

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

2021, №3, Том 8 / 2021, N 3, Vol. 8 <https://t-s.today/issue-3-2021.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/02SATS321.pdf>

DOI: 10.15862/02SATS321 (<https://doi.org/10.15862/02SATS321>)

Особенности проектирования опор трубопроводов на оползневых склонах

Лейер Д.В., Серый Д.Г., Любарский Н.Н.

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный
университет имени И.Т. Трубилина», Краснодар, Россия

Автор, ответственный за переписку: Лейер Дарья Валерьевна, e-mail: dasha_leyer@mail.ru

Аннотация. Строительство трубопроводов в сложных инженерно-геологических условиях требует тщательного анализа исходных данных, а также комплексного моделирования склона с использованием современных программных комплексов. В статье рассмотрены особенности строительства фундаментов отдельно стоящих опор линий электропередач и трубопроводов на оползневых склонах, сложенных глинистыми грунтами. Актуальные российские нормативные документы регламентируют надземную прокладку трубопроводов, что существенно усложняет процесс проектирования. Однако, надземная прокладка позволяет выполнять мониторинг за состоянием склона (появление бровок срыва), фундаментов (отклонение от проектного расположения), а также трубопровода (смещение оси трассы, состояние сварных швов). Своевременно обнаруженные отклонения позволяют избежать аварийной ситуации.

Автором рассмотрены возможные варианты конструктивных решений фундаментов опор, а также защитных сооружений на примере реального объекта Краснодарского края. Возведение трубопроводов в условиях активных оползневых

смещений, а также наличия сейсмических воздействий требует не только обеспечения экономической целесообразности строительства, но и безопасности производства работ. В процессе разработки оптимальных конструктивных решений выполнено компьютерное моделирование склона как в двухмерной, так и в трехмерной постановке на основе метода конечных элементов с использованием программ Plaxis 2D и Plaxis 3D. Рассмотренные расчетные ситуации позволили учесть наихудшие сочетания нагрузок, возможные при эксплуатации трубопровода. Согласно полученным результатам расчетов и комплексного исследования инженерно-геологических условий на площадке, а также особенностей организации строительства разработана блок-схема, позволяющая определить оптимальный вариант конструктивных решений защитных сооружений применительно к любому оползневому участку строительства.

Ключевые слова: трубопровод; оползень; моделирование; склон; обтекаемое сооружение; противооползневое сооружение; глинистый грунт; свайный фундамент; уровень грунтовых вод

Design peculiarities of pipeline support on landslide slopes

Darya V. Leyer, Dmitry G. Seryi, Nikolai N. Lubarsky

Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

Corresponding author: Darya V. Leyer, e-mail: dasha_leyer@mail.ru

Abstract. The pipeline construction in complex engineering-geological conditions requires a thorough initial data analysis, as well as complex slope modeling using modern software systems. The article discusses the features of the foundation construction for stand-alone supports for power lines and pipelines on landslide slopes composed of clay soils. Relevant Russian regulations documents administer above-ground pipelining, which significantly complicates the design process. However, above-ground pipelining allows monitoring the slope condition (formation road edge breakaway), foundations (deviation from the design location), as well as the pipeline (displacement of the route axis, the state of welds). Timely detected deviations allow avoiding an emergency situation.

The author considers possible options for constructive solutions for support foundations, as well as protective structures exemplified by a real Krasnodar Krai object. The pipeline construction in active landslide

displacements conditions, as well as the presence of seismic effects, requires not only ensuring the construction's economic feasibility, but also the work safety. In the developing process of optimal design solutions, slope computer modeling was executed both in two-dimensional and three-dimensional formulations based on the finite element method using the Plaxis 2D and Plaxis 3D programs. The considered design situations made it possible to take into account the worst load combinations possible during pipeline operation. According to the calculation results and a comprehensive engineering and geological conditions study at the site, as well as the construction organization peculiarities, a block diagram has been developed that makes it possible to determine the optimal design solutions for protective structures in relation to any landslide construction site.

Keywords: pipeline; landslide; modeling; slope; streamlined structure; anti-landslide structure; clay soil; pile foundation; groundwater level

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Строительство трубопроводов в сложных инженерно-геологических условиях требует тщательного анализа исходных данных, а также комплексного моделирования склона с использованием современных программных комплексов. В статье рассмотрены особенности строительства фундаментов отдельно стоящих опор ЛЭП (линий электропередач) и трубопроводов на оползневых склонах, сложенных глинистыми грунтами. Однако, проектирование газопроводов на оползневых склонах для инженеров является сложной и нестандартной задачей, а в некоторых случаях и уникальной. Проблема заключается в редкой необходимости строительства в рассматриваемых условиях, а также в отсутствии подробных рекомендаций в научной и нормативной литературе. Обычно, при строительстве трубопроводов на оползневых склонах рекомендуется выполнять перетрассировку и изменять путь прокладки для обхода опасных участков. Однако, при прокладке трассы в горной местности обход оползневых участков часто составляет многие километры пути, что существенно увеличит стоимость строительства и сроки проектирования. Актуальные российские нормативные документы регламентируют надземную прокладку трубопроводов, что является необходимым для постоянного мониторинга за состоянием газопровода. При надземной прокладке появляется необходимость проектирования надежных фундаментов опор.

Автором рассмотрены возможные варианты конструктивных решений фундаментов опор, а также защитных сооружений на примере реального объекта Краснодарского края. Проектируемый трубопровод пересекает 89 оползневых участков. На каждом из этих участков уникальные инженерно-геологические условия. Основной целью автора является разработка алгоритма действий для инженеров, необходимых при выполнении проектных работ, а также создание эффективной конструкции фундаментов опор трубопроводов повышенной несущей способности. Возведение трубопроводов в условиях активных оползневых смещений, а также наличия сейсмических воздействий требует не только обеспечения экономической целесообразности строительства, но и безопасности производства работ. В процессе разработки оптимальных конструктивных решений выполнено компьютерное моделирование склона как в двухмерной, так и в трехмерной постановке с использованием программ Plaxis 2D и Plaxis 3D [1–3].

Обзор проблемы и актуальность выполненных исследований

Problem and the performed research relevance overview

Устройство газо- и нефтепроводов требует глубокого анализа исходных данных и разработки нескольких вариантов конструктивных решений. Наличие активных оползневых процессов, а также сейсмических воздействий усложняет задачу [4]. Повышенный уровень ответственности требует от проектировщика навыков работы в специализированных геотехнических программах. Прокладка линейных объектов в горной местности является сложной задачей как для проектировщиков, так и для строителей [5–10]. Необходимость обеспечения безопасности выполнения строительных работ, а также эксплуатации часто требуют возведения защитных или противооползневых сооружений¹.

Проблемам развития оползневых подвижек и обеспечения устойчивости склонов и откосов посвящены труды зарубежных и отечественных ученых: А.И. Билеуша, А.Н. Богомолова, Л.К. Гинзбурга, А.Л. Готмана, Н.М. Гольдштейна, Г.С. Золотарева, В.Д. Казарновского, Н.Н. Маслова, С.И. Мация, Г.Д. Недри, Г.П. Постоева, А.Л. Строма, Г.И. Тер-Степаняна, З.Г. Тер-Мартиросяна, В.Г. Федоровского, К.Ш. Шадунца, Г.М. Шахунянца, К. Виджиани, Т. Адаши, М. Кимуры, Т. Ито, Т. Мацуи, Р. Хеннеса и т. д. В их работах, в основном, представлены исследования мероприятий активной защиты от оползней, а также особенностей численного моделирования склона.

В актуальных нормативных источниках указано, что кроме активной защиты объектов от оползней (строительства противооползневых сооружений) могут быть применены и мероприятия пассивной защиты (возведение обтекаемых конструкций грунтом оползней). Однако, в настоящий момент механизм взаимодействия грунта оползней с конструкциями для локальной защиты обтекаемых опор изучен недостаточно. Кроме того, в нормативных источниках не представлена последовательность работ по проектированию и возведению обтекаемых сооружений. Для инженеров является существенной проблемой проектирование в таких условиях, так как необходимо учитывать как технологические особенности самого магистрального газопровода (температурное расширение, динамические нагрузки, прочность соединения сварных швов и т. д.), так и особенности геологического строения склона, а также фундаментной части всего объекта. Работа усложняется отсутствием четкой последовательности действий для

¹ СП 116.13330.2016 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения.

разработки проекта. В статье представлено численное сравнение различных вариантов конструктивных решений, а также разработанный автором алгоритм действий для проектирования и расчета фундаментной части опор газопроводов, которые необходимы для инженеров.

Таким образом целью проведенных исследований является анализ существующих методов инженерной защиты опор трубопроводов, разработка новых конструктивных решений фундаментов опор, располагаемых на оползневых склонах, а также внедрение проведенных исследований на реальном объекте Краснодарского края в Апшеронском районе.

