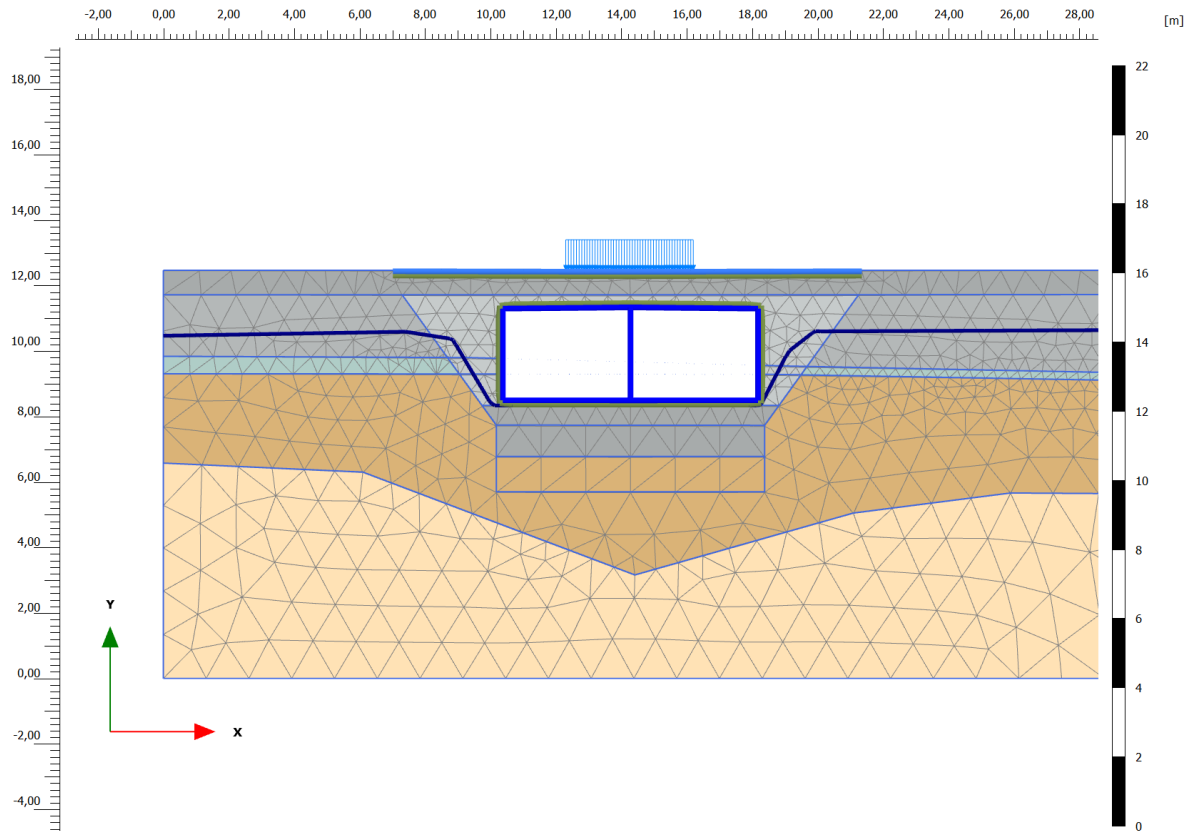


Рисунок 15. Расчетная конечно-элементная схема. Транспортная нагрузка по центру трубы (разработано автором)

Визуализация результатов включала построение эпюр напряжений, деформаций и усилий. На участке ПК1+93 при пониженном УГВ напряжения на контакте камня бутового и ИГЭ-2 составили 115,6 кПа, что в 12 раз ниже несущей способности грунта (табл. 3). Эпюры изгибающих моментов подтвердили равномерное распределение нагрузок как при центральном, так и при краевом расположении транспорта (рис. 11–15).

Заключение

Проведенное исследование подтвердило, что применение современных методов усиления слабых глинистых грунтов является ключевым фактором обеспечения долговечности и безопасности автомобильных дорог в условиях Краснодарского края.

Практическая часть исследования на примере ремонта автомобильной дороги в Крымском районе Краснодарского края подчеркнула важность комплексного подхода. Компьютерное моделирование методом конечных элементов в программе Plaxis позволило оценить напряженно-деформированное состояние грунтового массива под мостовым переходом с учетом вариаций уровня грунтовых вод и сейсмических воздействий. Результаты расчетов подтвердили, что максимальные напряжения под трубой не превышают несущую способность грунта, что гарантирует безопасность конструкции. Анализ влияния УГВ выявил, что повышение уровня вод приводит к снижению изгибающих моментов на 4,6–20,9 % в центральной зоне трубы, тогда как в краевых участках наблюдается рост напряжений до 5,6 %. Полученные результаты демонстрируют, что изменение гидрогеологических условий является более значимым фактором, влияющим на напряженно-деформированное состояние конструкции, чем сейсмическое воздействие заданной интенсивности, что подчеркивает необходимость обязательного анализа влияния различных положений уровня подземных вод при проектировании подобных объектов.

