

УДК 624.154.5

DOI: 10.17213/mgvgif/2026-5-33-45

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ СООРУЖЕНИЙ ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАЩИТЫ В ОСОБО СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

М. Б. Мариничев, И. Г. Ткачев, В. О. Бушуева

Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина,
г. Краснодар, Россия

Аннотация. Строительство многоэтажных зданий на участках с переменным рельефом приобретает все большую актуальность в условиях дефицита свободных равнинных территорий и перехода к освоению сложных склоновых площадок. Особенно характерно данное решение для прибрежных и урбанизированных регионов, где дальнейшее развитие застройки возможно преимущественно за счет территорий с выраженными перепадами отметок и неблагоприятными инженерно-геологическими условиями. В таких условиях проектирование зданий и сооружений сопровождается повышенными геотехническими рисками, связанными с развитием оползневых процессов, перераспределением напряжений в грунтовом массиве, изменением гидрогеологического режима и воздействием сейсмических нагрузок. Актуальность темы определяется необходимостью разработки комплексных научно обоснованных подходов к выбору и расчету конструктивных решений фундаментов и сооружений инженерной защиты, обеспечивающих устойчивость склоновых территорий и надежную работу зданий в течение всего жизненного цикла. При этом особое значение приобретает учет стадийности строительства, взаимодействия системы «грунтовый массив – фундамент – надземные конструкции», а также влияния временных и постоянных нагрузок, включая пригруз от застройки и динамические воздействия.

Ключевые слова: инженерная защита территории, подпорные сооружения, свайно-анкерная система, террасированный склон, геотехническое моделирование, сейсмическое воздействие, разжижение грунтов, устойчивость склонов

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF HIGHLY EFFICIENT ENGINEERING PROTECTION STRUCTURES IN PARTICULARLY COMPLEX ENGINEERING-GEOLOGICAL CONDITIONS

M. B. Marinichev, I. G. Tkachev, V. O. Bushueva

I. T. Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

Annotation. The construction of multi-storey buildings on areas with variable topography is becoming increasingly important in the context of a shortage of available flat areas and the transition to the development of complex slope sites. This solution is particularly relevant for coastal and urbanized regions, where further development of construction is possible primarily through the use of areas with significant elevation differences and unfavorable engineering and geological conditions. In such conditions, the design of buildings and structures is accompanied by increased geotechnical risks associated with the development of landslide processes, the redistribution of stresses in the soil mass, changes in the hydrogeological regime, and the impact of seismic loads. The relevance of the topic is determined by the need to develop comprehensive, scientifically based approaches to the selection and calculation of structural

solutions for foundations and engineering protection structures that ensure the stability of slope areas and the reliable operation of buildings throughout their entire life cycle. In this context, it is crucial to consider the stages of construction, the interaction between the soil mass, foundations, and above-ground structures, as well as the influence of temporary and permanent loads, including the weight of buildings and dynamic effects.

Keywords: *engineering protection of the territory, retaining structures, pile-anchor system, terraced slope, geotechnical modeling, seismic impact, soil liquefaction, and slope stability*

Введение

Возведение многоэтажных зданий на участках с переменным рельефом сопряжено с необходимостью внедрения инженерных решений, обусловленных сложным характером геоморфологических и инженерно-геологических условий. Наличие значительных перепадов отметок рельефа, крутых склонов, потенциально оползне- и сейсмоопасных зон, а также ограниченность строительного пространства предопределяют повышенные требования к проектированию фундаментов и систем инженерной защиты. Указанные факторы оказывают решающее влияние на выбор конструктивных схем, технологию производства работ и состав защитных мероприятий, направленных на обеспечение устойчивости как отдельных сооружений, так и склонового массива в целом.

Вопросы проектирования фундаментов и сооружений инженерной защиты в сложных инженерно-геологических условиях широко освещены в отечественной и зарубежной литературе. Рассмотрены особенности работы оснований и свайных конструкций, а также вопросы обеспечения надежности фундаментов в сложных грунтовых условиях [1–8]. В исследованиях уделено внимание устойчивости склонов, работе свайно-анкерных систем и методам закрепления грунтов [13–15]. Вопросы механики грунтов, расчета оснований и фундаментов, а также взаимодействия свайных конструкций с грунтовым массивом подробно рассмотрены в фундаментальных и прикладных работах [9–12]. В частности, в исследованиях приведены методы оценки напряженно-деформированного состояния оснований, несущей способности свай и особенностей их работы при различных схемах нагружения.

Вместе с тем анализ опубликованных работ показывает, что вопросы пространственной работы удерживающих систем в условиях глубокой поэтапной выемки, с учетом стадийности строительства, изменения гидрогеологического режима и сейсмического воздействия, остаются недостаточно изученными.

