





УДК 622.276.04+624.154:626
EDN: KKHSFE

А.В. Пьянов¹ , А.А. Гуня¹ , А.А. Бурова¹ , А.А. Гофман² 

¹ АО «ЦКБ «Коралл», Севастополь, Россия

² ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Россия

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАСАСЫВАЕМЫХ СВАЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МОРСКИХ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАТФОРМ И ПОДВОДНЫХ ДОБЫЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования являются засасываемые сваи в составе фундаментов морских нефтегазовых платформ. Цели работы – анализ нормативной документации и поиск направлений для разработки методики определения устойчивости фундаментов с применением засасываемых свай.

Материалы и методы. Применен метод анализа публикаций и нормативной документации по теме как в России, так и за рубежом. Выполнены расчетные оценки, которые показали принципиальную возможность реализации предлагаемой авторами концепции.

Основные результаты. Рассмотрена история развития фундаментов морских нефтегазовых платформ, проанализирован мировой опыт применения засасываемых свай в качестве элементов фундаментов гравитационного типа для разных типов морских нефтегазовых сооружений, включая подводные добычные комплексы.

Заключение. В результате исследования определены основные направления в сфере проектирования фундаментов морских нефтегазовых платформ с применением засасываемых свай.

Ключевые слова: засасываемые сваи, морские нефтегазовые платформы, гравитационные фундаменты, морские добычные комплексы, гидротехническое строительство.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 622.276.04+624.154:626
EDN: KKHSFE

A.V. Pyanov¹ , A.A. Gunya¹ , A.A. Burova¹ , A.A. Gofman² 

¹ CDB Coral JSC, Sevastopol, Russia

² Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

PROSPECTS FOR THE USE OF SUCTION PILES IN THE CONSTRUCTION OF FIXED PLATFORMS AND SUBSEA PRODUCTION SYSTEMS

Object and purpose of research. This paper discusses suction piles as parts of foundations for marine oil and gas platforms. The purposes of this study were to analyze existing regulatory basis, as well as to outline possible new fields for developing a procedure intended to determine structural stability of suction pile-based foundations.

Materials and methods. The paper analyses available publications and regulatory documents, both in Russia and internationally. The viability of the concept suggested by the authors has been confirmed by calculations.

Main results. The paper outlines the history of foundation designs for marine oil and gas platforms, analyzing international experience of applying suction piles in gravity-based foundations for various types of marine oil and gas platforms, including subsea production facilities.

Conclusion. The study outlined main fields for further design activities in suction pile-based foundations of marine oil and gas platforms.

Keywords: suction piles, marine oil and gas platforms, gravity-based foundations, marine production facilities, offshore development.

The authors declare no conflicts of interest.

Для цитирования: Пьянов А.В., Гуня А.А., Бурова А.А., Гофман А.А. Перспективы применения засасываемых свай при строительстве морских стационарных платформ и подводных добычных комплексов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 1(407): 169–178.

For citations: Pyanov A.V., Gunya A.A., Burova A.A., Gofman A.A. Prospects for the use of suction piles in the construction of fixed platforms and subsea production systems. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 1(407): 169–178 (in Russian).

Введение

Introduction

В настоящее время продолжается активное освоение месторождений континентального шельфа Российской Федерации, особенно его арктической части. Работы ведутся с применением морских платформ различного назначения и других технических средств. Добыча углеводородных запасов на шельфе замерзающих морей, несмотря на значительный прогресс в этой области, продолжает оставаться одной из самых сложных инженерно-технических задач.

Легкоизвлекаемых углеводородных ресурсов остается все меньше, а география освоения смещается в регионы со сложными метеорологическими, геологическими и другими неблагоприятными природными условиями.

При создании офшорных сооружений для таких регионов предпочтение, как правило, отдается свайному типу удержания. Несущая способность свай обеспечивается за счет трения грунта по боковой поверхности, сопротивления грунта под нижним концом и сил горизонтального отпора грунта.

Забивка свай является одним из самых затратных типов морских операций, т.к. это требует применения специальных технических средств и сопровождается значительными временными затратами, причем с увеличением глубины моря и глубины погружения свай стоимость работ существенно возрастает. Кроме того, в условиях ограниченного периода навигации существует риск несвоевременного завершения установки свайного фундамента, что в дальнейшем ставит под угрозу безопасность эксплуатации объекта.

Засасываемые сваи

Suction piles

Альтернативным вариантом обеспечения устойчивости и, как следствие, безопасности является применение в составе фундаментов свай засасываемого типа. Преимуществом таких свай является возможность их интеграции в конструкцию основания и возможность установки за одну морскую операцию, что потенциально может сократить продолжительность работ. При этом отсутствие необходимости привлечения плавучих кранов и свабойного оборудования значительно сокращает стоимость работ по установке сооружения на точку.

С точки зрения геотехники, фундамент с использованием засасываемых свай представляет собой переходное звено между фундаментами мелкозаложения и свайными фундаментами. В литературе встречаются такие термины, как «всасываемые сваи», «вакуумные сваи», «всасываемый кессон», «засасываемый анкер». В данной работе принят термин «засасываемые сваи» для свай, применяемых в составе фундаментов морских платформ, и «засасываемый якорь» для случая использования засасываемой сваи как части якорной системы удержания.