Геотехнические решения, включая замену слабых грунтов бутовым камнем и устройство шпунтового ограждения, продемонстрировали полное соответствие нормативным требованиям и высокую эффективность. Численное моделирование в комплексе с нормативными расчетами по СП 35.13330.2011 показало, что созданный искусственный слой из высокомодульного материала обеспечивает равномерное распределение давления и значительный запас прочности. Расчетное сопротивление подстилающего слоя основания ($R = 1\,373,62$ кПа) на порядок превышает максимальные возникающие напряжения, что свидетельствует об оптимальности и надежности принятых проектных решений. Таким образом, комплексный подход, сочетающий метод конечных элементов с классическими инженерными расчетами, позволяет не только обосновать технико-экономическую целесообразность выбранных мероприятий, но и существенно повысить достоверность прогноза поведения сооружения в реальных условиях эксплуатации при сезонных колебаниях УГВ и сейсмических воздействиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маций, С.И. Управление оползневый риском / С.И. Маций, Е.В. Безуглова. — Краснодар: АлВи-дизайн, 2010. — 239 с.
2. Kastamto, Arniza, Mas F., Alfath M., Susarman Z., Fajar D. Analysis of slope stability to determine the causes of collapse the primary canal in the North-Raman irrigation-area, Central Lampung / A. Kastamto, F. Mas, M. Alfath, Z. Susarman, D. Fajar // E3S Web of Conferences. — 2025. — Т. 604. — Art. 13001. — URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2025/04/e3sconf_icdm2024_13001/e3sconf_icdm2024_13001.html — DOI: [10.1051/e3sconf/202560413001](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560413001) (дата обращения: 05.10.2025).

3. Добров, Э.М. Обеспечение устойчивости склонов и откосов в дорожном строительстве с учетом ползучести грунтов / Э.М. Добров. — М.: Транспорт, 1975. — 216 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006931078> (дата обращения: 05.10.2025).
4. Гребнев, Ю.С. Инженерная защита от опасных геологических процессов. Руководство по расчету и проектированию противооползневых мероприятий / Ю.С. Гребнев. — М.: ГЕОС, 2008. — 274 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004178005> (дата обращения: 05.10.2025).
5. Гинзбург, Л.К. Противооползневые удерживающие конструкции / Л.К. Гинзбург. — М.: Стройиздат, 1979. — 80 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007642597> (дата обращения: 05.10.2025).
6. Bezuglova E., Matsiy S. Engineering and geological grounds of landslide protection reliability of structures / E. Bezuglova, S. Matsiy // *Landslide Science and Practice: Risk Assessment, Management and Mitigation*. — 2013. — Т. 6. — С. 709–714. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21915606> — DOI: [10.1007/978-3-642-31319-6_90](https://doi.org/10.1007/978-3-642-31319-6_90) — EDN: [SLPBJF](https://www.edn.net/SLPBJF) (дата обращения: 10.05.2025).
7. Analysis of the stability of the Kuban River landslide slope involving the materials of landslide hazard monitoring / M.A. Bandurin, V.A. Volosukhin, I.A. Prikhodko, A.A. Rudenko // *Construction and Geotechnics*. — 2023. — Т. 14, № 4. — С. 62–74. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=57170788> — DOI: [10.15593/2224-9826/2023.4.05](https://doi.org/10.15593/2224-9826/2023.4.05) — EDN: [GJXUKZ](https://www.edn.net/GJXUKZ) (дата обращения: 05.10.2025).
8. Salvati P., Rossi M., Bianchi C., Guzzetti F. Landslide Risk to the Population of Italy and Its Geographical and Temporal Variations / P. Salvati, M. Rossi, C. Bianchi, F. Guzzetti // *Extreme Events*. — 2015. — С. 14–18. — URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119157052.ch14> — DOI: [10.1002/9781119157052.ch14](https://doi.org/10.1002/9781119157052.ch14) (дата обращения: 05.10.2025).
9. Brunetti M.T., Peruccacci S., Rossi M., Luciani S., Valigi D., Guzzetti F. Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy / M.T. Brunetti, S. Peruccacci, M. Rossi [et al.] // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. — 2010. — Т. 10, № 3. — С. 447–458. — URL: <https://nhess.copernicus.org/articles/10/447/2010/> — DOI: [10.5194/nhess-10-447-2010](https://doi.org/10.5194/nhess-10-447-2010) (дата обращения: 05.10.2025).
10. Marchi L., Arattano M., Deganutti A.M. Ten years of debris-flow monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps) / L. Marchi, M. Arattano, A.M. Deganutti // *Geomorphology*. — 2002. — Т. 46. — С. 1–17. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169555X01001623> — DOI: [10.1016/S0169-555X\(01\)00162-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00162-3) (дата обращения: 05.10.2025).
11. Lari S., Frattini P., Crosta G.B. A probabilistic approach for landslide hazard analysis / S. Lari, P. Frattini, G.B. Crosta // *Engineering Geology*. — 2014. — Т. 182. — С. 3–14. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795214001811> — DOI: [10.1016/j.enggeo.2014.07.015](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.07.015) (дата обращения: 05.10.2025).
12. Maltseva T.V., Trefilina E.R., Saltanova T.V. Deformed state of the bases buildings and structures from weak viscoelastic soils / T.V. Maltseva, E.R. Trefilina, T.V. Saltanova // *Magazine of Civil Engineering*. — 2020. — № 3(95). — С. 119–130. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44368047> — DOI: [10.18720/MCE.95.11](https://doi.org/10.18720/MCE.95.11) — EDN: [WZNBVV](https://www.edn.net/WZNBVV) (дата обращения: 05.10.2025).