Целью настоящей работы является обоснование внедрения комплекса инновационных технических решений сооружений инженерной защиты территории, обеспечивающих требуемую устойчивость склона и зданий на его террасах, а также допустимые перемещения при воздействии опасных природных и техногенных факторов в особо сложных грунтовых условиях строительства инфраструктурного гостиничного комплекса.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- анализ условий строительства и обоснование выбранной схемы освоения территории с учетом стесненности площадки строительства и стадийности производства работ;
- разработка конструктивного решения системы инженерной защиты;
- определение расчетных характеристик грунтов с учетом динамических воздействий;
- выполнение трехмерного геотехнического моделирования;
- оценка влияния процесса строительства и эксплуатации разработанных сооружений инженерной защиты на окружающую застройку;
- оценка напряженно-деформированного состояния системы и проверка ее работоспособности в неблагоприятных сочетаниях нагрузок;
- разработка специальной программы испытаний свай и анкеров в составе сооружений инженерной защиты;
- разработка программы научно-технического сопровождения и его осуществление.

Методы исследований

В инженерной практике освоения склоновых территорий задачи обеспечения устойчивости склона и размещения застройки решаются с применением различных конструктивных схем, отличающихся степенью вмешательства в природный рельеф и характером работы удерживающих конструкций. Наиболее распространенные варианты таких решений представлены на рис. 1.

Первый заключается в адаптации фундаментов к естественному профилю склона (рис. 1, *а*), что позволяет минимизировать объемы земляных работ и снизить степень вмешательства в природный рельеф, обеспечивая более рациональное распределение нагрузок и уменьшение техногенного воздействия на грунтовый массив. В нормативных и научных источниках отмечается, что изменение конфигурации откоса, включая его выполаживание и устройство берм, является эффективным средством повышения устойчивости склонов и снижения вероятности развития оползневых процессов [16].

Альтернативным подходом является применение подпорных сооружений, обеспечивающих формирование искусственных террас и возможность размещения зданий на заданных проектных отметках (рис. 1, *б*). Данный подход характеризуется значительной материало- и трудоемкостью, связанной с необходимостью разработки глубоких выемок и устройством протяженных удерживающих конструкций. В таких условиях удерживающие сооружения воспринимают давление грунта и дополнительные нагрузки от застройки, при этом ключевую роль играет стадийность работ и последовательное включение элементов системы.

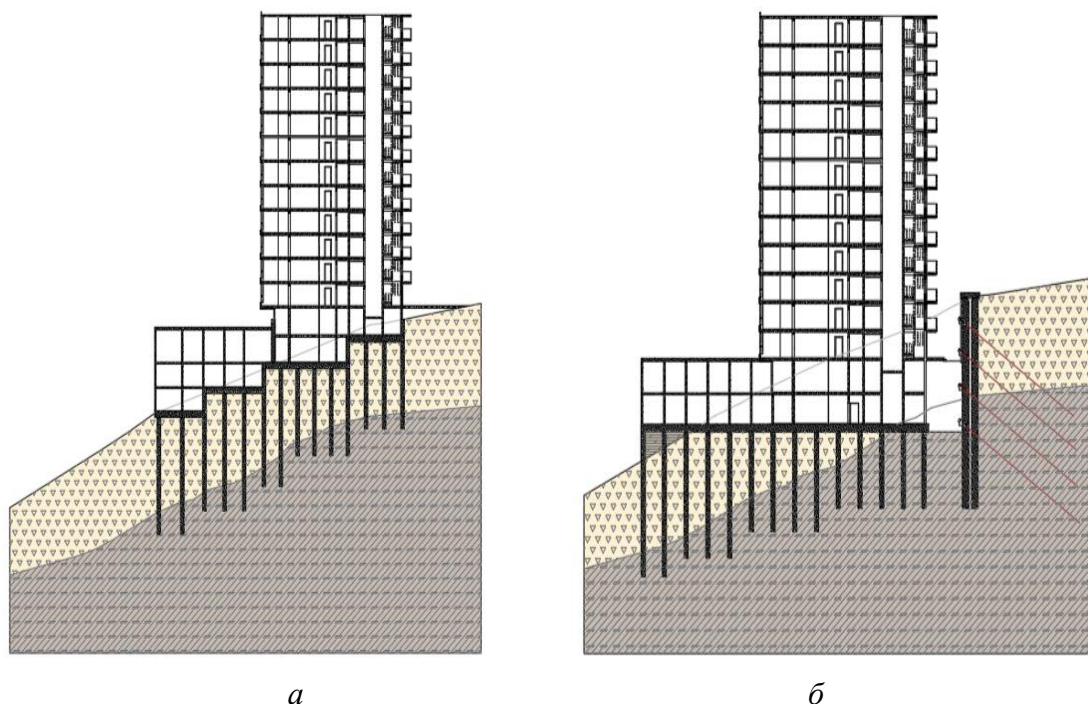


Рис. 1. Основные схемы освоения склоновых территорий:

- а* – адаптация застройки к естественному рельефу (террасирование);
б – схема с глубокой выемкой и устройством удерживающих конструкций

Независимо от выбранного подхода, проектирование и строительство на участках с выраженным рельефом требует учета не только геометрии склона, но и особенностей инженерно-геологических условий, гидрогеологического режима и возможного развития опасных процессов.