Первый опыт применения подобных конструкций связан с установкой гравитационных платформ в Северном море в 1970-х гг. и устройством «юбок», или ребристых конструкций на подошве фундаментов, погружаемых в грунтовое основание для повышения уровня устойчивости [1].

«Юбка» – стальные или железобетонные стенки, сооружаемые обычно по периметру опорной поверхности платформы в виде продолжения стенок и перегородок корпуса. Цель устройства подобных ребер заключается в обеспечении устойчивости и безопасности.

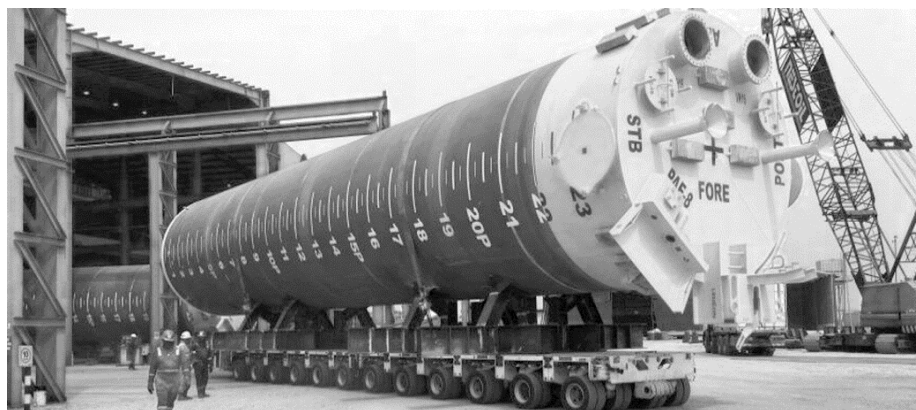


Рис. 1. Засасываемая свая

Fig. 1. Suction pile

печении лучшего сопряжения опорной поверхности сооружения с грунтом и частичной передаче нагрузки на залегающие ниже более прочные слои грунтового основания.

В классическом виде засасываемая свая появилась в 1990-х гг. [2]. Она представляет собой пустотелый цилиндр (оболочку), нижний конец которого открыт и имеет заостренные кромки. В верхней части сваи расположена крышка со встроенными клапанами и эжекторами, предназначенными для откачки воды из внутренней полости оболочки. Пример внешнего вида засасываемой сваи представлен на рис. 1.

Первоначально, при погружении засасываемой сваи на дно, клапаны открыты, и давление снаружи и внутри цилиндра одинаково. На начальном этапе погружение сваи в грунт происходит за счет собственного веса. Когда указанное погружение прекращается, клапаны закрываются и с помощью насосов внутри засасываемой сваи создается пониженное давление. Возникшая разница давлений на внешней и внутренней частях сваи и позволяет устанавливать ее на необходимую глубину [3].

Засасываемые сваи в современном виде сначала использовались в качестве якорей для плавучих сооружений. В дальнейшем они получили развитие в морской нефтегазовой промышленности, включая морские платформы.

Первым значимым положительным опытом применения засасываемых свай была установка железобетонного основания платформы Gullfaks C в Северном море в 1989 г. [1]. В конструкции гравитационного фундамента применялись длинные

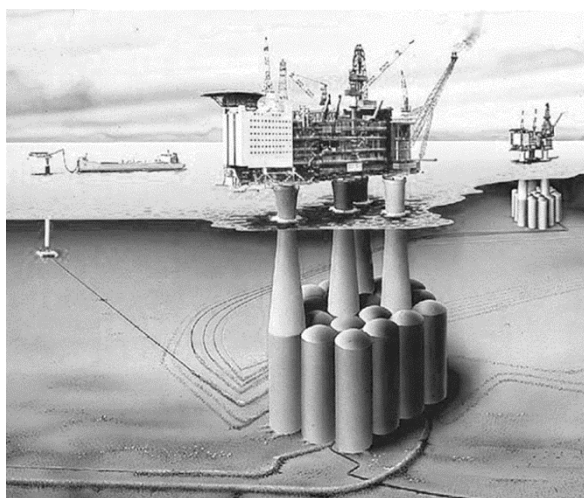


Рис. 2. Конструкция платформы Gullfaks C
Fig. 2. Gullfaks C oil platform

стенки «юбки», которые работали в качестве свай. 16 «обочных свай» большого диаметра заглублялись на 22 м в мягкий глинистый грунт, их установка обеспечивалась весом платформы и засасыванием (рис. 2).

В 1990-х гг., с перемещением добычи в более глубоководные регионы, фундаменты с применением засасываемых свай постепенно стали предпочтительным вариантом опорных оснований морских нефтегазовых сооружений.