Анализ исходных данных к исследованию

Study's initial data analysis

Проведенные исследования выполнены на участке проектирования магистрального газопровода на оползневом склоне. Рельеф склона выработан в юрских, меловых, палеогеновых и неогеновых породах осадочного комплекса, слагающего на Западном и Центральном Кавказе преимущественно зону южного макросклона. Подобная пластичная литологическая основа реагирует на латеральное сжатие образованием складчато-надвиговых дислокаций. Фактически среднегорный и низкогорный рельеф территории определяется взаимодействием разновеликих бескорневых чешуйчатых образований, развитых в верхних структурных этажах осадочных толщ. Его рельеф выработан в юрских, меловых, палеогеновых и неогеновых породах осадочного комплекса, слагающего на Западном и Центральном Кавказе преимущественно зону южного макросклона. Подобная пластичная литологическая основа реагирует на латеральное сжатие образованием складчато-надвиговых дислокаций. Фактически среднегорный и низкогорный рельеф территории определяется взаимодействием разновеликих бескорневых чешуйчатых образований, развитых в верхних структурных этажах осадочных толщ. Территория трассы нефтепровода характеризуется в целом эрозионно-тектоническим рельефом на неогеновых антиклинальных и брахиантиклинальных структурах с участками активного проявления эрозионно-аккумулятивных форм. Ландшафт бассейнов пересекаемых водотоков характеризуется как низкогорный. В верховьях устья водотоков имеют характер ущелий с крутыми, обрывистыми склонами, при выходе на равнину долины значительно расширяются, водоразделы сглаживаются. Долины ручьев, пересекаемых трассой, обычно V-образной формы. Формирование тальвега водотоков продолжается, благодаря деятельности поверхностных вод, имеющих сезонный характер, связанный с климатическими особенностями.



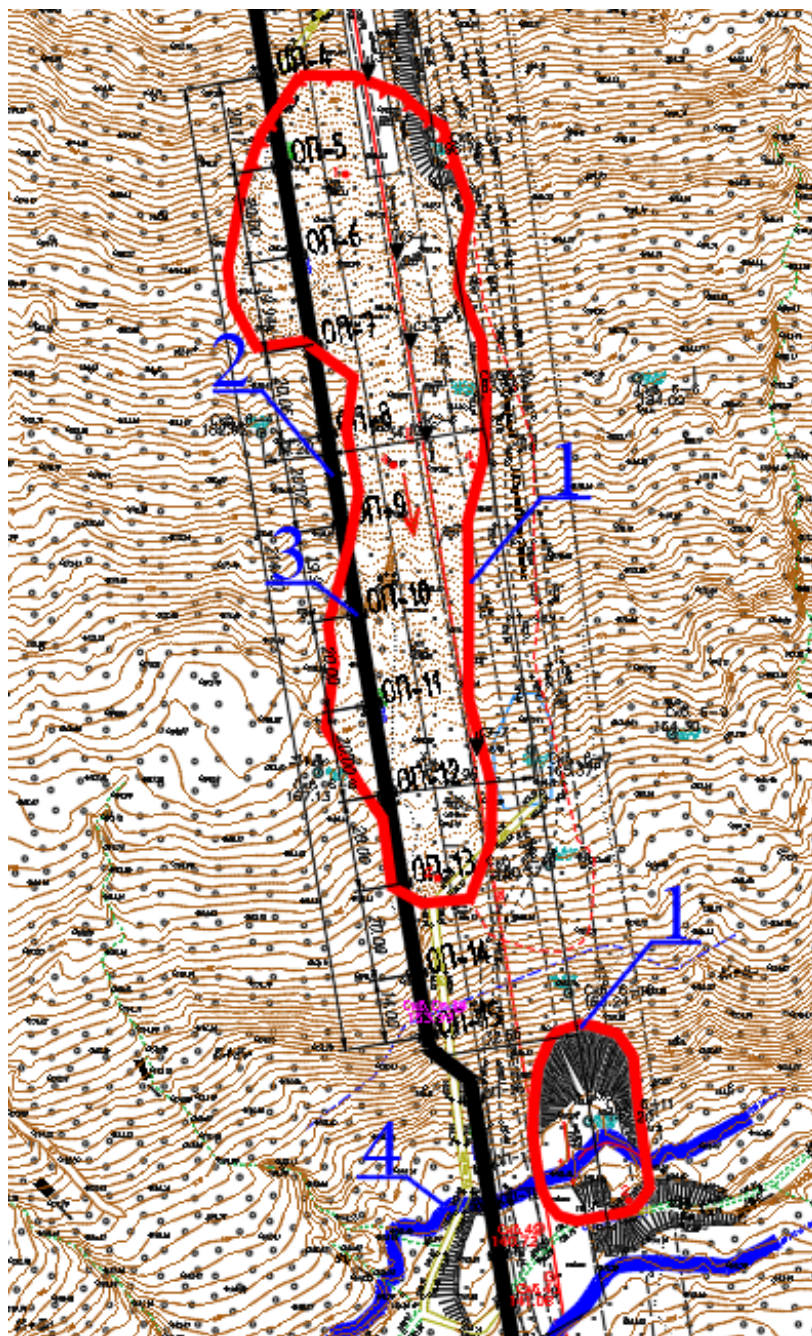
Рисунок 1. Общий вид склона с бровками срыва (разработано автором)
Figure 1. Slope general view with road edge breakaways (developed by the author)



Рисунок 2. Обнажение мергелей на стенке отрыва оползня в нижней части склона (разработано автором)
Figure 2. Calcareous clay scalping on the landslide breakaway wall in the lower slope part (developed by the author)

Перенос оси трассы, для обхода оползневого участка невозможен, так как весь склон является условно стабилизированным (устойчивость $K_{st} \approx 1$) (рис. 1–3). Для обеспечения безопасности трубопровода выполнено комплексное исследование научной и нормативной литературы. Детальные изыскания и геотехнический мониторинг участка

строительства являются основными исходными данными при проектировании технико-экономически эффективных сооружений [11–13].



Где: 1 — контур оползня; 2 — Ось проектируемого трубопровода; 3 — номер опоры под трубопроводом; 4 — береговой контур русла ручья

Where: 1 — landslide contour; 2 — Projected pipeline axis; 3 — support number under pipeline; 4 — stream course margin

Рисунок 3. План расположения трубопровода и опор относительно выделенного оползня (разработано автором)

Figure 3. Pipeline and supports layout relative to the identified landslide (developed by the author)

В стратиграфическом строении исследуемой территории принимают участие комплексы ниже-среднеюрских отложений Чубинской свиты, свиты горы Индюк и Пшишской свиты, комплексы верхнеюрских отложений Пихтарской свиты; комплексы ниже- и среднемеловых отложений Мачмаловской, Чаталовской и Кобзинской объединенных свит и свит Кокотх, Анаурской и Керкетской объединенных; комплексы палеоген-неогеновых отложений Хадыженской и Хадумской свит, перекрытые толщей четвертичных отложений.

Трасса расположена в пределах различных неотектонических структур. В общем случае, активные разломы служат границами между разнородными структурами с разным знаком движений. Такие границы в рассматриваемом районе приурочены к сочленению горного сооружения Северо-Западного Кавказа с прилегающими прогибами — Западно-Кубанским и Туапсинским (Черноморским) и внутригорных морфоструктур. Исходная (фоновая, I_f) сейсмичность по карте ОСР-2015 В — 8 баллов. Уточненная расчетная сейсмичность исследуемого участка по методу сейсмических жесткостей по карте ОСР-2015 В составила: $I = 8.21-9.09$ балла (по линейной части), $I = 8.50-9.00$ балла (по участкам тектонических нарушений) и $I = 8.04-9.18$ балла (по участкам опасных геологических процессов).

На участке получили распространение подземные воды:

- делювиальных отложений (dpQ_{IV}), представленных глинами твердыми. Подземные воды вскрыты в интервале глубин 1,0–2,8 м. Установившийся уровень зафиксирован в интервале глубин 0,0–2,1 м.
- элювиально-делювиальных отложений (edQ_{III-IV}), представленных глинами твердыми. Подземные воды вскрыты в интервале глубин 2,3–2,8 м. Установившийся уровень зафиксирован в интервале глубин 1,5–3,0 м.
- коренных отложений ($P_1 - N_1$), представленных глинами аргиллитоподобными. Подземные воды вскрыты в интервале глубин 8,0–2,5 м. Установившийся уровень зафиксирован в интервале глубин 2,1–11,7 м.

Подземные воды гидравлически связаны между собой, все водоносные горизонты, получившие распространение по трассе изысканий, влияют на условия строительства и эксплуатации. В пределах участков опасных геологических процессов развиты следующие типы экзогенных процессов: затопление; подтопление; заболачивание; эрозионные процессы; карстовые процессы; процессы селеобразования; обвально-осыпные процессы; оползневые процессы. Формирование и

развитие оползней является самым масштабным процессом на участке исследований и сопредельных территориях. Масштабность процесса — средняя².

