

Способы определения несущей способности опорных оснований морских платформ при геодинамических воздействиях в условиях повышенной нефтегазодобычи

С.С. Шубников, В.А. Перфилов

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград

Аннотация: В данной статье рассмотрены основные факторы, приводящие к понижению несущей способности опорных оснований и возможной потере устойчивости морской платформы, что повлечет за собой аварийные последствия. Проведена оценка влияния свободного газа в верхних разрезах грунта и динамических внешних нагрузок на безопасность строительства и эксплуатации нефтяных платформ. Были проанализированы расчеты на несущую способность свайного фундамента опорных оснований СПБУ «Астра» в Каспийском море, выполненные по существующим методикам. Определение прочности грунта осуществляется для расчетной опорной поверхности – сечения колонны, имеющего максимальную площадь.

Ключевые слова: геодинамические воздействия, несущая способность, свайный фундамент, глубина вдавливания, свободный газ.

При проведении поисково-разведочных изысканий для добычи нефти или газа в Каспийском море производят строительные работы по установке и эксплуатации передвижных нефтегазодобывающих платформ [1,2]. При эксплуатации морских платформ большое влияние оказывает воздействие волновых, ветровых, ледовых и сейсмических нагрузок, а также неглубокое расположение свободного газа в верхних слоях грунтов. Нефтегазовые объекты подвергаются критическим геодинамическим воздействиям, которые в особых неблагоприятных сочетаниях действуют в локальных местах, узлах конструкций, опорных колоннах, тем самым создавая аварийную обстановку на сооружении, что может привести к обрушению, потере устойчивости платформы [3,4].

Морские нефтегазовые сооружения принадлежат к повышенному классу ответственности и относятся к опасным промышленным объектам, что, в свою очередь, характеризует необходимость качественного выполнения всех мероприятий по обеспечению безопасности в режиме

работы платформы. На стадии проектирования морских платформ должны учитываться геодинамические риски, что является актуальной проблемой на данный момент.

Проведение строительных работ диктует необходимость создания мелкоосидающей самоподъемной плавучей буровой установки [5]. В качестве примера выбрана СПБУ «Астра», которая представлена на рисунке 1.