Платформа Draupner E (рис. 3) в норвежском секторе Северного моря – первая в мире нефтяная платформа с основанием типа «джекет», в составе

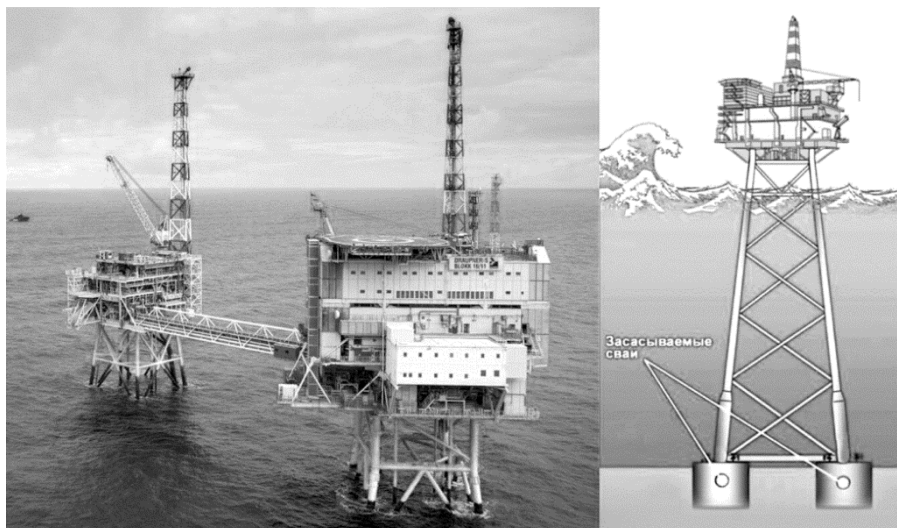


Рис. 3. Нефтяная платформа Draupner E

Fig. 3. Draupner E oil platform

которого применены засасываемые сваи. Также впервые основание такого типа было установлено в песчаном грунте [2].

1 января 1995 г., во время шторма, акселерометры на верхней палубе и в опорном основании платформы внезапно зарегистрировали мощное внешнее воздействие, это оказалась волна-убийца высотой 25,6 м. В дальнейшем расчеты показали, что засасываемые сваи фундамента сместились всего на 10 мм по горизонтали и на 5 мм по вертикали [3].

Опорное основание платформы Yolla A, установленной в 2004 г. на шельфе Австралии в Тиморском море [4], представляет собой «юбочный» фундамент размером 50×50 м, ребра которого уходят на 5 м в морское дно. Глубина моря на площадке платформы Yolla A составляет порядка 80 м, верхние слои грунта состоят в основном из очень мягкого карбонатного ила. Ребра «юбки» делят основание на 12 отсеков, установка осуществляется с помощью засасывания.

Фундамент Yolla A считается первым фундаментом такого типа (с глубокими «юбками» и без применения балласта), установленным в карбонатный грунт, ранее в таких масштабах в карбонатных грунтах засасывание не применялось. Для обеспечения надлежащей устойчивости фундамента на весь срок эксплуатации в проекте был учтен эффект консолидации грунта.

К 2005 г. в сфере морской нефтегазодобычи был накоплен опыт установки 485 одиночных засасываемых свай на более чем 50 месторождениях по всему миру, с глубинами моря вплоть до 2000 м [5].

В 2010-х гг. фундаменты с применением засасываемых свай начали применять в сфере морских ветряных турбин. Компания Dong Energy установила первый «джекет» с засасываемыми сваями для своего проекта Borkum Riffgrund 1 в 2014 г. как тестовый и демонстрационный объект, поддержанный компанией Carbon Trust в рамках программы Offshore Wind Accelerator (OWA) в Великобритании [1].

К 2020 г. в мире насчитывалось более 40 установленных «джекетов», имеющих в конструкции засасываемые сваи, более 500 свайных фундаментов такого типа применялись в сфере добычи нефти и газа, а также возобновляемой энергетики [1]. В Европе к концу 2020 г. в конструкции фундаментов 80 % морских ветряных турбин использовалась технология засасываемых свай [6].

Засасываемые сваи устанавливаются во многих глубоководных районах добычи нефти по всему миру: Северном море, Мексиканском заливе, на шельфе Западной Африки, на шельфе Бразилии,

к западу от Шетландских островов, в Южно-Китайском, Адриатическом, Средиземном и Тиморском морях. География использования засасываемых свай постоянно растет.

Технология с применением засасываемых свай сегодня прочно утвердилась среди методов, используемых при освоении месторождений и добыче углеводородного сырья.

Преимущества засасываемых свай:

- могут быть интегрированы в конструкцию опорного основания платформы и установлены за одну морскую операцию, что потенциально сокращает время работ;
- не требуется сваебойное оборудование, что также снижает стоимость работ (требуются насосы, но они обычно более доступны и легче в обращении, чем свайные молоты);
- площадь опирания фундамента намного меньше, чем у полностью гравитационного типа основания, что позволяет устанавливать платформы с меньшей подготовкой грунтового основания или полностью без нее;
- в конце срока службы платформа может быть полностью удалена с морского дна действиями, обратными процессу установки.

Основные недостатки засасываемых свай:

- недостаточно развита нормативная база, особенно в Российской Федерации;
- особенно чувствительны к грунтовым условиям, и даже относительно небольшие неточности в определении состава грунта или параметров его прочности могут оказать значительное влияние на конструкцию такого фундамента.

Можно с уверенностью говорить, что применение засасываемых свай является апробированным в мировой практике решением, однако в России на данный момент нет ни спроектированных, ни построенных отечественных образцов таких технических средств.