Анализ практики показывает, что выбор конкретной схемы в ряде случаев также может определять архитектурно-планировочные ограничения, при которых применение террасированной схемы оказывается невозможным без изменения проектных решений. К таким случаям относится рассматриваемый объект строительства на Черноморском побережье Краснодарского края. Архитектурное решение данного объекта формируется как система взаимосвязанных уровней, размещенных на террасах со значительным перепадом отметок, достигающих 20 м.

Особенность рассматриваемого объекта заключается в том, что сооружения инженерной защиты должны обеспечивать устойчивость территории не только в строительный период, при выполнении глубокой поэтапной выемки грунта для формирования террас с перепадами до 20 м (рис. 2), но и в течение всего периода эксплуатации возводимых зданий. Таким образом, проектируемая система воспринимает не только давление грунтового массива, но и дополнительное воздействие от расположенных на верхних террасах зданий, дорог, инженерного оснащения, благоустройства и других элементов планировочной инфраструктуры.

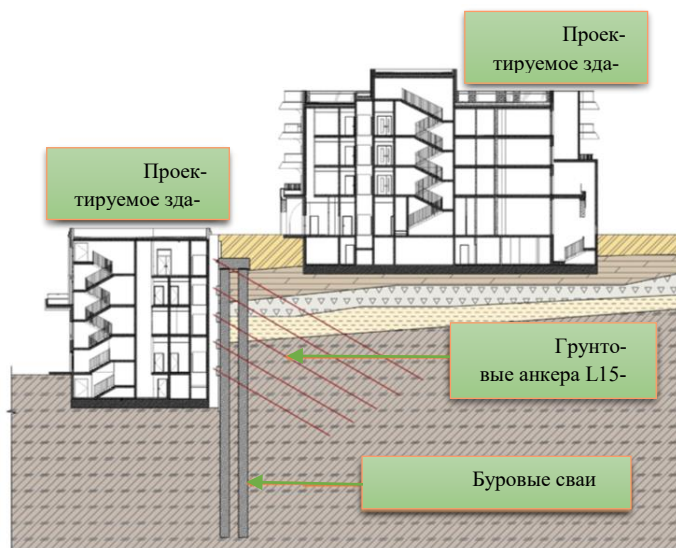


Рис. 2. Совмещение инженерно-геологического разреза с контуром зданий и проектируемым сооружением инженерной защиты

Для рассматриваемой площадки характерен комплекс опасных природных и техногенных процессов, которые оказывают непосредственное влияние на устойчивость территории и работу удерживающих сооружений. Район строительства отличается высокой расчетной сейсмичностью, что требует учета не только инерционных нагрузок, но и возможного изменения состояния водонасыщенных грунтов в процессе динамического воздействия. Это означает, что система инженерной защиты должна быть не только устойчивой, но и адаптированной к изменяющемуся состоянию массива в ходе строительства. Важнейшим требованием становится управляемость осадками, возможность последовательного включения элементов в работу и подтверждение расчетных предпосылок натурными наблюдениями. Для достижения указанной цели были приняты решения, основанные на применении пространственно работающей свайно-анкерной системы, усиленной элементами жесткости (рис. 3) и дополненной мероприятиями по водоотведению, мониторингу и научно-техническому сопровождению. Несущим каркасом этой системы служат сваи, объединенные монолитными ростверками, а по мере развития выемки в работу последовательно включаются ярусы грунтовых анкеров. Такая схема позволяет не только воспринимать расчетные нагрузки, но и ограничивать деформации в условиях близкого расположения проектируемых зданий и стесненной полосы размещения удерживающего сооружения.

Общая протяженность сооружений инженерной защиты составляет порядка 350 м. По длине сооружение разделено на отдельные секции, отличающиеся высотой удержания, инженерно-геологическими условиями, гидрогеологическим режимом, величиной нагрузки от расположенных выше объектов и технологической последовательностью возведения.