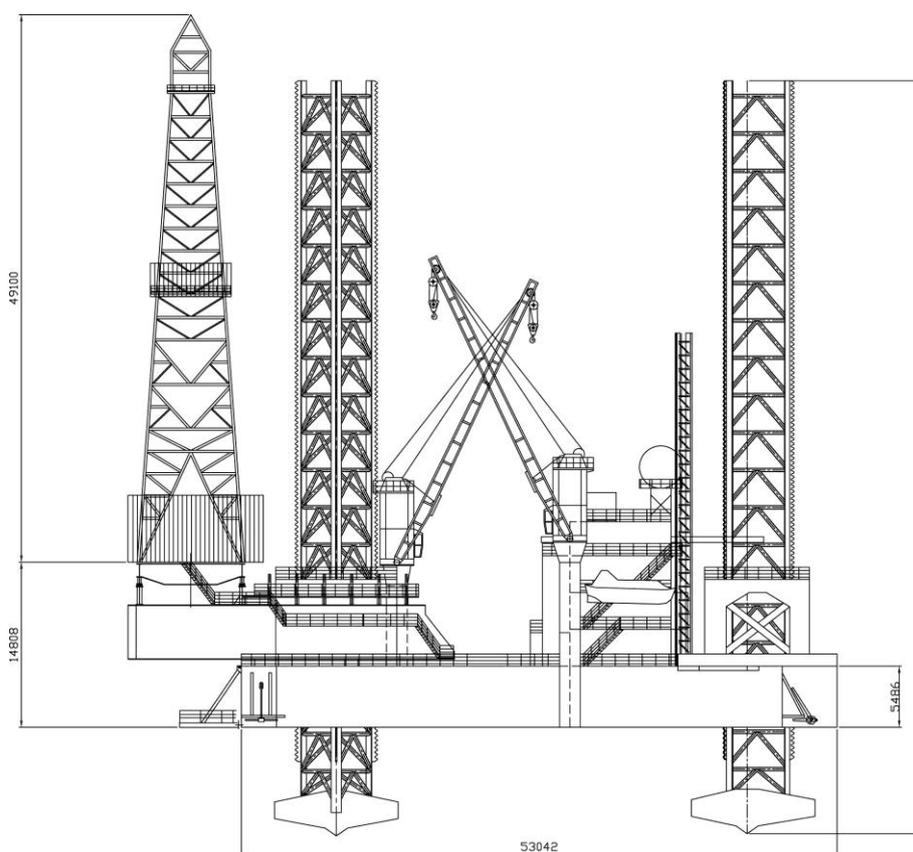


Рис. 1. Общий вид СПБУ «Астра».

Основные размеры платформы:

- длина корпуса 53,04м;
- ширина корпуса 53,6м;
- высота корпуса 5,49м.

Водоизмещение на плаву – 5365,2 т, осадка теоретическая – 3,2 м.

Опорные колонны ферменного типа треугольного в плане сечения оснащены опорными башмаками. Длина каждой колонны, включая высоту

башмака, составляет 67,51 м. Опорные башмаки имеют шестиугольную в плане форму, высота башмака составляет 3,05 м, площадь опорной поверхности – 77,4 м². Допустимая глубина погружения башмаков в грунт составляет 7 м. Расчетная ширина башмака – 8,8 м.

Безопасность постановки СПБУ и строительства верхнего интервала ствола скважины в данном месте подтверждена проведенными инженерно-геологическими изысканиями. Прогноз упруго-прочностных свойств придонных сейсмоопасных грунтов определяется геофизическими исследованиями [6-8].

В настоящее время по вопросу геодинамических воздействий проведено мало исследований, в российских стандартах имеются поверхностные упоминания, касающиеся, в основном, пластового давления [3], а воздействие свободного газа в верхних слоях грунта в процессе строительства платформ не учитывалось, за исключением его токсичности и взрывоопасности. Вследствие отсутствия нормативно-технической документации по определению комплексного влияния динамических воздействий и свободного газа в грунтах при проектировании, строительстве и эксплуатации морских нефтегазовых сооружений, актуальность данного направления является первостепенной.

На данный момент существует несколько способов определения несущей способности свайного фундамента, путем анализа которых можно выявить наиболее удачный метод, учитывающий всевозможные неблагоприятные условия, возникающие в грунтах (боковое давление на стенки, напряжения, глубина вдавливания свай, осадки и т.п.). Расчет выполнен с использованием программного комплекса «Plaxis 3D». Данный программный комплекс имеет сертификат соответствия РОСС NL.ME20.H02482 №1266179 от 18.03.2013 и основан на использовании

метода конечных элементов при расчете напряженно-деформированного состояния объекта в осложненных геотехнических условиях.

Самоподъемная плавучая буровая платформа, рассматриваемая в данной работе, проектировалась с учетом определения глубины вдавливания вертикальных колонн в грунт согласно рекомендациям РД 51.36-81 «Опорные колонны самоподъемной плавучей буровой установки. Методика расчета глубины задавливания в грунт». Находилась несущая способность грунта q , которая сравнивается с давлением башмака опоры платформы $q_{вд}$. При превышении нагрузки вдавливания прочности грунтового слоя происходит погружение опоры вглубь основания. Определение прочности грунта осуществляется для расчетной опорной поверхности – сечения колонны, имеющего максимальную площадь. Для башмака опорной колонны СПБУ «Астра», имеющего в нижней части пирамидальную пяту, положение расчетной опорной поверхности показано на рисунке 2.