Подводные добычные комплексы

Subsea production systems

Освоение многих морских нефтяных и газовых месторождений, расположенных в российской зоне арктического шельфа, предполагает возможность использования способа подводного обустройства месторождений. Речь идет о применении подводных добычных систем на основе подводно-устьевых добычных комплексов (ПДК) как наиболее перспективных объектов для круглогодичной эксплуатации

в районах с крайне неблагоприятными гидрометеорологическими условиями: низкими температурами, наличием ледяных полей, торосов и др.

Чаще всего конструкции подводных добычных комплексов закрепляются на дне с помощью засасываемых свай. Пример донных конструкций представлен на рис. 4.

В Российской Федерации технологии подводных добычных комплексов впервые применило ПАО «Газпром». С помощью ПДК общество успешно производит добычу на Киринском газоконденсатном месторождении (ГКМ) в Охотском море в рамках проекта Сахалин-3 [7]. Концептуальные проработки обустройства Штокмановского газоконденсатного месторождения (ГКМ) на шельфе Баренцева моря также основывались на применении подводных добычных технологий [8].

Преимущества применения засасываемых свай в составе фундаментов подводных добычных комплексов следующие:

- не требуется забивка свай, основная по трудоемкости морская операция (на рис. 5 – пример установки донной конструкции при помощи крана);
- затраты на изготовление самой донной конструкции значительно снижаются, поскольку не требуются свайные направляющие, ловители и центраторы;
- за счет попеременного засасывания каждой сваи возможно обеспечить выравнивание конструкции с точностью не менее $0,25^\circ$.

Конструктивно фундамент донной конструкции подводного добычного комплекса состоит из нескольких фундаментов мелкого заложения, жестко связанных между собой. Вертикальная и горизонтальная несущая способность системы фундаментов мелкого заложения больше по сравнению с одним фундаментом эквивалентной площади, однако структурная жесткость системы фундаментов повышает ее способность к опрокидыванию. Установленной процедуры расчета устойчивости систем таких фундаментов не существует, используются различные методы с учетом опыта проектанта, широко применяются методы конечных элементов [9].

Нормативная документация для засасываемых свай

Suction piles Rules and Standards

Основной проблемой развития технологии строительства объектов с применением засасываемых свай является недостаточно развитая база норма-

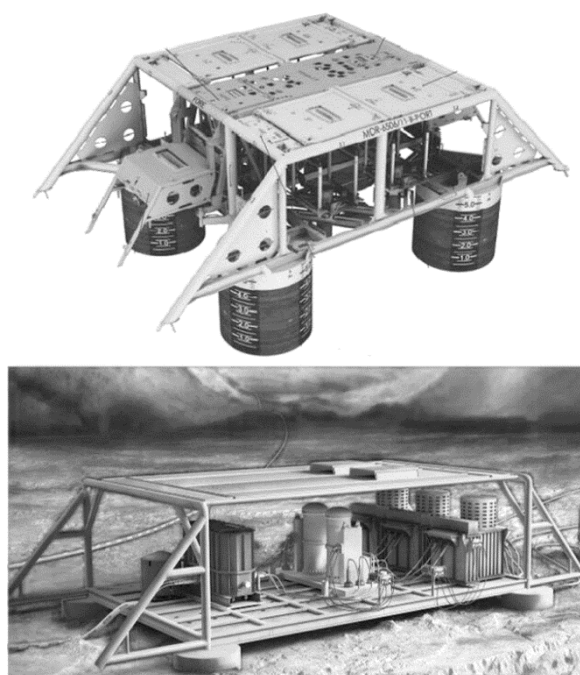


Рис. 4. Пример донных конструкций с использованием засасываемых свай

Fig. 4. Example of seabed structures with suction piles

тивных методик определения их несущей способности и возможности заглубления в грунт.

Ключевыми нормативными документами в области проектирования фундаментов морских нефтегазовых сооружений являются Geotechnical and foundation design considerations: ANSI/API recommended practice 2GEO [10]; ISO 19901-4:2016



Рис. 5. Установка донной конструкции при помощи крана

Fig. 5. Installing seabed structure by crane

ISO 19901-4:2016. Petroleum and natural gas industries. Specific requirements for offshore structures. Pt. 4: Geotechnical and foundation design considerations [11]; а также DNVGL-RP-C212 Offshore soil mechanics and geotechnical engineering [12]. В отношении расчета свайных фундаментов обычного типа эти три стандарта равнозначны, методики расчета устойчивости гравитационных фундаментов мелкого заложения API/ISO и DNVGL также однотипны.

В основной части API RP 2GEO упомянуто применение засасываемых свай в качестве элементов фундаментов нефтегазопромысловых сооружений, включая подводные добычные комплексы, однако конкретных методик по расчету их устойчивости не дается. Засасываемым якорям уделено несколько пунктов справочного приложения. Приведены формулы для выполнения расчетов заглубления, извлечения и устойчивости аналитическими методами, даны рекомендации по применению метода конечных элементов. Формулы позволяют выполнять расчеты для одиночного засасываемого якоря и не предназначены для проектирования фундаментов с использованием засасываемых свай.