Характеристика склона

Slope characteristic

Исследованный склон является выпукло-вогнутым, по расчленённости рельефа очень крупный, с крутизной склона 12–15° с южной экспозицией. Абсолютные отметки высот изменяются в пределах 142.95–237.89 м. Оползневой склон сложен следующими генетическими типами четвертичных отложений: почвенно-растительный слой; техногенные отложения, представленные суглинком легким пылеватым твердым; деляпсивными отложения, представленные глиной легкой твердой и полутвердой; элювиально-делювиальные отложения, представленные глиной легкой пылеватой полутвердой; коренные отложения. Склон является эрозионно-оползевым, при срезке растительности происходит выветривание грунтов и разрушение их структуры, что приводит к смещению поверхностных грунтов.

Уровень грунтовых вод в верхней части склона вскрыт в деляпсии глубинах 2,8–6,5 м, в центральной — на глубинах 6,5 м, в нижней — на глубинах от 1,0 до 8,0 м. Склон увлажнен до базиса эрозии — балки Обводная.

Характеристика оползня

Landslide characteristics

В плане оползень вытянут вдоль по склону. Ширина в голове оползня, в средней части, и в подошве около 25–50 м, а длина составляет около 185 м. Абсолютная отметка головы оползня 201 м, подошвы — около 157 м. Расстояние от головы оползня до ближайшего водораздела составляет около 157 м. Мощность оплывающих пород от 1,2 м в голове до 8,8 м в теле оползня. Базисом оползания является нижняя часть склона долины балки Обводная. Площадь оползня 6,1 тыс. м², объем сместившихся масс около 53,7 тыс. м³ (по максимальному значению мощности деляпсия). Объем сместившихся масс по среднему значению мощности деляпсия около 30,5 тыс. м³.

² СП 11-105-97 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II, 2001, табл. 4.3.

Тело оползня волнисто-бугристое, визуально отмечаются две бровки срыва. Первая бровка высотой 2,5–3 м, расположенная в голове оползня, явно выражена, слабо задернована. Вторая бровка расположена ниже по склону в 60 м от головы оползня вторичной генерации. Высота второй бровки 0,5 м. Крутизна поверхности оползня составляет около 15°. Генезис смещающихся пород представлен dpQ_{IV} , генезис подстилающих — edQ_{III-IV} и $P_1 - N_1$.

Тип оползания по механизму смещения — оползень сдвига, подтип — блоковый. Тело оползня задерновано травянистой растительностью. Болотная растительность зафиксирована в юго-восточной части контура оползня и представлена участком камыша. На момент обследования территории оползень находился в фазе активного смещения, на склоне есть существующие опоры линий электропередач (ВЛ). Из-за смещений грунтов оползня опоры существенно наклонены относительно вертикали (рис. 1).

На склоне у опоры ВЛ (воздушной линии) № 68 присутствует оползень вторичной генерации. Его бровка срыва расположена в 60 м от головной части основного оползня. Бровка срыва высотой 2,0 м (северная), 0,5 м (восточная) и 0,5 м (западная). Ширина оползня второй генерации составляет 15–20 м.

На склоне выявлена плоскостная и струйчатая эрозия. Склон пересекает эрозионный врез, создавший у опоры ВЛ № 69 условие подрезки участка склона с перепадом высот примерно 3,0 м. Хозяйственная деятельность представлена наличием линейных сооружений трасс МН (магистральный нефтепровод), коридора коммуникаций, опорами ВЛ № 66-72, из которых опоры ВЛ 70 и ВЛ 71 отклонены от вертикали.

При обследовании определены основные причины образования оползня: насыщение склона водой за счет концентрации сброса поверхностных вод с полки грунтовой дороги и формирования эрозионной промоины, а также срезка растительности. Противооползневые мероприятия на территории отсутствуют.

Обзор вариантов конструктивных решений защитных сооружений. Моделирование оползня

Review of constructive solutions options for protective structures. Landslide modeling

По данным инженерно-геологических изысканий было выявлено что на участке производства работ развиты опасные геологические и инженерно-геологические процессы: оползень, подъем уровня грунтовых вод и сейсмичность. Ось трубопровода находится на краю выделенного

оползня. Глубина выделенной поверхности скольжения достигает 3 м. Однако, при рассмотрении прогнозного состояния склона с учетом сейсмических воздействий и повышения уровня грунтовых вод глубина прогнозной поверхности скольжения значительно увеличивается. Подбор параметров конструкций опор трубопровода должна определяться исходя из наиболее опасной поверхности скольжения, выделенной расчетами устойчивости.

Выполнение больших планировочных подрезок, обеспечивающих устойчивость склона невозможно, так как в этом случае может быть поврежден существующий подземный трубопровод. Кроме того, устойчивость склона не будет обеспечена при особом сочетании нагрузок. При строительстве трубопровода может произойти активизация оползневых процессов. В первую очередь это будет связано с нарушением стабилизации при планировочных работах, а также возможностью водонасыщения грунтов в результате нарушения условий поверхностного стока и нарушения течения воды в русле ручья, расположенном в основании склона (в языковой части). В связи с тем, что опоры трубопровода расположены параллельно смещению оползневых масс, то расчетная схема выполнена по оси прокладки трубопровода. Таким образом, в расчетной сечении попадают все рассматриваемые опоры трубопровода. В качестве опор трубопровода приняты свайные элементы, заглубленные в несмещаемые породы. Длина свай определена с учетом наиболее опасной поверхности скольжения (наиболее глубокой), полученной при выполнении инженерно-геологических изысканий, а также на основе расчета по прочности свайных элементов, их деформациях, а также расчета прочности грунта согласно СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты».

Принятые в расчете характеристики инженерно-геологических элементов (ИГЭ) представлены в таблице 1. Прочностные характеристики грунтов при расчете устойчивости принимались по схемам испытаний³, представленных и обоснованных в таблице 2.

В представленных условиях строительства для обеспечения безопасности как опор трубопроводов, так и их фундаментов можно выделить три вида конструктивных решений на основе проведенного анализа нормативных и научных источников [12; 14–21], представленных в таблице 3.

³ СП 43.13330.2012 Сооружения промышленных предприятий, 2012, п. 6.3.12.

Таблица 1 / Table 1
Расчетные физико-механические свойства грунтов при $\alpha = 0,95$
Calculated physical and mechanical properties of soils at $\alpha = 0.95$

Наименование показателей Indicator name	Обозначение Designation	Единицы измерения Units	Свойства грунтов Soil properties					
			ИГЭ-7 Engineering-geologic element-7	ИГЭ-2 Engineering-geologic element-2	ИГЭ-3 Engineering-geologic element-3	ИГЭ-4 Engineering-geologic element-4	ИГЭ-5 Engineering-geologic element-5	ИГЭ-6 Engineering-geologic element-6
			Полускальный грунт. Аргиллит очень низкой прочности, плотный Semi-rocky soil. Very low strength argillite, dense	Глина легкая твердая средненабухающая Clay light hard moderately swelling	Глина тяжелая твердая сильнонабухающая Clay, heavy, hard, highly swellable	Глина легкая пылеватая твердая ненабухающая Clay light, dusty, hard, non-swelling	Глина легкая пылеватая полутвердая ненабухающая Light silty semi-solid non-swelling clay	Глина легкая пылеватая твердая сильнонабухающая Clay light dusty hard, highly swellable
Удельный вес грунта природной влажности Soil bulk density of natural water content	$\gamma_{ест}$	$\frac{кН}{м^3}$ $\frac{kN}{m^3}$	21,0	18,9	18,6	18,8	18,4	18,5
Угол внутреннего трения Internal friction angle	φ	$град.$ $deg.$	30	11	8	12	8	10
Удельное сцепление Specific cohesion	c	$\frac{кПа}{кПа}$ kPa	450	59	60	17	17	17
Модуль деформации общий General deformation modulus	E	$\frac{МПа}{МПа}$ MPa	-	7,5	7,4	12,0	12,0	6,9
Предел прочности Tensile strength	$\sigma_{сж}$	$\frac{МПа}{МПа}$ MPa	< 1	-	-	-	-	-
Коэффициент Пуассона ⁴ Poisson's ratio	ν	-	0,27	0,3	0,3	0,3	0,34	0,3
Коэффициент пористости Porosity coefficient	e	-	0,47	0,84	0,94	0,84	0,98	0,94

Разработано автором / Developed by the author

⁴ СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений, 2017.

В процессе разработки оптимальных конструктивных решений выполнено компьютерное моделирование склона как в двухмерной, так и в трехмерной постановке на основе метода конечных элементов с использованием программ Plaxis 2D и Plaxis 3D.