13. Причины активизации оползня на Федеральной автомобильной дороге г. Сочи и мероприятия по его стабилизации / А.Н. Богомолов, С.И. Маций, С.Ю. Калашников [и др.] // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2012. — № 29(48). — С. 6–14. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20280898> — EDN: [RBUZHJ](https://elibrary.ru/item.asp?id=20280898) (дата обращения: 05.10.2025).
14. Сравнение расчетных методов «Мора — Кулона» и «упрочняющего грунта» при моделировании подпорных стен // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении: Материалы международной научно-технической конференции, Новочеркасск, 29–31 мая 2018 года. — Новочеркасск: ООО "Лик", 2018. — С. 382–390. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35602780> — EDN: [OZOGEL](https://elibrary.ru/item.asp?id=35602780) (дата обращения: 05.10.2025).
15. Дегтярев, Г.В. Математический анализ влияния влажности грунтового массива на динамику изменений горизонтальных перемещений гребня оползня / Г.В. Дегтярев, Д.В. Лейер, О.Г. Дегтярева // Мелиорация и гидротехника. — 2025. — Т. 15, № 3. — С. 242–261. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=83021554> — DOI: [10.31774/2712-9357-2025-15-3-242-261](https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-3-242-261) — EDN: [DQFNVR](https://elibrary.ru/item.asp?id=83021554) (дата обращения: 05.10.2025).
16. Rajabova N., Sherimbetov V. The influence of TDS levels in groundwater and village water supply on human health / N. Rajabova, V. Sherimbetov // 08–09 ноября 2024 года. — 2024. — С. 769–773. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=75194734> — EDN: [LKXGKX](https://elibrary.ru/item.asp?id=75194734) (дата обращения: 05.10.2025).
17. Chang D.S., Zhang L.M. Extended internal stability criteria for soils under seepage / D.S. Chang, L.M. Zhang // Soils and Foundations. — 2013. — Т. 53, № 4. — С. 569–583. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038080613000747> — DOI: [10.1016/j.sandf.2013.06.010](https://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.06.010) (дата обращения: 05.10.2025).
18. Feng D., Zhang H., Zhao C., et al. Study on Numerical Simulation of Arch Mechanism of Bridge Pile Foundation / D. Feng, H. Zhang, C. Zhao [et al.] // Buildings. — 2024. — Т. 14, № 1. — С. 146. — URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/1/146> — DOI: [10.3390/buildings14010146](https://doi.org/10.3390/buildings14010146) (дата обращения: 05.10.2025).
19. Дегтярев, В.Г. Численное моделирование и цифровой математический анализ при исследовании сложных систем / В.Г. Дегтярев, Г.В. Дегтярев, О.Г. Дегтярева // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. — 2023. — № 3(71). — С. 540–553. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=55379481> — DOI: [10.32786/2071-9485-2023-03-53](https://doi.org/10.32786/2071-9485-2023-03-53) — EDN: [GXGHRA](https://elibrary.ru/item.asp?id=55379481) (дата обращения: 05.10.2025).
20. Bounds T.D., Muraleetharan K.K., Miller G.A. Lateral Movements of Bridge Embankments on Soft Soils: A Case Study Inspired Investigation / T.D. Bounds, K.K. Muraleetharan, G.A. Miller // Geotechnical and Geological Engineering. — 2024. — Т. 42. — С. 121–139. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10706-023-02559-6> — DOI: [10.1007/s10706-023-02559-6](https://doi.org/10.1007/s10706-023-02559-6) (дата обращения: 05.10.2025).
21. Tsang H.H. Analytical design models for geotechnical seismic isolation systems / H.H. Tsang // Bulletin of Earthquake Engineering. — 2023. — Т. 21, № 8. — С. 3881–3904. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=59735274> — DOI: [10.1007/s10518-022-01469-x](https://doi.org/10.1007/s10518-022-01469-x) — EDN: [AWKPXG](https://elibrary.ru/item.asp?id=59735274) (дата обращения: 05.10.2025).