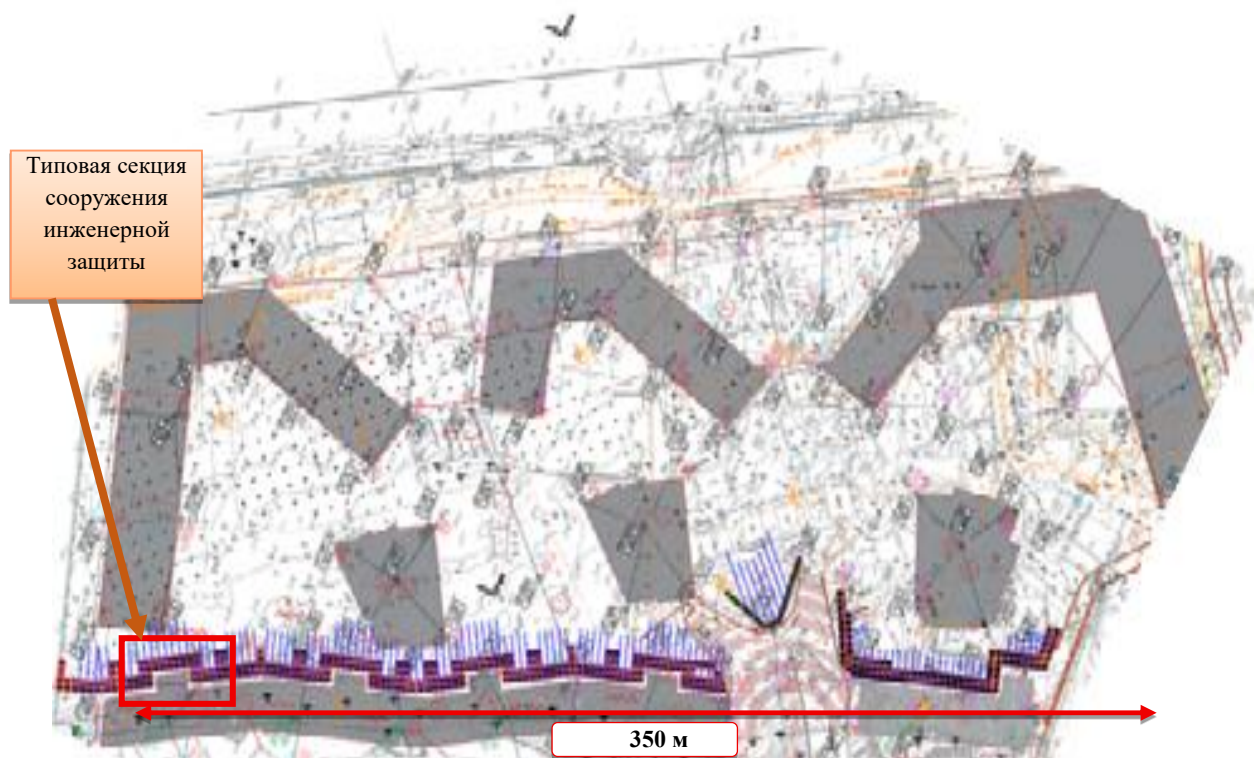


Рис. 3. Схема расположения сооружений инженерной защиты территории с выделением ее конструктивных элементов

Для каждой секции назначаются индивидуальные параметры свайной части, анкеров, уровней их размещения, длины, шага и усилий натяжения. Конструктивная схема типовой секции сооружения приведена на рис. 4.

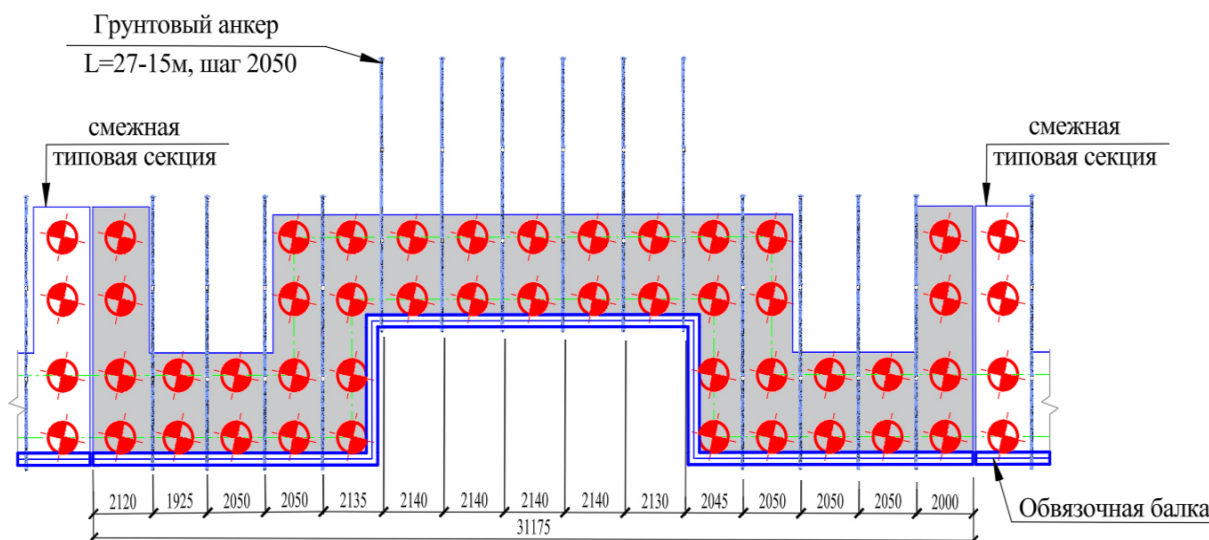


Рис. 4. Расчетно обоснованная форма типовой секции сооружения инженерной защиты, обладающая повышенной пространственной жесткостью (сваи диаметром 1020 мм длиной 30 м)

Грунтовый массив места строительства характеризуется выраженной неоднородностью, чередованием дисперсных грунтов различной плотности, влажности, пластичности, деформативности и фильтрационных свойств, а также наличием более прочных горизонтов (табл. 1).