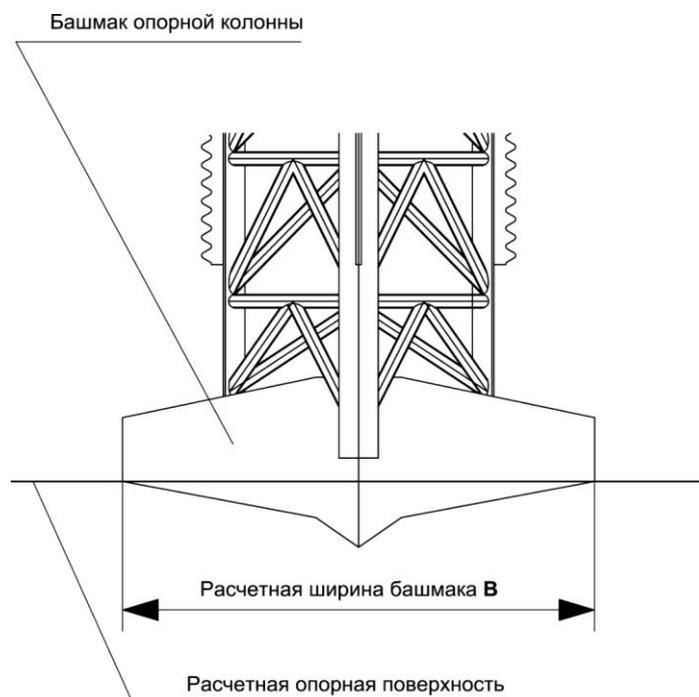


Рис. 2. Положение расчетной опорной поверхности для башмака опорной колонны СПБУ «Астра»

Расчетная ширина башмака определяется в соответствии с РД 51.36-81 (Приложение 2), по формуле:

$$\sqrt{F_{\text{опоры}}} = \sqrt{77.4\text{м}} = 8,8 \text{ м} \quad (1)$$

Несущая способность грунта q (Па) при задавливании расчетной опорной поверхности на глубину z (м) определяется по формуле [9]:

– для песчаных и глинистых грунтов I типа:

$$q = A_1 \cdot b \cdot \gamma_1 + B_1 \cdot q_{\text{п}} + C_1 \cdot c_1 \quad (2)$$

– для глинистых грунтов II типа:

$$q = A_2 \cdot b \cdot \gamma_1 + B_2 \cdot q_{\text{п}} \cdot \mu + C_2 \cdot c_1 \quad (3)$$

где: $A_1, B_1, C_1, A_2, B_2, C_2$ – коэффициенты, определяемые по таблице 1 РД 51.36.-81 в зависимости от расчетного угла внутреннего трения ϕ_1 рабочего слоя грунта;

c_1 – расчетная удельная сила сцепления (Па) рабочего слоя грунта;

γ_1 – расчетный объемный вес (кН/м^3) того же грунта, с учетом вытесненной им воды;

b – расчетная ширина башмака опорной колонны (м);

$q_{\text{п}}$ – природное давление (Па) от грунта, лежащего выше расчетной опорной поверхности колонны.

Таким образом, методика сводится к определению несущей способности каждого рабочего слоя и нахождению глубины, на которой начнет соблюдаться условие $q \geq q_{\text{зад}}$. После этого, определяется несущая способность нижележащих слоев до глубины $2b$. Для определения величины просадки слоя – данное условие проверяется в начале и в конце слабого слоя.

При определении несущей способности грунтового основания принимается, что ввиду возможных подмывов и деформаций верхних слоев

грунтовой толщии опирание на грунт не учитывается, таким образом, все нагрузки и воздействия воспринимаются исключительно сваями.

Другой способ включает расчет несущей способности грунта основания по методике API RP 2A-WSD [10], который имеет следующие этапы:

1. Несущая способность сваи, погружаемой без выемки грунта, работающей на сжимающую нагрузку, в соответствии с п.6.4.

2. Несущая способность сваи, погружаемой без выемки грунта, работающей на выдергивающую нагрузку, в соответствии с п.6.5.

3. Несущая способность сваи, погружаемой без выемки грунта, работающей на сжимающую нагрузку, в соответствии с п.6.4 API RP 2A-WSD [10].