В ISO 19001-4 применяется аналогичный подход, фундаменты с засасываемыми сваями напрямую не нормируются, однако ведутся работы по внедрению норм для т.н. intermediate foundations, к которым авторы стандарта относят фундаменты с применением засасываемых свай, в следующую редакцию правил [9].

В Российской Федерации основным руководящим документом в области проектирования фундаментов для морских нефтегазопромысловых сооружений является национальный стандарт РФ ГОСТ Р 59995-2022 «Нефтяная и газовая промышленность. Сооружения нефтегазопромысловые морские. Геотехнические и расчетные аспекты проектирования фундаментов» [13], основанный на стандарте ISO 19901-4:2016 с незначительными изменениями. Кроме того, в случае отнесения морской нефтегазовой платформы к гидротехническим сооружениям, к ней применим СП 23.13330.2018 «Основания гидротехнических сооружений» [14]. В данном своде правил рассматриваются только расчеты потери устойчивости гравитационных сооружений по схемам плоского, смешанного и глубинного сдвигов.

Нормы проектирования DNV-RP-E303 Geotechnical design and installation of suction anchors in clay [15], рекомендованы DNV для использования при

проектировании засасываемых якорей в глине. Они определяют общие требования, но не являются руководством в отношении того, какие правила проектирования должны соблюдаться и какие коэффициенты безопасности должны использоваться при проектировании засасываемых якорей.

Формулы DNV-RP-E303 содержат допущение, что засасываемые сваи в роли якорей подвергаются в основном горизонтальным внешним нагрузкам и гидростатической подъемной силе. При использовании засасываемых свай в качестве элементов фундамента морского сооружения имеет значение также его способность сопротивляться воздействию вертикальных нагрузок, а также возможность потери несущей способности вследствие воздействия опрокидывающих моментов. В расчетах сеймики также приобретают значение и крутящие нагрузки [16].

На основе норм DNV-RP-E303 ООО «Газпром 335» разработан проект национального стандарта РФ в области проектирования засасываемых свай для систем подводной добычи, в данный момент документ завершает стадию согласования.

Авторские методики расчета установки засасываемых свай в глине [17] и песке [18] вошли в состав проекта руководящего документа по проектированию фундаментов ветрогенераторов с применением засасываемых свай, разработанного в рамках совместной программы Offshore wind accelerator (OWA) [19].

Если же говорить о полноценных методиках для проектирования оснований нефтегазовых сооружений с фундаментами такого типа, то сегодня отсутствуют как в отечественной, так и в зарубежной практике.

Проектирование фундаментов с применением засасываемых свай

Suction piles foundation design

Геотехническое проектирование фундамента с применением засасываемых свай включает пять основных шагов [20]:

- 1) оценка расчетных параметров грунта для заданных граничных условий, т.е. условий нагрузки, геометрии фундамента, слоев грунта;
- 2) оценка устойчивости фундамента к кратковременным и долгосрочным нагрузкам;
- 3) прогнозирование сопротивления заглублению и величины необходимого давления засасывания;

- 4) оценка работоспособности, т.е. краткосрочная и долгосрочная осадка, перемещение и вращение;
- 5) расчет несущей способности фундамента с учетом соответствующих реакций грунта.

Данные расчетные задачи взаимосвязаны и обычно должны решаться итеративным способом, чтобы оптимизировать геометрию засасываемой сваи.

Несущую способность засасываемых свай можно определять аналитическими методами (в частности, методом предельного равновесия), методами теории пластичности или при помощи анализа методом конечных элементов [21]. Часть из этих методов уже вошла в нормативные документы, упомянутые выше, а часть является экспериментальными и их следует применять с учетом опыта проектанта.

Широкое использование в определении несущей способности фундаментов морских сооружений получили методы конечных элементов, в частности, реализованные в программных комплексах PLAXIS 3D, ABAQUS и др.

При установке фундаментов гравитационного типа цель состоит в том, чтобы как можно сильнее их заглубить, чтобы максимизировать несущую способность. Это связано с тем, что грунт обычно упрочняется (и, следовательно, удельные значения несущей способности увеличиваются) с глубиной. Однако для засасываемых свай решающими являются соображения их установки. Если может быть приложено бесконечно большое разрежение, а целостность материала сваи не нарушается, то критериями прекращения заглубления обычно являются разжижение грунтовой пробки (для песка) или потеря несущей способности грунта (для глины).

Заглубление в грунт и извлечение могут быть проанализированы методом предельного равновесия, обеспечивающим равновесие между расчетными нагрузками и расчетным сопротивлением [9]. В таком случае, кроме заглубления под собственным весом, учитывают заглубление при помощи засасывания, зависящее от создаваемого насосами давления разрежения [15].

Стоит помнить, что выбор неподходящей модели грунта и его расчетных параметров при проектировании может привести к следующим последствиям:

- потере целостности конструкции;
- недостаточному заглублению при установке и, как следствие, повышению необходимого давления засасывания;
- чрезмерному заглублению от собственного веса;
- чрезмерному наклону и повороту, высоким суммарным и относительным перемещениям.