Таблица 1. Расчетные параметры грунтов для модели Hardening soil

№ ИГЭ	Наименование грунта	HARDENING SOIL							
		Верифицированные данные							
		E_{50}^{ref} , МПа	E_{oed}^{ref} , МПа	c , кПа	φ , °	ψ , °	K_0^{nc}	R_f	OCR
1	Суглинок тяжелый	23	19	33	19	-0,736	0,573	0,799	2,311
2	Глина легкая твердой консистенции	11	8	26	5	1,6833	0,4214	0,83	1,581
3	Глина легкая песчанистая	9	6	38	15	1,9563	0,4039	0,808	1,357
4	Суглинок тяжелый	21	18	17	17	-1,378	0,5035	0,714	2,373
5	Супесь песчанистая	7	3	2	15	0,8969	0,4402	0,939	1,267
6	Супесь пластичная	17	13	40	12	-1,405	0,4802	0,701	2,624
7	Суглинок легкий	23	18	28	17	-1,209	0,4863	0,81	2,814
8	Глина аргиллитоподобная	19	15	21	11	0,1031	0,5393	0,742	1,821

Важным фактором является переменный гидрогеологический режим, проявляющийся в изменчивости уровней подземных вод, возможности локального переувлажнения, росте порового давления и перераспределении фильтрационных потоков в процессе разработки выемок и устройства дренажей.

Дополнительную сложность создает высокая расчетная сейсмичность района строительства, в связи с этим были проведены исследования:

- **выполнена оценка динамического разжижения водонасыщенных грунтов по трем критериям**, принятым для интерпретации результатов циклических трёхосных испытаний: а) по деформационному критерию разжижения (достижение 5 % осевой деформации при циклическом нагружении как признак перехода грунта в состояние циклического разуплотнения/разжижения); б) оценка по коэффициенту порового давления β , при $\beta \leq 0,6$ сопротивление разжижению считается обеспеченным; в) по критерию накопления деформаций (при выполнении условия $\varepsilon_{30} < \varepsilon_{29}$ сопротивление разжижению считается обеспеченным, что указывает на отсутствие прогрессирующего нарастания деформаций при последовательных уровнях циклического воздействия);

- **установлены динамические характеристики грунтов**, необходимые для расчетов: изменение модулей при циклическом нагружении, параметры накопления деформаций, показатели роста порового давления и перехода в предельные состояния.

Полученные результаты использованы как исходные данные для формирования сейсмических расчетных сочетаний и калибровки трехмерной модели системы «склон – инфраструктурная застройка – инженерная защита», что обеспечило согласованность расчетной схемы с фактическими свойствами грунтов основания и повысило достоверность прогноза НДС инженерной защиты.

Для оценки работы сооружений инженерной защиты была разработана объемная геотехническая модель застройки (рис. 5).

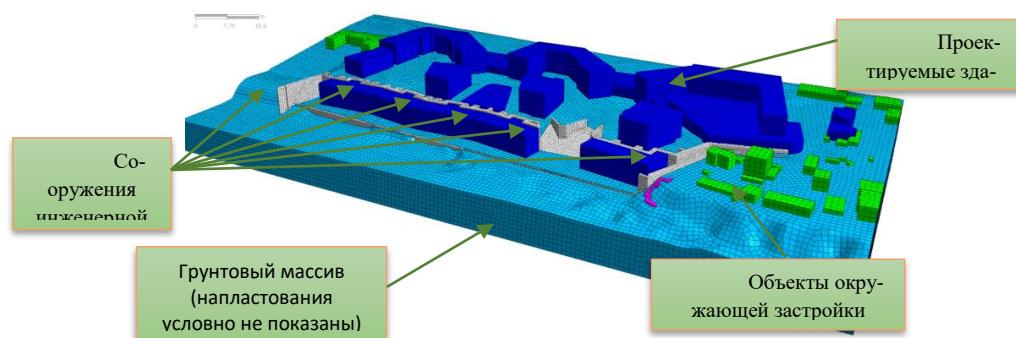


Рис. 5. Объемная геотехническая модель застройки в Midas FEA NX

Расчеты выполнялись для типовых и наиболее неблагоприятных участков с учетом стадийности строительства, последовательного устройства свай, ростверков, анкеров, откопки грунта, обратной засыпки, приложения нагрузок от дорог и здания, а также сейсмического воздействия. Для типовой секции была принята двурядная свайно-анкерное удерживающее сооружение с максимальным перепадом порядка 20 м. Предусматривается устройство свай диаметром 1000 мм длиной 30 м с шагом от 2,0 до 2,5 м. По высоте сооружение раскрепляется пятью ярусами грунтовых анкеров различной длины, которые поэтапно вводятся в работу по мере разработки выемки (рис. 6).