Способ определения предельной несущей способности свай Q_d (F_d) осуществляется по уравнению [11]:

$$Q_d = Q_f + Q_p = f \cdot A_s + q \cdot A_p \quad (4)$$

где: Q_f – сопротивление поверхностного трения, кН;

Q_p – общая торцевая опорная нагрузка, кН;

f – удельное поверхностное трение, кПа;

A_s – площадь боковой поверхности сваи, m^2 ;

q – удельная торцевая опорная нагрузка, кПа;

A_p – общая площадь торца сваи, m^2 .

Для трубных свай в связанном грунте трение ствола f (поверхностное трение), кПа, в любой точке вдоль сваи можно рассчитать по уравнению:

$$f = \alpha \cdot c \quad (5)$$

где: α – размерный коэффициент;

c – прочность на сдвиг неосушенного грунта в рассматриваемой точке, кПа.

Коэффициент α можно рассчитать по следующим уравнениям:

$$\alpha = 0.5 \cdot \psi^{-0.5} \cdot \psi \leq 1.0 \quad (6)$$

$$\alpha = 0.5 \cdot \psi^{-0.25} \cdot \psi \geq 1.0 \quad (7)$$

с ограничением $\alpha \leq 1,0$,

где: $\Psi=c/p_0'$ в рассматриваемой точке;

p_0' – природное давление от грунта, кПа.

В работе были выполнены расчеты глубины вдавливания опорных колонн СПБУ «Астра» при стоянке на грунте в соответствии с требованиями РД 51.36-81 и API RP-2A WSD (рис. 3 и 4). Также выполнен расчет глубины вдавливания колонн с помощью программного комплекса Plaxis 3D Foundation.