Таблица 2 / Table 2

**Схемы испытаний грунта
для получения прочностных характеристик грунтов
Soil test circuit to obtain the strength soils characteristics**

Тип грунта Soil type	Тип лабораторного испытания грунта Type of laboratory soil test
Техногенный (насыпной) грунт Man-made soils	Лабораторные испытания выполнены методом консолидированного среза в водонасыщенном состоянии Laboratory tests executed by the consolidated cut in a waterlogged state method
Глинистые несмещенные грунты естественного происхождения Clay unbiased soils natural origin	Лабораторные испытания выполнены методом неконсолидированного среза в водонасыщенном состоянии Laboratory tests executed by the unconsolidated cut in a waterlogged state method
Крупнообломочные грунты Macrofragmental soil	Полевых испытания методом среза целиков грунта по схеме консолидировано-дренированного сдвига Field trials by the soil dumpling cutting method according to the consolidated-underdrain shear scheme
Оползневые глинистые грунты Landslide clay soils	Лабораторные испытания методом среза целиков грунта по схеме «плашка по плашке» Laboratory tests by the soil dumpling cutting method according to the "die by die" scheme

Разработано автором / Developed by the author

Таблица 3 / Table 3

**Описание вариантов рассматриваемых конструктивных решений
Options description for the considered design solutions**

Номер разработанного варианта Developed option number	Вид конструкции Construction type
<i>Вариант 1</i> Option 1	Устройство на склоне одного или нескольких ярусов линейных противооползневых сооружений Setup of one or more tiers of linear landslide protection works on the slope side
<i>Вариант 2</i> Option 2	Возведение обтекаемых защитных сооружений, располагаемых «клином» Erection of fair-shaped protective structures, placed by wedge assembly
<i>Вариант 3</i> Option 3	Разработка отдельно стоящих обтекаемых фундаментов опор трубопроводов повышенной несущей способности Development of free-standing fair-shaped pipeline piers' foundations with heavy-duty

Разработано автором / Developed by the author

Для расчетной схемы выполнена генерализация инженерно-геологического разреза, полученного в ходе изысканий (упрощена геометрия склона, удалены не существенные элементы). Моделирование склона выполнено с учетом апробированных приемов с учетом взаимодействия грунта с конструкциями [6; 14–19]. При расчетах конструкций использовано четыре сочетания нагрузок, представленных и описанных на рисунке 4.

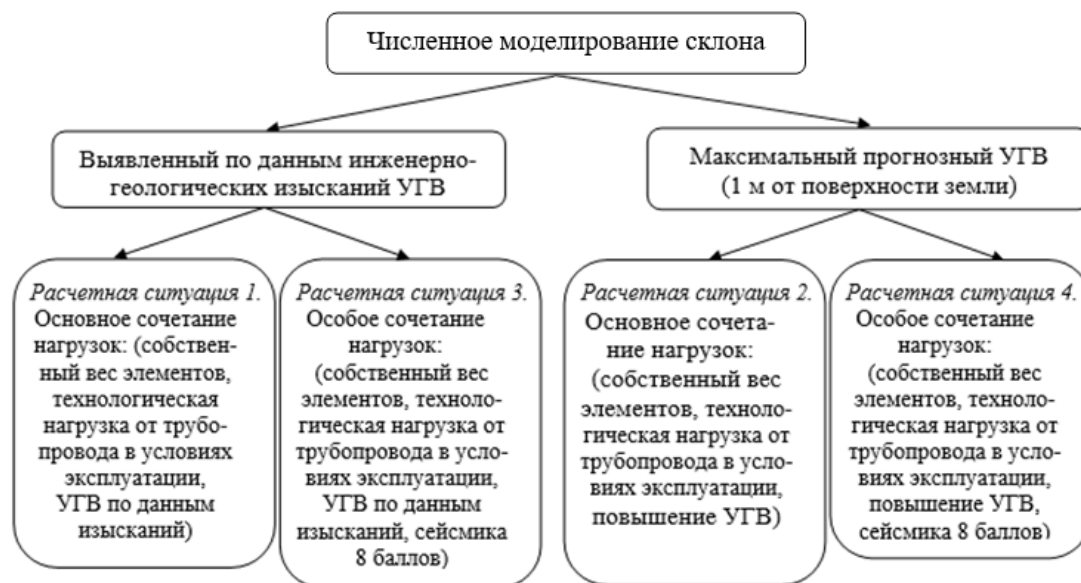


Рисунок 4. Сочетания нагрузок, рассматриваемые при численном моделировании склона

Figure 4. Loads combinations considered in numerical slope modeling

Устройство на склоне одного или нескольких ярусов линейных противооползневых сооружений

Setup of one or more tiers of linear landslide protection works

Одним из вариантов инженерной защиты фундаментов опор является строительство нескольких ярусов противооползневых сооружений. Выбор количества ярусов сооружений, количества рядов свай в каждом сооружении, диаметр свай, их шаг и др. зависят от параметров оползня (мощность, размеры в плане, характеристики слагаемых грунтов). Моделирование склона с такими противооползневыми сооружениями можно выполнять в 2D постановке. В данном случае расчет был выполнен в конечно-элементном программном комплексе Plaxis (рис. 5, 6). На рассматриваемом участке моделирование склона с проектируемыми сооружениями выполнено с использованием модели грунта Кулона-Мора (для оползневых грунтов) и модели упрочняющегося грунта (для несмещаемых пород) [6; 13]. Все три яруса сооружений запроектированы однорядными свайными с диаметром свай 1,2 м с армирование 2,5 % (класс А500с) и шагом 3 м. Сооружение усилено анкерными сваями Titan 73/53 [8; 20–21], располагаемых с шагом 3 м, что обеспечивают необходимую прочность (табл. 4).

Такой вид инженерной защиты направлен на полную стабилизацию склона и обеспечивает нормативную устойчивость, однако требует значительных финансовых затрат.

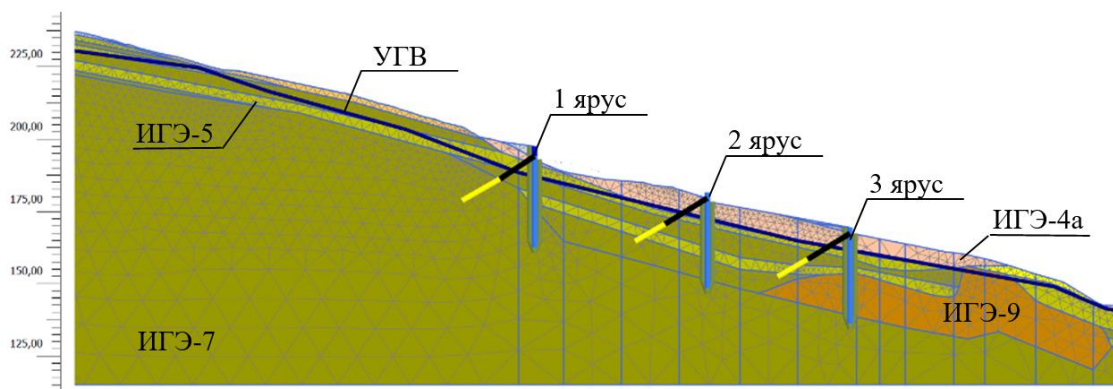


Рисунок 5. Конечно-элементная модель оползневого склона (разработано автором)

Figure 5. Landslide slope finite element model (developed by the author)

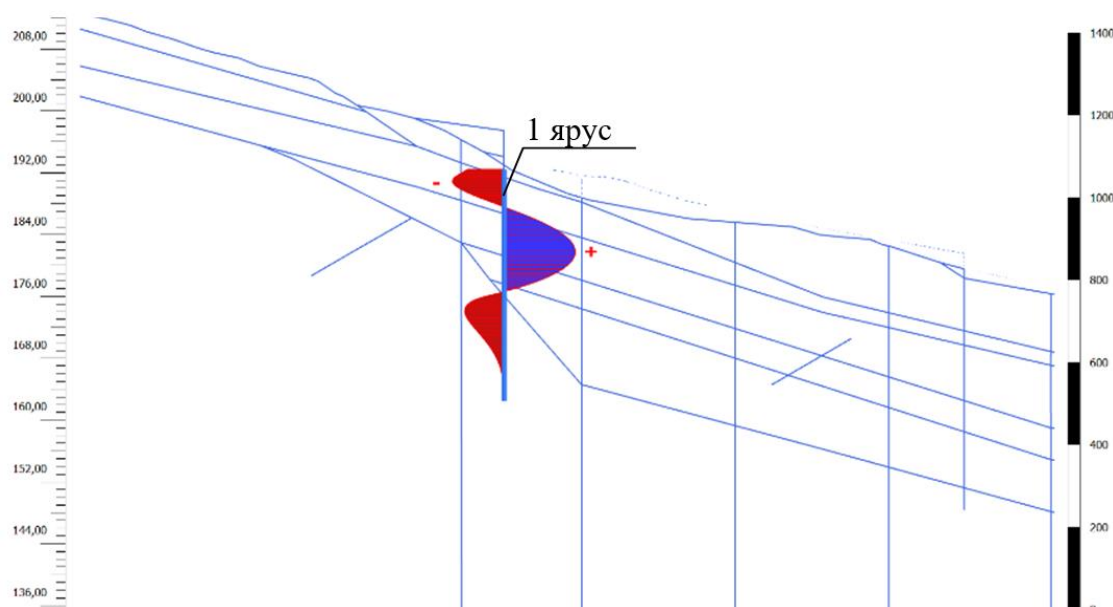


Рисунок 6. Эпюра изгибающих моментов в верховом сооружении (цвет грунтов не отображается для наглядности эпюры).