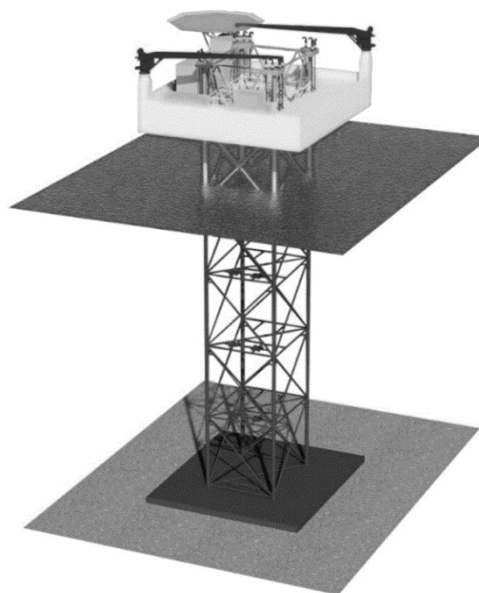


Рис. 6. Морская платформа с комбинированным типом удержания

Fig. 6. Marine platform with combined mooring system

В рамках выполнения работ для одного из участков недр на шельфе Черного моря, где характерным фактором при выборе решений являются сложные геологические условия, такие как слабые грунты и высокая сейсмическая активность, АО «ЦКБ «Коралл» предложило новое решение обустройства: морская платформа с опорой на грунт с комбинированным способом удержания, использующим в своем составе засасываемые сваи. Это решение обусловлено тем, что в данный момент ни свайные, ни гравитационные платформы не могут быть применены в рассматриваемом регионе: первые – из-за отсутствия необходимых технических средств, вторые – из-за слабых грунтов. Именно поэтому для обеспечения устойчивости платформы был выбран комбинированный тип удержания: за счет сил собственного веса, применения «юбки» и засасываемых свай (рис. 6).

Применение засасываемых свай в рассматриваемых условиях позволяет увеличить величину вдавливания «юбки» в грунт и тем самым улучшить параметры устойчивости сооружения. Для большего контроля над положением основания предусматривается размещение засасываемых свай на максимальном удалении друг от друга. Такая конструкция позволит эффективно бороться с возможными наклонами основания и поддерживать горизонтальность верхнего строения.

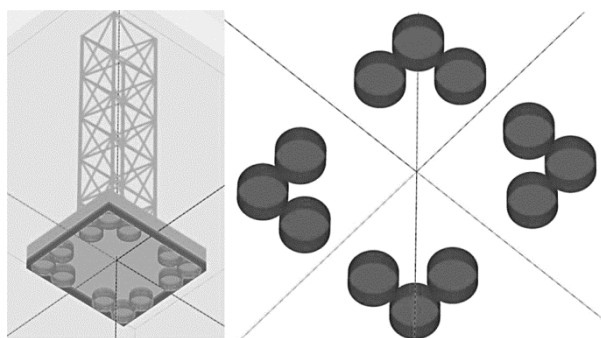


Рис. 7. Расчетная модель с «юбкой» и засасываемыми сваями

Fig. 7. Design model with skirt and suction piles

Также для оценки параметров устойчивости в геотехническом конечно-элементном программном комплексе была подготовлена расчетная модель с четырьмя группами засасываемых свай (рис. 7).

Выполненные расчетные оценки показали принципиальную возможность реализации данной концепции, а также высокий потенциал оптимизации конструкции опорной части как в части размещения ячеек с засасываемыми сваями, так и в части габаритных размеров.

Заключение

Conclusion

Нет сомнений в том, что добыча углеводородного сырья в России будет смещаться в районы Крайнего Севера, что потребует применения новых подходов к обеспечению безопасности и новых способов строительства объектов освоения шельфа.

Засасываемые сваи обладают рядом преимуществ по сравнению с обычными морскими фундаментами, в частности, для районов, где отсутствуют технические средства для забивки свай и невозможно применение гравитационных платформ.

Учитывая высокий потенциал развития данного направления и преимущества применения таких фундаментов, АО «ЦКБ «Коралл» продолжает движение в данном направлении и разрабатывает собственные подходы к проектированию фундаментов с применением засасываемых свай.

Список использованной литературы

1. *Tjelta T.I.* The suction foundation technology // *Frontiers in offshore geotechnics III* : proceedings of Third International symposium on frontiers in offshore geotechnics

(ISFOG 2015). Boca Raton [et al.] : Balkema book, 2015. Vol. 1. P. 85–93.

2. *Randolph M.F., Gourvenec S.M.* Offshore Geotechnical Engineering. Abingdon : Spon Press, 2011. XXX, 528 p.

3. *Левачев С.Н., Халецкий В.С.* Всасываемые сваи в современном гидротехническом строительстве // *Вестник МГСУ*. 2013. № 9. С. 86–94.

4. *Watson P.G., Humpheson C.* Geotechnical interpretation for the Yolla A Platform // *Frontiers in offshore geotechnics : proceedings of 1st International symposium on frontiers in offshore geotechnics (ISFOG 2005)*. London : Taylor and Francis, 2005. P. 343–349.

5. Suction anchors for deepwater applications / *Anderesen K.H., Murff J.D., Randolph M.F.* [et al.] // *Frontiers in offshore geotechnics : proceedings of 1st International symposium on frontiers in offshore geotechnics (ISFOG 2005)*. London : Taylor and Francis, 2005. P. 3–30.