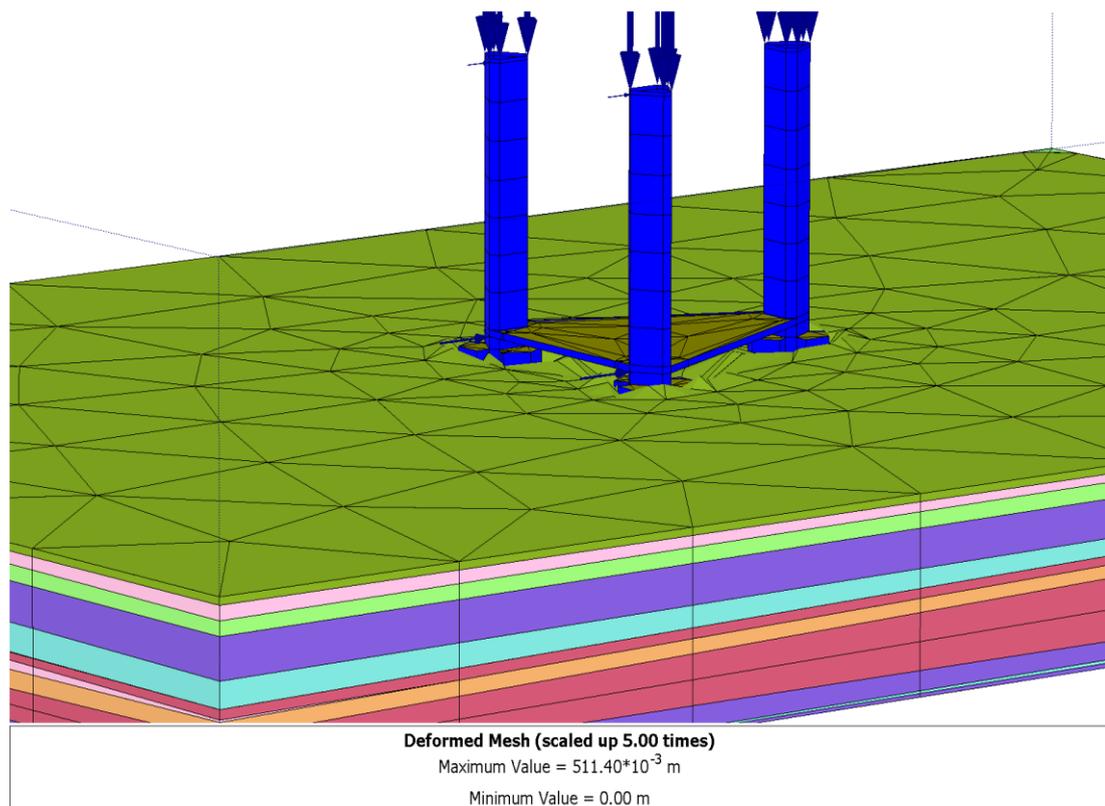


Рис. 3. – Осадка СПБУ «Астра» при воздействии с кормы по РД 51.36-81

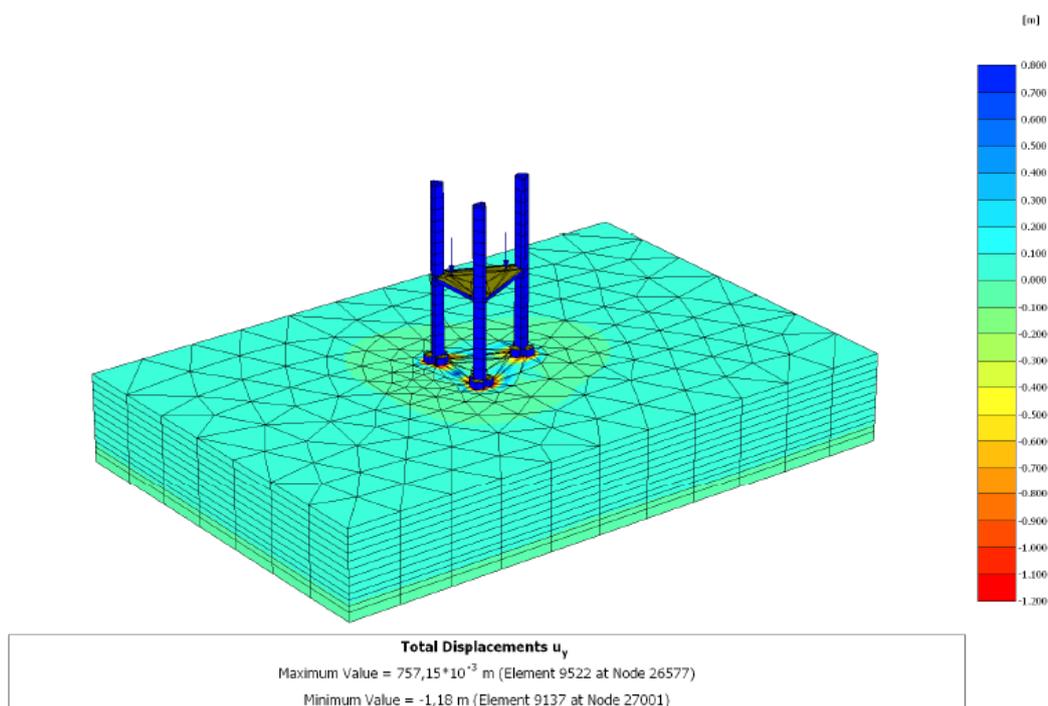


Рис. 4 – Осадка СПБУ «Астра» при воздействии с кормы по API RP 2A-WSD.

Результаты расчета глубины вдавливания приведены ниже в таблице 1.

Таблица 1

Результаты расчета глубины вдавливания опорных колонн

Методика	Максимальная величина пенетрации колонн, м
РД 51.36-81	от 4,6 до 12,1
API RP-2A WSD	До 12,1
Plaxis 3D	до 7,23

Вывод. В общем, можно заключить, что действие расчетных нагрузок основного и особого расчетных сочетаний (ветер, волнение и течение) не приводит к существенному перераспределению деформаций грунтового основания, крен СПБУ минимален, платформа сохраняет устойчивое

положение. Используя 2-е разнх методики ручного расчёта, а также применив ПК «Plaxis 3D», мы смогли учесть как влияние газоносности грунтов в верхних срезах, так и особые неблагоприятные сочетания нагрузок (динамические воздействия) на СПБУ.