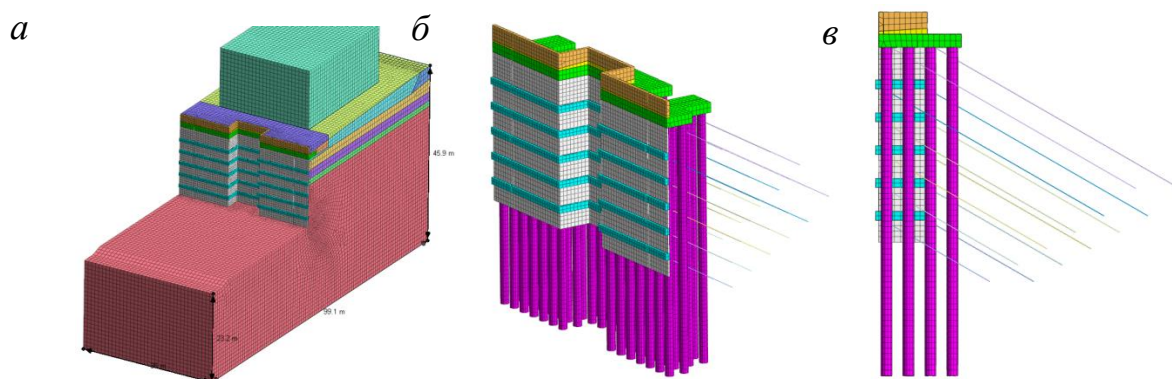


Рис. 6. Типовая секция расчетной модели:

- а) габариты типовой секции расчетной модели;
- б) изометрический вид типовой секции сооружения инженерной защиты;
- в) вид с торца на сооружение типовой секции инженерной защиты

Результаты исследований

В расчетах рассматривались несколько неблагоприятных сценариев со снижением характеристик грунтового массива в результате сейсмического воздействия: типовые грунтовые условия с учетом здания на верхней террасе, аналогичные условия без учета пригрузки от верхнего здания (рис. 7, 8). Это позволило оценить чувствительность системы к изменению внешних факторов и подтвердить достаточность принятой конструктивной схемы.

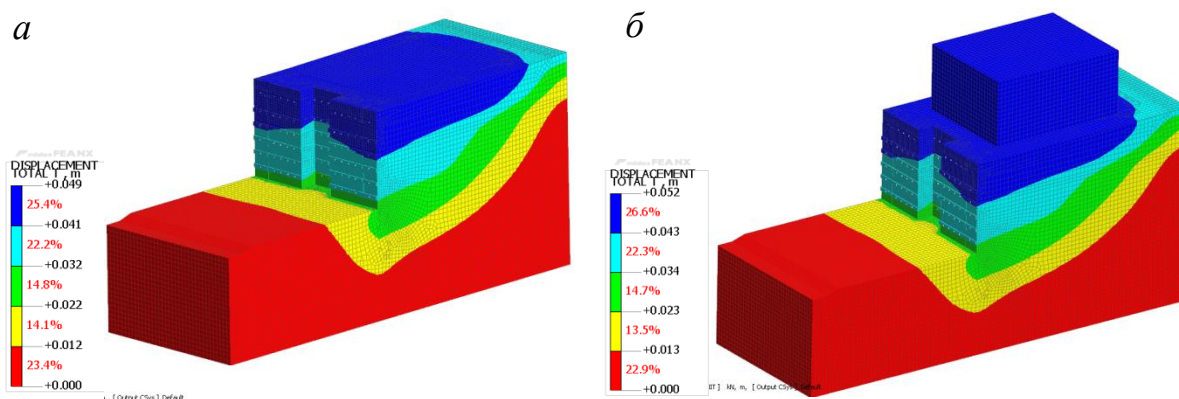


Рис. 7. Результаты расчета перемещений сооружения инженерной защиты при сейсмическом воздействии:

- а) без учета строительства здания на верхней террасе;
б) с учетом строительства здания на верхней террасе

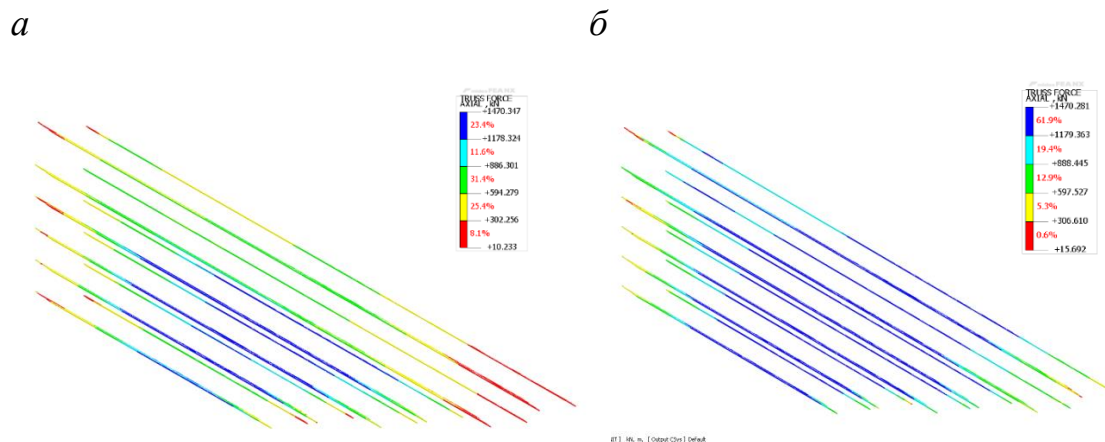


Рис. 8. Результаты расчета усилий в грунтовых анкерах сооружения инженерной защиты:

- а) на стадии завершения строительства зданий на верхней террасе;
б) в результате приложения нагрузок от сейсмического воздействия после завершения строительства

Этапность строительства включает генерацию начальных напряжений в грунтовом массиве, разработку котлована под сваи, устройство свай и ростверка, бурение и монтаж анкеров первого яруса, последовательную откопку до следующих уровней и включение в работу последующих ярусов, устройство прижимных стен, обратную засыпку, приложение нагрузки от

транспортной и строительной инфраструктуры, возведение здания с верховой стороны и учет сейсмического воздействия.