6. *Ramírez L., Fraile D., Brindley G.* Offshore wind in Europe. Key trends and statistics 2020. Brussels, 2021. 36 p. URL: <https://windeurope.org/data-and-analysis/product/offshore-wind-in-europe-key-trends-and-statistics-2020> (accessed: 19.01.2024).

7. «Сахалин третий» – первый подводный // *Sakhalin.info* : [сайт]. Южно-Сахалинск, 2021. URL: <https://sakhalin.info/weekly/211474> (дата обращения: 13.11.2023).

8. *Сочнева И.О., Сочнев О.Я.* Эволюция технических решений для Штокмановского ГКМ и современный взгляд на его обустройство // *Neftegaz.RU*. 2021. № 4. С. 74–83.

9. *Intermediate Offshore Foundations* / *Kay S., Gourvenec S., Palix E., Alderlieste E.* Boca Raton ; London ; New York : CRC, 2021. 334 p.

10. *Geotechnical and foundation design considerations : ANSI/API recommended practice 2GEO*. Washington : American Petroleum Institute, 2021. 136 p.

11. ISO 19901-4:2016. Petroleum and natural gas industries. Specific requirements for offshore structures. Pt. 4: Geotechnical and foundation design considerations. Geneva : ISO, 2016. VII, 175 p.

12. *DNV-RP-C212. Offshore soil mechanics and geotechnical engineering : Recommended Practice*. 19th ed. [S.l.] : Det Norske Veritas, 2021. 106 p.

13. ГОСТ Р 59995-2022 (ИСО 19901-4:2016). Нефтяная и газовая промышленность. Сооружения нефтегазопромысловые морские. Геотехнические и расчетные аспекты проектирования фундаментов. Москва : Рос. ин-т стандартизации, 2022. IV, 163 с.

14. *DNV-RP-E303. Geotechnical design and installation of suction anchors in clay : Recommended Practice*. 17th ed. [S.l.] : Det Norske Veritas, 2021. 28 p.

15. СП 23.13330.2018. Основания гидротехнических сооружений : актуализир. ред. СНиП 2.02.02-85. Москва : Стандартинформ, 2019. V, 95 с.
16. *Bughi S., Parker E.* Suction pile foundations: experience in the Mediterranean offshore and installation feedback // Proceedings of ASME 30th International Conference on ocean, offshore and arctic engineering. New York, 2011. Vol. 7. P. OMAE2011-49871, p. 951–963. DOI: 10.1115/OMAE2011-49871.
17. *Houlsby G.T., Byrne B.W.* Design procedures for installation of suction caissons in clay and other materials // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Geotechnical Engineering. 2005. Vol. 158, № 2. P. 75–82. DOI: 10.1680/geng.2005.158.2.75.
18. *Houlsby G.T., Byrne B.W.* Design procedures for installation of suction caissons in sand // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Geotechnical Engineering. 2005. Vol. 158, № 3. P. 135–144. DOI: 10.1680/geng.2005.158.3.135.
19. Suction installed caisson foundations for offshore wind: design guidelines. [S. l. : Carbon Trust], 2019. X, 103 p. (Offshore Wind Accelerator).
20. *Sturm H.* Design aspects of suction caissons for offshore wind turbine foundations // Proceedings of the 19th International conference on soil mechanics and geotechnical engineering. London : ICSMGE, 2017. P. 45–63.
21. Analysis of pile foundations subject to static and dynamic loading / Ed. *Kaynia A.M.* Boca Raton [et al.] : Balkema book, 2021. X, 354 p.
6. *Ramírez L., Fraile D., Brindley G.* Offshore wind in Europe. Key trends and statistics 2020. Brussels, 2021. 36 p. URL: <https://windeurope.org/data-and-analysis/product/offshore-wind-in-europe-key-trends-and-statistics-2020> (accessed: 19.01.2024).
7. “Sakhalin third” – first underwater one // Sakhalin.info : [web site]. Yuzhno-Sakhalinsk, 2021. URL: <https://sakhalin.info/weekly/211474> (Accessed: 13.11.2023) (*in Russian*).
8. *Sochneva I., Sochnev O.* Evolution of technical solutions for the Shtokman gas field and a modern view of its development // Neftegaz.RU. 2021. No. 4. P. 74–83 (*in Russian*).
9. Intermediate Offshore Foundations / *Kay S., Gourvenec S., Palix E., Alderlieste E.* Boca Raton ; London ; New York : CRC, 2021. 334 p.
10. Geotechnical and foundation design considerations : ANSI/API recommended practice 2GEO. Washington : American Petroleum Institute, 2021. 136 p.
11. ISO 19901-4:2016. Petroleum and natural gas industries. Specific requirements for offshore structures. Pt. 4: Geotechnical and foundation design considerations. Geneva : ISO, 2016. VII, 175 p.
12. DNV-RP-C212. Offshore soil mechanics and geotechnical engineering : Recommended Practice. 19th ed. [S.l.] : Det Norske Veritas, 2021. 106 p.
13. GOST R 59995-2022 (ISO 19901-4:2016). Petroleum and natural gas industries. Offshore oil and gas facilities. Geotechnical and foundation design considerations. Moscow : Russian Institute of Standardization, 2022. 163 p. (*in Russian*).
14. DNV-RP-E303. Geotechnical design and installation of suction anchors in clay : Recommended Practice. 17th ed. [S.l.] : Det Norske Veritas, 2021. 28 p.
15. СП 23.13330.2018. Foundations of hydraulic structures. Updated version of the SNiP 2.02.02-85. Moscow : Standartinform, 2019. V, 95 p. (*in Russian*).
16. *Bughi S., Parker E.* Suction pile foundations: experience in the Mediterranean offshore and installation feedback // Proceedings of ASME 30th International Conference on ocean, offshore and arctic engineering. New York, 2011. Vol. 7. P. OMAE2011-49871, p. 951–963. DOI: 10.1115/OMAE2011-49871.
17. *Houlsby G.T., Byrne B.W.* Design procedures for installation of suction caissons in clay and other materials // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Geotechnical Engineering. 2005. Vol. 158, № 2. P. 75–82. DOI: 10.1680/geng.2005.158.2.75.
18. *Houlsby G.T., Byrne B.W.* Design procedures for installation of suction caissons in sand // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Geotechnical Engineering. 2005. Vol. 158, № 3. P. 135–144. DOI: 10.1680/geng.2005.158.3.135.