$M_{св} = 2266$ кНм. 4 расчетная ситуация (разработано автором)

Figure 6. Bending-moment diagram in the upper structure (soil color is not displayed for diagram visual clarity purposes). $M_{sw} = 2266$ kNm. 4 design situation (developed by the author)

Возведение обтекаемых защитных сооружений около опор трубопроводов

Erection of fair-shaped protective structures near pipeline supports

Обтекаемые защитные сооружения могут быть как линейными, так и располагаемые «клином». В этом случае, перед каждой опорой устраивается ряд свайных элементов. Конструкция предназначена для перенаправления движения оползня [14; 15]. При этом обеспечивается локальная устойчивость с фронтальной стороны от каждой опоры. В

исследованиях разработана расчетная модель задачи совместной работы грунта с фундаментом защитного «обтекаемого» свайного сооружения, реализованная в программном комплексе Plaxis. Математическое моделирование взаимодействия грунтов со сваями выполнено методом конечных элементов на основе упруго-пластической модели грунта Кулона-Мора (рис. 7, 8).

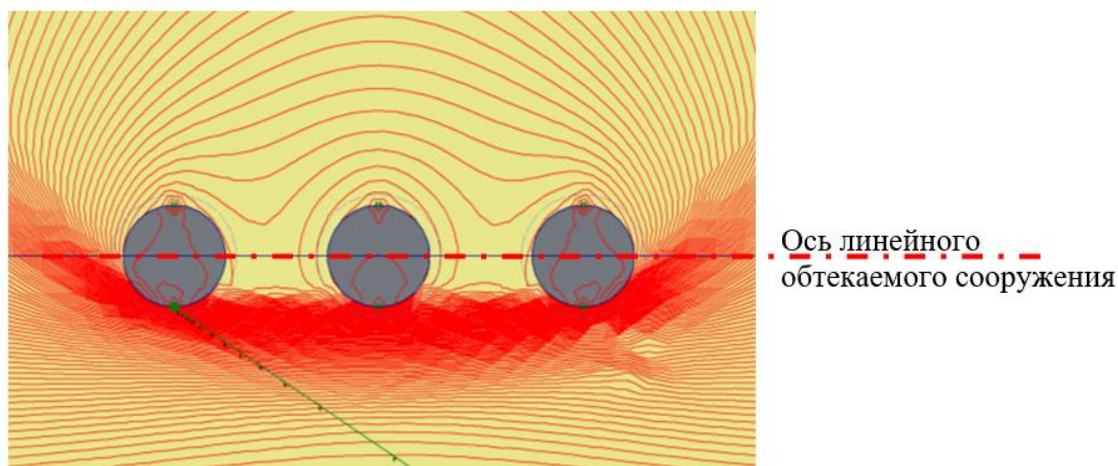


Рисунок 7. Деформации оползневого грунта по данным расчета методом конечных элементов. Линейное расположение обтекаемого сооружения (разработано автором)

Figure 7. landslide soil deformations according to the finite element method calculations. The fair-shaped structure linear arrangement (developed by the author)

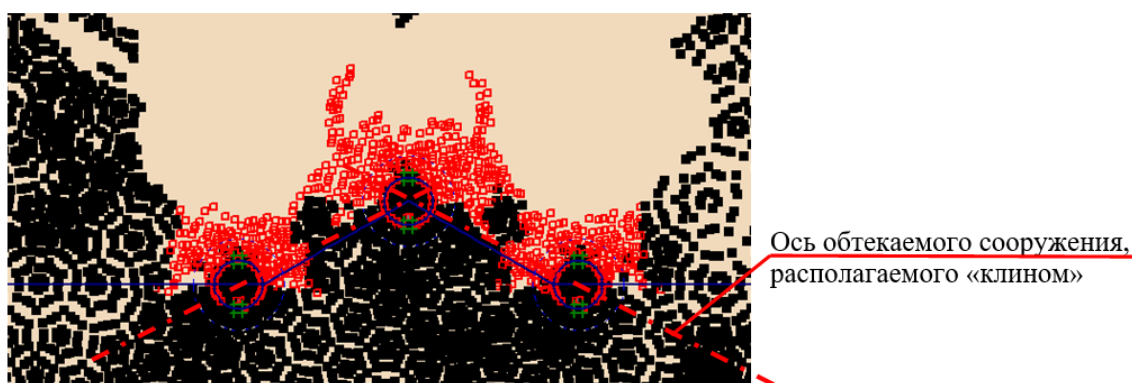


Рисунок 8. «Пластические точки» Кулона-Мора (красные) и растяжения (черные). Стадия образования пластических деформаций грунта и разрушения его структуры. Обтекаемое сооружение, расположенное «клином» (разработано автором)

Figure 8. "Plastic points" of Coulomb-Mohr (red) and stretching (black). The formation stage of soil plastic deformation and soil structure destruction. Fair-shaped structure, placed by wedge assembly (developed by the author)

При анализе результатов численного моделирования сооружения на данном участке была разработана обтекаемая конструкция, располагаемая «клином». Диаметр свай принят 1,2 м с армирование 2,5 % (класс А500с). Угол наклона сооружения относительно центральной сваи 30 градусов

(рис. 8). В результате расположения «клином» деформации верха сооружений не превышают допустимых значений (табл. 4).

Разработка отдельно стоящих обтекаемых фундаментов опор трубопроводов повышенной несущей способности

Development of free-standing fair-shaped pipeline piers' foundations with heavy-duty

Разработка отдельно стоящих обтекаемых фундаментов опор трубопроводов повышенной несущей способности может быть реализована в виде устройства куста свай или свай, усиленных анкерами. Однако, в проанализированных нормативных и научных источниках нет примеров проектирования кустов свай, располагаемых на оползневых склонах. А также не рассматривалась данная задача в пространственной постановке. В связи с этим, на исследуемом объекте были разработаны новые конструктивные решения фундаментов опор трубопроводов в виде кустов из двух свай, предназначенных для повышения общей несущей способности. В этом случае фундамент опоры трубопровода является одновременно и обтекаемым защитным сооружением. Данное конструктивное решение является наиболее экономичным.

Для определения эффективности применяемого конструктивного решения изменялось расположение свай относительно вектора смещения оползня. При расположении свай, объединенных ростверком, предназначенным для обеспечения совместной работы, поперек оползня в сооружении развивались значительные перемещения, недопустимые для нормальной эксплуатации опорных частей трубопроводов. Однако, при изменении положения свай вдоль оползневых смещений наблюдался рамный эффект в сооружении, что позволило снизить перемещения и выполнять дальнейшую разработку рассматриваемого конструктивного решения.

Моделирование склона выполнено с помощью геотехнического программного комплекса Plaxis 3D с помощью задания геологических колонок (скважин). Скважины на склоне расположены на изменяемых участках геологического строения. Всего выполнено моделирование 44 скважин (по 22 скважины с каждой стороны модели). Ширина модели составляет 30 м, что обеспечит моделирование эффекта «обтекания» грунтом свайных элементов (рис. 9, 10). При принятой ширине модели будет отсутствовать влияние граничных условий схемы. Для грунтов в расчетной схеме использованы три различные модели:

- модель Кулона-Мора (для оползневых грунтов);
- модель упрочняющегося грунта (для несмещаемых глинистых пород);
- модель Хека-Брауна (для слабых трещиноватых аргиллитов) [22].