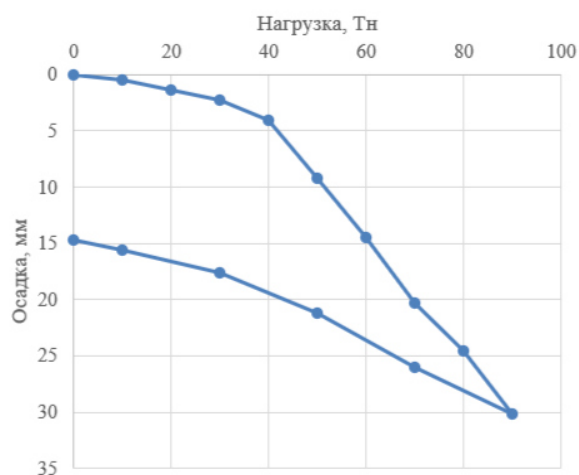
Результаты моделирования показали, что пространственная свайно-анкерная система с усиливающими ребрами жесткости обеспечивает требуемые показатели по устойчивости, прочности и деформативности. Применение многоярусного анкерного крепления и пространственной конфигурации конструкции позволило снизить перемещения до допустимого уровня и обеспечить работоспособность системы при неблагоприятных сочетаниях нагрузок и воздействий.

На объекте организовано научно-техническое сопровождение (НТСС), выполняемое коллективом авторов с привлечением профильных специалистов, как обязательный элемент управления геотехническими рисками в условиях высокой сейсмичности, переменного водного режима и многостадийной выемки.

Для подтверждения расчетных предпосылок и получения фактических зависимостей «нагрузка–перемещение» выполнены натурные испытания горизонтальной нагрузкой, приближенные к реальной работе удерживающей системы. Цикличность рассматривалась как инструмент выявления накопления остаточных деформаций и изменения жесткости при повторных воздействиях. Анализ выполнялся по петлям гистерезиса на диаграммах «нагрузка–перемещение» (рис. 9) и по кривым «перемещение–время» на выдержках, что позволило корректно разделить упругую составляющую от реологической и пластической.



а



б

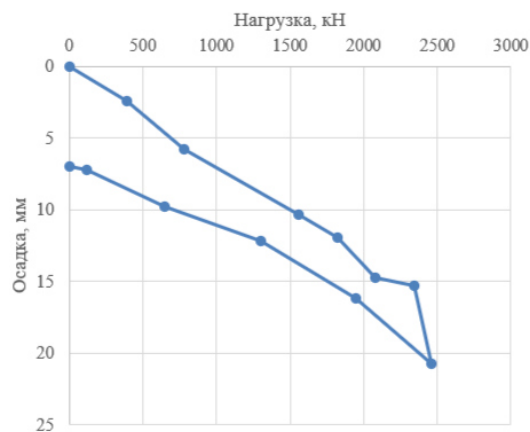
Рис. 9. Натурные испытания свай горизонтальной нагрузкой:

- а) испытательная установка с гидродомкратом, упорной системой и измерительной базой на площадке сооружений инженерной защиты;
- б) график зависимости «горизонтальная нагрузка–перемещение оголовка» по результатам натурального испытания сваи горизонтальной нагрузкой (цикл нагрузка-разгрузка)

Также в рамках НТСС разработана и реализована программа испытаний анкеров выдерживающими нагрузками, предназначенная для подтверждения требуемой надежности анкерного крепления и для снижения геотехнических рисков. Испытания включали проверку соответствия фактических характеристик анкеров и технологии их устройства требованиям проектной и нормативной документации, а также получение фактических зависимостей «нагрузка–перемещение» (рис. 10), параметров ползучести и оценок несущей способности по грунту.



а



б

Рис. 10. Натурные испытания анкера на выдергивание:

- а) испытательная установка на площадке сооружений инженерной защиты;
б) график зависимость «нагрузка–перемещение анкера» по результатам
натурного испытания анкера вырывающей нагрузкой

Выводы

В результате проведенных исследований проведена разработка и внедрение инновационных технических решений для сооружений инженерной защиты территорий от опасных природных и техногенных процессов в особо сложных грунтовых условиях.