22. Дегтярев, Г.В. Анализ влияния влажности оползневого массива на устойчивость склона / Г.В. Дегтярев, Д.В. Лейер, О.Г. Дегтярева // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. — 2025. — Т. 17, № 3. — С. 82–89. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=85839226> — DOI: [10.36508/RSATU.2025.61.17.011](https://doi.org/10.36508/RSATU.2025.61.17.011) — EDN: [ISEBMZ](https://www.edn.ru/isebmz) (дата обращения: 05.10.2025).
23. Finite-element simulation of possible natural disasters on landfall dams with changes in climate and seismic conditions taken into account / M.A. Bandurin, V.A. Volosukhin, A.V. Mikheev [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — Т. 1015. — Art. 032011. — С. 1–6. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35489838> — DOI: [10.1088/1742-6596/1015/3/032011](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/3/032011) — EDN: [XXHUCD](https://www.edn.ru/xxhucd) (дата обращения: 05.10.2025).
24. Малахов, Ю.И. Оценка влияния уровня грунтовых вод на напряженно-деформированное состояние фундаментов на слабых водонасыщенных основаниях / Ю.И. Малахов, В.В. Карелин // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2020. — № 5. — С. 10–16. — URL: <https://ofmg.ru/archive/2020/5/ofmg-2020-5.pdf> (дата обращения: 11.05.2025).
25. Innovative solutions of geotechnical seismic isolation with application of ground rubber for protection of architectural monuments / S. Niyetbay, Y. Bessimbayev, I. Tashmukhanbetova [et al.] // Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева. Серия: Технические науки и технологии. — 2025. — № 2(151). — С. 262–280. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82578921> — DOI: [10.32523/2616-7263-2025-151-2-262-280](https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-151-2-262-280) — EDN: [XZEKAD](https://www.edn.ru/xzekad) (дата обращения: 05.10.2025).
26. Сидаравичуте, У.Р. Экзогенные геологические процессы / У.Р. Сидаравичуте, В.С. Маций // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. — 2024. — № 1(92). — С. 199–212. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65650544> — EDN: [WCRAIN](https://www.edn.ru/wcrain) (дата обращения: 05.10.2025).

Leyer Daria Valeryevna

Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilina, Krasnodar, Russia
E-mail: dasha_leyer@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9893-030X>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=794169
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57219278136>

Chernyavsky Denis Alekseevich

Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilina, Krasnodar, Russia
E-mail: asp_projekt93@mail.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=919374

Nikolaychuk Alexander Vitalievich

Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilina, Krasnodar, Russia
E-mail: geomor@rambler.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6401-0679>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=588433

Zhikhareva Ksenia Alekseevna

Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilina, Krasnodar, Russia
E-mail: ksyushazhixareva0409@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1006-3796>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1328388

Numerical analysis of the effect of water level in an irrigation canal on the stress-strain state of a soil mass: case study of bridge construction in Krasnodar Krai

Abstract. This article presents a study aimed at solving the problem of constructing bridges on soft soils under conditions of variable groundwater levels (GWL) and seismic impacts. The study addresses questions about the quantitative impact of GWL fluctuations on the stress-strain state of the structure and the effectiveness of the proposed geotechnical solutions. A comprehensive analysis was performed using finite element numerical modeling in the Plaxis 2D software package. The study was conducted using a bridge crossing in the village of Troitskaya in Krasnodar Krai, taking into account two groundwater levels and a seismic impact with an intensity of 8. It was found that raising the groundwater level leads to an increase in bending moments in the central zone of the pipe by 4,6–5,6 % and a decrease in the peripheral zone by 7,6–8,0 %. Stresses under the pipe in the central zone decrease by 13,6–20,9 %, while at the edge of the pipe they increase by 4,6–5,6 %. The developed geotechnical solutions, including replacing soft soil with rubble stone, demonstrated high efficiency: maximum stresses do not exceed 10 % of the standard bearing capacity of the foundation. A key result is the established multidirectional influence of the groundwater level: water saturation of the central part of the foundation leads to unloading of the structure (reduction of moments and stresses), while in the perimeter zones an increase in contact stresses is recorded, which requires mandatory consideration in the design. The identified quantitative patterns make it possible to predict changes in the stress-strain state of the foundation and structure during seasonal fluctuations in groundwater levels, as well as to justify the need to strengthen weak soils by replacing them with high-modulus materials.

Keywords: weak soils; stress-strain state; finite element method; groundwater level; geotechnical solutions; numerical modeling; bearing capacity