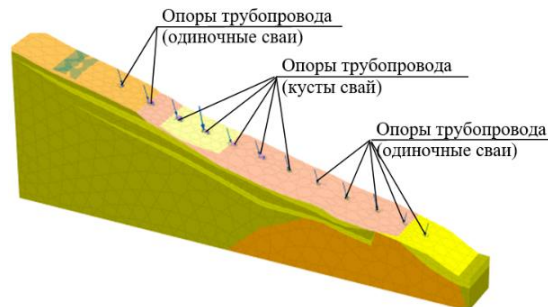


Рисунок 9. Конечно-элементная пространственная схема склона с отдельно стоящими опорами (разработано автором)

Figure 9. Finite-element 3D slope configuration with free-standing supports (developed by the author)

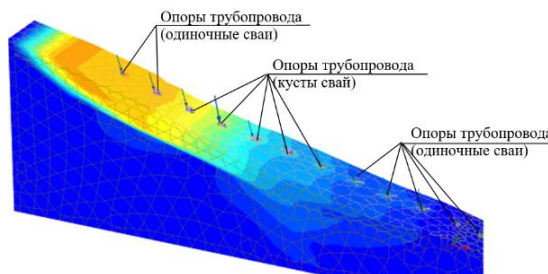


Рисунок 10. Прогнозная поверхность скольжения (разработано автором)

Figure 10. Predictive sliding surface (developed by the author)

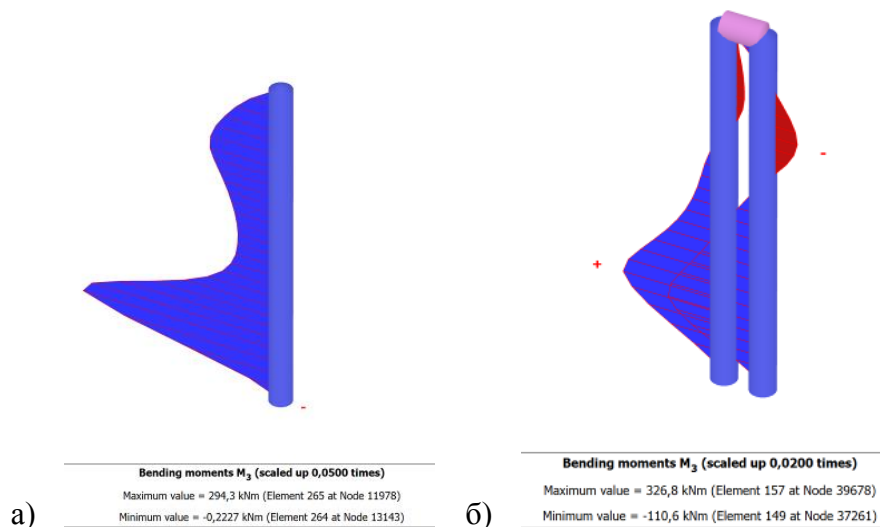


Рисунок 11. Эпюры изгибающих моментов, полученные при пространственном моделировании фундаментов опор: а) одиночная свая; б) куст из двух свай (разработано автором)

Figure 11. Bending-moment diagram obtained in the 3D supports foundations modeling: a) single pile; b) two piles clump (developed by the author)

Две верхние сваи и пять нижних свай запроектированы одиночными диаметром 1,5 м с армирование 2,5 % (класс А500с). В центре оползня пять отдельных опор разработано в виде спаренных свай, объединенных монолитным железобетонным ростверком (рис. 11). Такое расположение сооружения создает рамный эффект. Согласно выполненного расчета, полученная поверхность скольжения и мощность смещающихся пород совпадает с данными инженерно-геологических изысканий.

Выводы по результатам численного моделирования

Conclusions based on the numerical modeling results

В исследовании были рассмотрены четыре расчетных ситуации, учитывающие как повышенный уровень грунтовых вод, так и сейсмические воздействия (8 баллов). Согласно комплексному исследованию и ряда геотехнических расчетов на исследуемом участке подобраны конструктивные решения с требуемой несущей способностью (табл. 4).

Таблица 4 / Table 4

Основные результаты расчетов

Main calculation results

Показатели Indicators	Рассматриваемое конструктивное решение Considered constructive solution		
	1 вариант: устройство на склоне одного или нескольких ярусов линейных противооползневых сооружений Option 1: Setup of one or more tiers of linear landslide protection works	2 вариант: возведение обтекаемых защитных сооружений, располагаемых «клином» Option 2: Erection of fair-shaped protective structures, placed by wedge assembly	3 вариант: разработка отдельно стоящих обтекаемых фундаментов опор трубопроводов повышенной несущей способности Option 3: Development of free-standing fair-shaped pipeline piers' foundations with heavy-duty
Коэффициент устойчивости склона, k_{st} Slope stability coefficient, k_{st}	1,305	1,048	1,036
Максимальный изгибающий момент (для расчетной ситуации 4) M , kNm Maximum flexion moment (for design situation 4) M , kNm	1204	1321	1896
Деформации верха сооружения (при основном сочетании нагрузок) U , mm Deformations of the top of the structure (with the main combination of loads) U , mm	8,6	10,2	40,4

Разработано автором / Developed by the author

Расчет устойчивости в программном комплексе Plaxis выполнен методом «с/ф reduction». Все рассмотренные варианты конструктивных решений обеспечат нормальную эксплуатацию трубопроводов. Однако, особенности организации строительного производства на оползневых территориях потребовали детального анализа каждого рассматриваемого варианта.

Для выбора оптимального конструктивного решения на исследуемом участке проанализированы достоинства и недостатки каждого варианта:

1 вариант (устройство линейных противооползневых сооружений): позволяет обеспечить полную стабилизацию склона предотвращая дальнейшие подвижки грунта, однако требует существенных финансовых затрат.

2 вариант (возведение защитных сооружений, расположенных «клином»): перенаправляет вектор смещения оползневых масс снижая давление на фундамент опоры, а также сохраняет незначительные горизонтальные деформации фундаментов опор.

3 вариант (возведение фундаментов опор трубопроводов повышенной несущей способности): является наиболее экономичным вариантом, однако при этом развиваются существенные горизонтальные деформации фундаментов опор.

Анализ результатов расчетов вариантов конструктивных решений фундаментов опор трубопроводов показал, что несмотря на экономическую эффективность второго и третьего вариантов только первый вариант сможет обеспечить устойчивость склона как на период строительства, так и при эксплуатации [8; 14].

При рассмотрении второго и третьего вариантов склон остается оползневым, поэтому важным моментом при выборе окончательного конструктивного решения является обеспечение временной устойчивости склона на период производства работ. На рисунке 12 представлена блок-схема для определения оптимальных конструктивных решений защитных сооружений фундаментов опор трубопроводов.

При выполнении комплексного исследования автором были проанализированы как нормативные, так и научные источники. В процессе исследований был разработан универсальный алгоритм действий, подходящий для любого аналогичного оползневого участка проектирования. Предлагаемый алгоритм расчетов представлен на рисунке 12.

Благодаря предлагаемому алгоритму действий (рис. 12) инженеры-проектировщики смогут в сжатые сроки определить оптимальные

конструктивные решения фундаментов опор трубопроводов или разработать удерживающее сооружение в соответствии с требованиями актуальных нормативных источников. Предложенный вариант фундаментной части опоры обладает повышенной несущей способностью и его внедрение позволит существенно снизить стоимость строительства при условии обеспечения нормативной устойчивости на период производства работ.