Принятое решение реализовано как система инженерной защиты с высокой несущей и распределительной способностью, в которой требуемая пространственная жесткость и надежность обеспечиваются сочетанием взаимодополняющих технических и технологических результатов: конструктивной формы удерживающего сооружения в сочетании многоярусной пространственной системой грунтовых анкеров различного сечения и длины, расположенных под заданными углами в плане и по глубине для достижения наибольшей эффективности реализуемого решения. К основным результатам относятся:

- расчетно обоснована форма сооружений инженерной защиты с устройством усиливающих ребер для повышения ее общей пространственной жесткости;

- проведены исследования по уточнению инженерно-геологических и гидрогеологические условий площадки строительства, включая оценку возможности разжижения водонасыщенных грунтов и изменение при этом их свойств;
- обоснована этапность строительства сооружений инженерной защиты и схем их работы как постоянных удерживающих конструкций;
- проведена оценка влияния процесса строительства и эксплуатации разработанных сооружений инженерной защиты на окружающую застройку;
- разработана и реализована специальная программа испытаний свай в составе сооружений инженерной защиты на горизонтальные нагрузки и грунтовых анкеров на выдергивание;
- разработана программа научно-технического сопровождения строительства и обеспечено его осуществление.

Практическая значимость результатов подтверждена внедрением разработанных решений на строительной площадке: сформирована система постоянных сооружений инженерной защиты, обеспечивающая технологическую реализуемость многостадийного строительства в стесненной полосе размещения, ограничение деформаций и снижение риска неблагоприятных проявлений как в период производства работ, так и на стадии эксплуатации объектов.

Список источников

1. Полищук, А. И. Основания и фундаменты, подземные сооружения / А. И. Полищук, М. Б. Мариничев. – 3-е издание, переработанное и дополненное. – Москва: Издательство АСВ, 2023. – 558 с. – ISBN 978-5-4323-0372-1.
2. Мариничев, М. Б. Фундаменты многоэтажных и высотных зданий в особых условиях Юга России: дис. ... докт. техн. наук: 2.1.2 / М. Б. Мариничев; КубГАУ (Краснодар). – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2023. – 355 с.
3. Патент № 2256748 С2 Российская Федерация, МПК E02D 27/12, E02D 27/16. Свайный фундамент и способ возведения свайного фундамента: № 2003118775/03: заявл. 23.06.2003: опубл. 20.07.2005 / К. Ш. Шадунц, М. Б. Мариничев; заявитель Кубанский государственный аграрный университет.
4. Патент № 2303106 С1 Российская Федерация, МПК E02D 27/01. Способ возведения плитного фундамента повышенной жесткости: № 2006105611/03: заявл. 22.02.2006: опубл. 20.07.2007 / К. Ш. Шадунц, М. Б. Мариничев, В. А. Демченко; заявитель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Кубанский государственный аграрный университет.
5. Патент № 2378454 С1 Российская Федерация, МПК E02D 27/14. Способ возведения свайно-плитного фундамента: № 2008133436/03: заявл. 14.08.2008: опубл. 10.01.2010 / К. Ш. Шадунц, М. Б. Мариничев; заявитель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Кубанский государственный аграрный университет.
6. Мариничев, М. Б. Оценка эффективности свайно-плитных фундаментов с промежуточной подушкой на примере высотных зданий в сейсмических районах Краснодарского края / М. Б. Мариничев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – № 2 (61). – С. 182-191.

7. Готман, А. Л. Сваи и свайные фундаменты. Избранные труды: монография / А. Л. Готман. – Уфа: ИДПО УГНТУ, 2015. – 384 с.
8. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / Под общ. ред. В. А. Ильичева и Р. А. Мангушева. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Изд-во АСВ, 2016. – 1040 с.
9. Мариничев, М. Б. Эффективные фундаментные конструкции в сложных грунтовых условиях / М. Б. Мариничев, К. Ш. Шадунц, А. Ю. Маршалка // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – № 2. – С. 34-36.
10. Тер-Мартirosян, З. Г. Механика грунтов / З. Г. Тер-Мартirosян. – М.: Издательство АСВ, 2005. – 488 с.
11. Далматов, Б. И. Механика грунтов, основания и фундаменты (включая специальный курс инженерной геологии) / Б. И. Далматов. – 4-е изд., стер. – М.: Изд-во «Лань», 2017. – 416 с.
12. Полищук, А. И. Анализ грунтовых условий строительства при проектировании фундаментов зданий: науч.-практ. пособие / А. И. Полищук. – М.: Изд-во АСВ, 2016. – 104с.
13. Маций, С. И. Свайно-анкерные противооползневые конструкции / С. И. Маций, А. К. Рябухин. – Краснодар: КубГАУ, 2017. – 189 с.
14. Duncan, J. M., Wright, S. G., Brandon, T. L. Soil Strength and Slope Stability. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2014. – 336 p.
15. Sari, U. C., Sholeh, M. N., Hermanto, I. The stability analysis study of conventional retaining walls variation design in vertical slope // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 930. – 012036.
16. СП 116.13330.2012 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений. – М.: Минрегион России, 2012.

© Мариничев М. Б., Ткачев И. Г., Бушуева В. О., 2026