References

1. *Tjelta T.I.* The suction foundation technology // Frontiers in offshore geotechnics III : proceedings of Third International symposium on frontiers in offshore geotechnics (ISFOG 2015). Boca Raton [et al.] : Balkema book, 2015. Vol. 1. P. 85–93.
2. *Randolph M.F., Gourvenec S.M.* Offshore Geotechnical Engineering. Abingdon : Spon Press, 2011. XXX, 528 p.
3. *Levachev S., Khaletskiy V.* Suction Piles in the Present-day Hydraulic Engineering. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2013. No. 9. P. 86–94 (*in Russian*).
4. *Watson P.G., Humpheson C.* Geotechnical interpretation for the Yolla A Platform // Frontiers in offshore geotechnics : proceedings of 1st International symposium on frontiers in offshore geotechnics (ISFOG 2005). London : Taylor and Francis, 2005. P. 343–349.
5. Suction anchors for deepwater applications / *Anderesen K.H., Murff J.D., Randolph M.F.* [et al.] // Frontiers in offshore geotechnics : proceedings of 1st International symposium on frontiers in offshore geotechnics (ISFOG 2005). London : Taylor and Francis, 2005. P. 3–30.

19. Suction installed caisson foundations for offshore wind: design guidelines. [S. I. : Carbon Trust], 2019. X, 103 p. (Offshore Wind Accelerator).
20. *Sturm H.* Design aspects of suction caissons for offshore wind turbine foundations // Proceedings of the 19th International conference on soil mechanics and geotechnical engineering. London : ICSMGE, 2017. P. 45–63.
21. Analysis of pile foundations subject to static and dynamic loading / Ed. *Kaynia A.M.* Boca Raton [et al.] : Balkema book, 2021. X, 354 p.

Сведения об авторах

Пьянов Андрей Владимирович, начальник общепроектного отдела АО «ЦКБ «Коралл». Адрес: 299045, Россия, Севастополь, ул. Репина, д. 1. E-mail: ryanov@cdbc Coral.ru. <https://orcid.org/0000-0002-0268-1124>.

Гуня Анастасия Александровна, инженер-конструктор 2-й категории общепроектного отдела АО «ЦКБ «Коралл». Адрес: 299045, Россия, Севастополь, ул. Репина, д. 1. E-mail: anastasia.a.g.1997@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0003-0514-2139>.

Бурова Александра Андреевна, инженер-конструктор 3-й категории общепроектного отдела АО «ЦКБ «Коралл». Адрес: 299045, Россия, Севастополь, ул. Репина, д. 1.

E-mail: sasahvalimova47246@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-4093-5911>.

Гофман Андрей Андреевич, доцент ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». Адрес: 299053, Россия, Севастополь, Университетская ул., д. 33. E-mail: aagofman@sevsu.ru. <https://orcid.org/0000-0001-6710-6705>.

About the authors

Andrey A. Pyanov, General Design Department Manager, CDB Coral JSC. Address: 1, Repina st., Sevastopol, Russia, post code 299045. E-mail: ryanov@cdbc Coral.ru. <https://orcid.org/0000-0002-0268-1124>.

Anastasia A. Gunya, 2nd Category General Design Engineer, CDB Coral JSC. Address: 1, Repina st., Sevastopol, Russia, post code 299045. E-mail: anastasia.a.g.1997@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0003-0514-2139>.

Aleksandra A. Burova, 3rd Category General Design Engineer, CDB Coral JSC. Address: 1, Repina st., Sevastopol, Russia, post code 299045. E-mail: sasahvalimova47246@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-4093-5911>.

Andrey A. Gofman, Ass. Prof., Sevastopol State University. Address: 33, Universitetskaya st., Sevastopol, Russia, post code 299053. E-mail: aagofman@sevsu.ru. <https://orcid.org/0000-0001-6710-6705>.

Поступила / Received: 29.11.23
Принята в печать / Accepted: 01.03.24
© Коллектив авторов, 2024