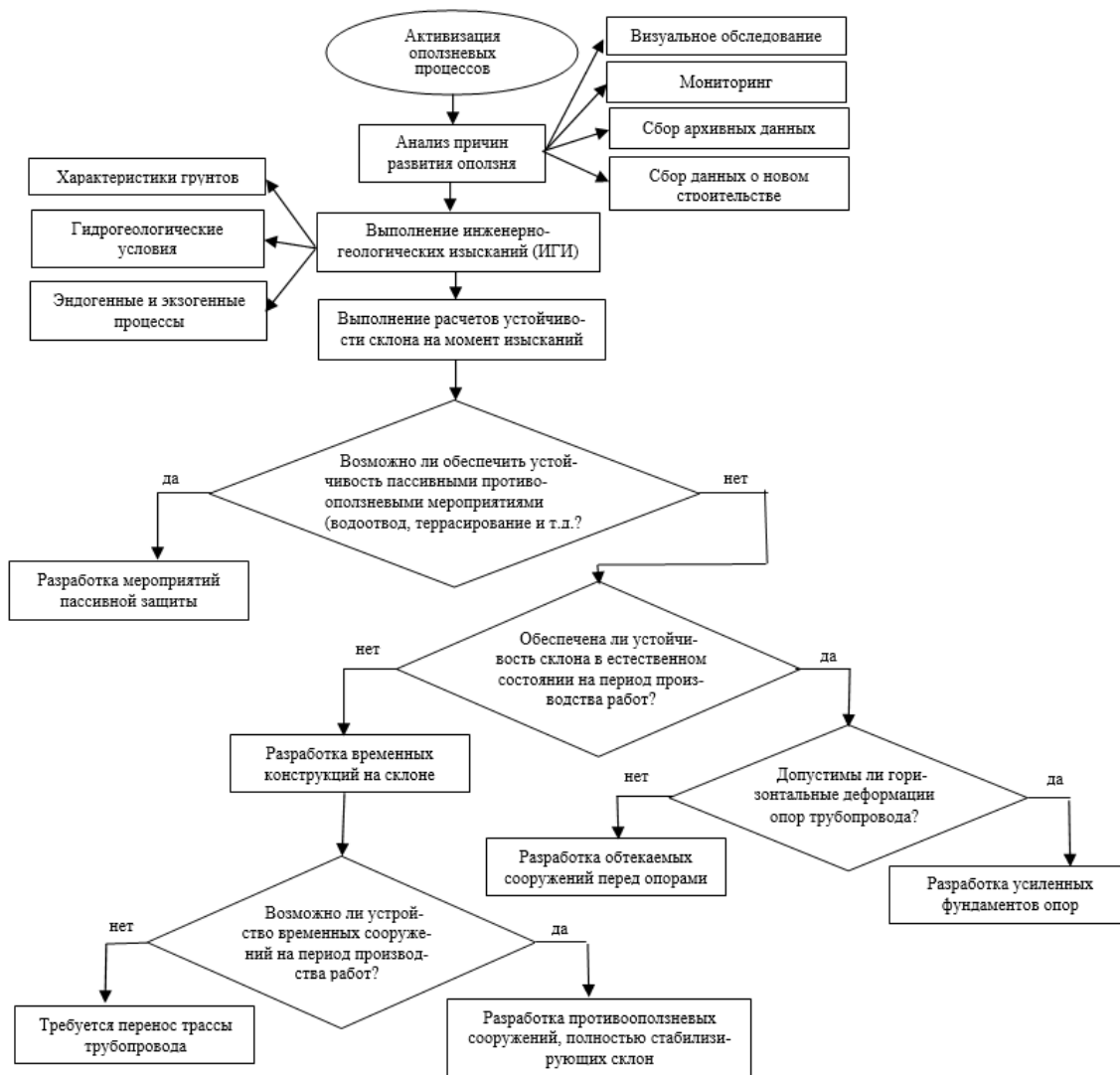


Рисунок 12. Блок-схема к проектированию трубопроводов на оползневых склонах (разработано автором)
Figure 12. Block diagram for the pipeline design on landslide slopes (developed by the author)

Заключение

Conclusion

В статье представлен анализ нормативной и научной литературы в области строительства отдельно стоящих объектов на оползневых

склонах. В частности, рассмотрено проектирование реального газопровода в сложных инженерно-геологических условиях в Краснодарском крае. Автором рассмотрены различные варианты активной и пассивной защиты опор трубопровода, сопоставлены результаты численного (компьютерного) моделирования, предложены конструктивные решения фундаментов опор повышенной несущей способности.

В рамках проведенных исследований автором разработан алгоритм действий, необходимых для инженеров при проектировании опор трубопроводов или опор ЛЭП, позволяющий в сжатые сроки определить оптимальные конструктивные решения на оползневом участке.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Маций, С.И.** Применение метода конечных элементов для исследования взаимодействия грунтов оползня со сваями / С.И. Маций, Ф.Н. Деревенец. — DOI <https://doi.org/10.1007/s11204-005-0036-5> // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2005. — № 4. — С. 8–12. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21919034> (дата обращения: 15.07.2021).
2. **Bru, G.** Analysis of the Portalet Landslide Using Finite Element Method / G. Bru, J.A. Fernández-Merodo, J.C. García-Davalillo, G. Herrera, J. Fernandez. — DOI <https://doi.org/10.1007/978-3-319-09057-3> // Engineering Geology for Society and Territory — Volume 2 / Под ред. Lollino G. и др. Кам: Springer, 2015. — С. 1519–1524. — URL: <https://www.springer.com/gp/book/9783319090566> (дата обращения: 15.07.2021).
3. **Ito T.** Methods to Estimate Lateral Force Acting on Stabilizing Piles / T. Ito, T. Matsui. — DOI https://doi.org/10.3208/sandf1972.15.4_43 // Soils and Foundations. — 1975. — Т 15. — № 4. — С. 43–59. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038080620335885> (дата обращения: 15.07.2021).
4. **Mayne, P.W.** Drilled Shaft Response in Piedmont Residuum Using Elastic Continuum Analysis and Seismic Piezocone Tests / P.W. Mayne, F. Niazi, D. Woeller. — DOI [https://doi.org/10.1061/41106\(379\)25](https://doi.org/10.1061/41106(379)25) // Deep Foundations and Geotechnical In Situ Testing — Proceedings of the 2010 GeoShanghai International Conference, Shanghai, 2010 / Под ред. Robert Y. Liang и др. Шанхай: American Society of Civil Engineers, 2010. — С. 200–205. — URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/41106%28379%2925> (дата обращения: 10.08.2021).
5. **Богомолов, А.Н.** Стабилизация оползня на участке строительства железной дороги в г. Сочи / А.Н. Богомолов, С.И. Маций, Б.С. Бабаханов [и др.] // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2012. — № 29. — С. 15–25. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20280899> (дата обращения: 15.07.2021).
6. **Sergey, M.** Modeling of Engineered Slopes for the Effective Design of Protection Structures: Example in the City of Sochi (Russia) / Sergey M., Darya L., Ekaterina B., Aleksandr R. — DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-09057-3_370 // Engineering Geology for Society and Territory — Volume 2 / Под ред. Lollino G. и др. Кам: Springer, 2015. — С. 2071–2075. — URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-09057-3_370 (дата обращения: 10.05.2021).
7. **Добров, Э.М.** Обеспечение устойчивости склонов и откосов в дорожном строительстве с учетом ползучести грунтов / Э.М. Добров. — М.: Транспорт, 1975. — 216 с.
8. **Гинзбург, Л.К.** Особенности устройства подпорных стен на оползневых участках / Л.К. Гинзбург // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 1989. — № 3. — С. 3–5.
9. **Шапиро, Д.М.** Геотехнические аварии дорожных сооружений и их ликвидация / Д.М. Шапиро, А.П. Тюгин. — DOI <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2020.3.08> // Construction and Geotechnics. — 2020. — Т 11. — № 3. — С. 89–101. — URL: <https://ered.pstu.ru/index.php/CG/article/view/949> (дата обращения: 10.08.2021).

10. **Bezuglova E.** Engineering and geological grounds of landslide protection reliability of structures / E. Bezuglova, S. Matsiy. — DOI <https://doi.org/10.1007/978-3-642-31319-6-90> // *Landslide Science and Practice. Volume 6: Risk Assessment, Management and Mitigation* / Рим: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. — С. 709–714. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21915606> (дата обращения: 10.05.2021).
11. **Вавринюк, Т.С.** Результаты инженерных изысканий, как основа для расчетов транспортных сооружений / Т.С. Вавринюк, Е.В. Федоренко // *Инженерные изыскания*. — 2014. — № 3. — С. 46–49.
12. **Маслов, Н.Н.** Механика грунтов в практике строительства / Н.Н. Маслов. — М.: Стройиздат, 1977. — 32 с.
13. **Маслов, Н.Н.** Основы инженерной геологии и механики грунтов / Н.Н. Маслов. — М.: Высшая школа, 1982. — 511 с.
14. **Мацкий, С.И.** Защитные свайные сооружения опор эстакад, "обтекаемые" грунтом оползней / С.И. Мацкий, Д.В. Лейер, А.К. Рябухин. — DOI <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2017.4.02> // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. — 2017. — Т 8. — № 4. — С. 15–24. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32248098> (дата обращения: 15.07.2021).
15. **Лейер, Д.В.** Оптимизация методики расчета защитного сооружения на свайном основании, "обтекаемого" оползневыми глинистыми грунтами / Д.В. Лейер // *Политехнический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. — 2016. — № 119. — С. 1200–1216. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26148559> (дата обращения: 15.07.2021).
16. **Gotman, A.L.** Lateral Load Analysis of a Composite Pile / A.L. Gotman, L.Y. Sokolov. — DOI <https://doi.org/10.1007/s11204-018-9510-8> // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. — 2018. — Т 55. — № 2. — С. 103–109. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11204-018-9510-8> (дата обращения: 10.08.2021).
17. **Moon, S.W.** Undrained Shear Strength in Cohesive Soils Estimated by Directional Modes of In-Situ Shear Wave Velocity / S.W. Moon, T. Ku. — DOI <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0508-9> // *Geotechnical and Geological Engineering*. — 2018. — Т 36. — № 5. — С. 2851–2868. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35717737> (дата обращения: 10.08.2021).
18. **Winter, H.** Stabilization of clay slopes by piles / H. Winter, W. Schwarz, G. Gudehus. — DOI // *Impruv. Ground. Proc. 8 Eur.: Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Helsinki, 23–26 May, 1983. Vol. 2* / Роттердам, 1983. — С. 545–550. — URL: <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=PASCALGEODEBRGM8320469550> (дата обращения: 10.08.2021).
19. **Ito, T.** Design method for stabilizing piles against landslide — one row of piles / T. Ito, T. Matsui, W.P. Hong. — DOI <https://doi.org/10.3208/sandf1972.21.21> // *Soils and Foundations*. — 1981. — Т 21. — № 1. — С. 21–37. — URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/sandf1972/21/1/21_1_21/article (дата обращения: 10.08.2021).
20. **Ryabukhin A.** In-Situ Measurement of the Anchor-Pile Displacement in the Geotechnical Conditions of Sochi / A. Ryabukhin, S. Matsiy. — DOI <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-297-4-576> // *Proceedings of the 5th International Young Geotechnical Engineers' Conference: 5th iYGEC 2013 (Advances in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering)* / Под ред. Yu-Jun Cui, Fabrice Emeriault, Fahd Cuiria и др. Амстердам: IOS Press, 2013. — С. 576–578. — URL: <https://ebooks.iospress.nl/volumearticle/34682> (дата обращения: 10.05.2021).
21. **Gotman, A.L.** Behaviour of many row pile landslide protection structure under deep shear / A.L. Gotman, M.A. Suvorov. — DOI <https://doi.org/10.3233/978-1-60750-031-5-2571> // *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: The Academia and Practice of Geotechnical Engineering, Alexandria, 05–09 октября 2009 года.* / Александрия: IOS Press, 2009. — С. 2571–2576. — URL: <https://ebooks.iospress.nl/publication/30515> (дата обращения: 10.08.2021).

22. **Маций, С.И.** Сравнение расчетных методов "Мора-Кулона" и "упрочняющего грунта" при моделировании подпорных стен / С.И. Маций, А.К. Рябухи, В.А. Лесной, Д.В. Леер, Л.А. Сухляева // 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://www.elibrary.ru/item.asp?id=35602780> (дата обращения: 15.07.2021).

Сведения об авторах:

Лейер Дарья Валерьевна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные материалы и конструкции», ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», Краснодар, Россия, e-mail: dasha_leyer@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9893-030X>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=794169

Серый Дмитрий Гаврилович — кандидат технических наук, декан «Архитектурно-строительного» факультета, доцент кафедры «Строительные материалы и конструкции», ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», Краснодар, Россия, e-mail: seriy.d@kubsau.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9486-0946>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=434324

Любарский Николай Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные материалы и конструкции», ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», Краснодар, Россия, e-mail: lubarskynikolai@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9194-2188>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=751467

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57221671124>

Статья получена: 23.07.2021. Принята к публикации: 20.09.2021. Опубликована онлайн: 04.10.2021.

REFERENCES

1. Matsii S.I., Derevenets F.N. Application of finite-element method to investigate interaction between slide-prone soils and piles. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2005; 42(4): 120–126. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11204-005-0036-5>.
2. Bru G., Fernández-Merodo J.A., García-Davalillo J.C., Herrera G., Fernandez J. Analysis of the Portalet Landslide Using Finite Element Method. In: Lollino G. et al (eds). *Engineering Geology for Society and Territory — Volume 2*. Cham: Springer International Publishing; 2015. p. 1519–1524. Available at: <https://www.springer.com/gp/book/9783319090566> (accessed 14th July 2021). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-09057-3>.
3. Ito T., Matsui T. Methods to Estimate Lateral Force Acting on Stabilizing Piles. *Soils and Foundations*. 1975; 15(4): 43–59. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.3208/sandf1972.15.4_43.
4. Mayne P.W., Niazi F., Woeller D. Drilled Shaft Response in Piedmont Residuum Using Elastic Continuum Analysis and Seismic Piezocone Tests. In: Robert Y. Liang et al (eds). *Deep Foundations and Geotechnical In Situ Testing — Proceedings of the 2010 GeoShanghai International Conference. Shanghai, 2010*. Shanghai: American Society of Civil Engineers; 2010. p. 200–205. Available at: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/41106%28379%2925> (accessed 10th August 2021). (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1061/41106\(379\)25](https://doi.org/10.1061/41106(379)25).
5. Bogomolov A.N., Matsiy S.I., Babakhanov B.S., Bezuglova E.V., Leyer D.V., Kuznetsova S.V. Landslide Stabilization on The Section of The Railroad Construction in Sochi. *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering Series: Civil Engineering and Architecture*. 2012; (29): 15–25. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20280899> (accessed 15th July 2021). (In Russ., abstract in Eng.).

6. Sergey M., Darya L., Ekaterina B., Aleksandr R. Modeling of Engineered Slopes for the Effective Design of Protection Structures: Example in the City of Sochi (Russia). In: Lollino G. et al. (eds). *Engineering Geology for Society and Territory — Volume 2*. Cham: Springer; 2015. p. 2071–2075. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-09057-3_370 (accessed 10th May 2021). (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-09057-3_370.
7. Dobrov E.M. [Ensuring the stability of slopes and slopes in road construction, taking into account the creep of soils]. Moscow: Transport Publ.; 1975. (In Russ.).
8. Ginzburg L.K. [Features of the device of retaining walls in landslide areas]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1989; (3): 3–5. (In Russ.).
9. Shapiro D.M., Tyutin A.P. Geotechnical accidents of road structures and their liquidation. *Construction and Geotechnics*. 2020; 11(3): 89–101. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2020.3.08>.
10. Bezuglova E., Matsiy S. Engineering and geological grounds of landslide protection reliability of structures. In: Margottini, Claudio, Canuti, Paolo, Sassa, Kyoji (Eds.). *Landslide Science and Practice. Volume 6: Risk Assessment, Management and Mitigation*. Rome: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2013. p. 709–714. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21915606> (accessed 10th May 2021). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-31319-6-90>.
11. Vavrinyuk T.S., Fedorenko E.V. [Engineering survey results as a basis for calculations of transport structures]. *Engineering survey*. 2014; (3): 46–49. (In Russ.).
12. Maslov N.N. [Soil mechanics in construction practice]. Moscow: Stroyizdat; 1977. (In Russ.).
13. Maslov N.N. [Fundamentals of Engineering Geology and Soil Mechanics]. Moscow: Higher School pub.; 1982. (In Russ.).
14. Matsiy S.I., Leier D.V., Riabukhin A.K. Protective pile constructions of trestle supports “streamlined” by soil of landslides. *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*. 2017; 8(4): 15–24. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2017.4.02>.
15. Leyer D.V. Optimization of a Calculation Method for Pilework Protective Structures “Streamlined” By Landslide Clay Soils. *Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University*. 2016; (119): 1200–1216. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26148559> (accessed 15th July 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
16. Gotman A.L., Sokolov L.Y. Lateral Load Analysis of a Composite Pile. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2018;55(2): 103–109. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11204-018-9510-8>.
17. Moon S.W., Ku T. Undrained Shear Strength in Cohesive Soils Estimated by Directional Modes of In-Situ Shear Wave Velocity. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2018; 36(5): 2851–2868. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0508-9>.
18. Winter H., Schwarz W., Gudehus G. Stabilization of clay slopes by piles. In: *Impruv. Ground. Proc. 8 Eur.: Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Helsinki, 23–26 May, 1983. Vol. 2*. Rotterdam; 1983. p. 545–550. Available at: <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=PASCALGEODEBRGM8320469550> (accessed 10th August 2021). (In Eng.).
19. Ito T., Matsui T., Hong W.P. Design method for stabilizing piles against landslide — one row of piles. *Soils and Foundations*. 1981; 21(1): 21–37. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3208/sandf1972.21.21>.
20. Ryabukhin A., Matsiy S. In-Situ Measurement of the Anchor-Pile Displacement in the Geotechnical Conditions of Sochi. In: Yu-Jun Cui, Fabrice Emeriault, Fahd Caira et al. (eds). *Proceedings of the 5th International Young Geotechnical Engineers' Conference: 5th iYGEC 2013 (Advances in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering)*. Amsterdam: IOS Press; 2013. p. 576–578. Available at: <https://ebooks.iospress.nl/volumearticle/34682> (accessed 10th May 2021). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-297-4-576>.
21. Gotman A.L., Suvorov M.A. Behaviour of many row pile landslide protection structure under deep shear. In: *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Vol. 3*. Alexandria: IOS Press; 2009. p. 2571–2576. Available at: <https://ebooks.iospress.nl/publication/30515> (accessed 10th August 2021). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3233/978-1-60750-031-5-2571>.

22. Matsiy S.I., Ryabukhin A.K., Lesnoy V.A., Leyer D.V., Sukhlyayeva L.A. [Comparison of calculation methods "Mohr–Coulomb" and "hardening soil" when modeling retaining walls]. In: [*Soil Mechanics in Geotechnics and Foundation Engineering: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Novocherkassk, May 29–31, 2018*]. Novocherkassk: LLC "Lik"; 2018. p. 382–390. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35602780> (accessed 15th July 2021). (In Russ.).
-

Information about the authors:

Darya V. Leyer — Kuban State Agrarian University, 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

Dmitry G. Seryi — Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia, e-mail: seriy.d@kubsau.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9486-0946>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=434324

Nikolai N. Lubarsky — Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia, e-mail: lubarskynikolai@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9194-2188>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=751467

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57221671124>

Submitted: 23rd July 2021. Revised: 20th September 2021. Published online: 4th October 2021.