Литература

1. Перфилов В.А., Ярошик В.В., Буров А.М., Луговая В.А., Душко О.В., Шестаков С.А. Проектирование и строительство морских нефтегазовых сооружений: Учебник в 2-х частях / Волгоградский государственный технический университет. Том Часть 2. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2018. – 305 с.
2. Харламов Р.И., Перфилов В.А. Строительство плавучих железобетонных морских сооружений для сжижения природного газа // Инженерный вестник Дона. - 2023. - № 10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2023/8720.
3. Маштаков А.С. Инженерно-геологические аспекты обеспечения устойчивости инженерных сооружений месторождений Каспийского моря: на примере нефтяных платформ: автореферат дис. ... кандидата геолого-минералогических наук: 25.00.08 / Маштаков Александр Сергеевич; [Место защиты: Рос. гос. геологоразведоч. ун-т им. С. Орджоникидзе (РГГРУ)]. - Москва, 2015. - 19 с.
4. Randolph M.F., Gaudin C., Gourvenec S.M., White David J., Boylan Noel, Cassidy Mark J. Recent Advances in Offshore Geotechnics for Deep Water Oil and Gas Developments // Ocean Engineering. – 2011. – № 38. – P. 818–834.
5. Халикова Д.Ф., Крупнов Г.К., Обидин Ю.И., Григорьев А.М., Гушин И.В., Алисейчик А.А., Лившиц Б.Р. Самоподъемные плавучие буровые

- установки: история, современность, перспективы. Аналитический обзор. – СПб: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2013. – 206 с.
6. Пирогова А.С., Тихоцкий С.А., Токарев М.Ю., Сучкова А.В. Прогноз упруго-прочностных свойств придонных грунтов на основе инверсии данных сейсморазведки сверхвысокого и ультравысокого разрешения // Геофизические процессы и биосфера. – 2019. – Т. 18. – № 4. – С. 191–202.
 7. Hossain M.S, Hu Y., Randolph M.F. White Limiting Cavity Depth for Spudcan Foundations Penetrating Clay // Geotechnique. – 2005. – V. 55. – No. 9. – P. 679–690.
 8. Жур В.Н. Определение несущей способности в грунтовых условиях II типа по просадочности свай по фондовым материалам полевых испытаний свай статической нагрузкой // Инженерный вестник Дона. 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2144
 9. Никитин Б.А., Мирзоев Д.А. Методические указания по расчёту глубины задавливания в грунт опорных колонн СПБУ. - Москва: РГУ Нефти и газа им. И.М. Губкина, 2000. — 19 с.
 10. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design (API RP 2A-WSD), American Petroleum Institute, Washington, 2000. 292 p.
 11. Исаев О.Н., Волков Ф.Е., Минкин М.А. Определение несущей способности свай в пластично-мерзлых грунтах статическим зондированием // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1987, №5, с.17-19.

References

1. Perfilov V.A., YArshik V.V., Burov A.M., Lugovaya V.A., Dushko O.V., SHestakov S.A. Proektirovanie i stroitel'stvo morskikh neftegazovyh sooruzhenij
-



- [Design and construction of offshore oil and gas facilities]: Uchebnik v 2-h chastyah. Volgogradskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet. Tom CHast' 2. Volgograd: Volgogradskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2018. 305 p.
2. Harlamov R.I., Perfilov V.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. № 10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2023/8720.
 3. Mashtakov A.S. Inzhenerno-geologicheskie aspekty obespecheniya ustojchivosti inzhenernyh sooruzhenij mestorozhdenij Kaspijskogo morya: na primere neftyanyh platform [Engineering and geological aspects of ensuring the stability of engineering structures of the Caspian Sea fields: on the example of oil platforms]: avtoreferat dis. ... kandidata geologo-mineralogicheskikh nauk: 25.00.08 Mashtakov Aleksandr Sergeevich; [Mesto zashchity: Ros. gos. geologorazvedoch. un-t im. S. Ordzhonikidze (RGGRU)]. Moskva, 2015. 19 p.
 4. Randolph M.F., Gaudin C., Gourvenec S.M., White David J., Boylan Noel, Cassidy Mark J. Ocean Engineering. 2011. № 38. pp. 818–834.
 5. Halikova D.F., Krupnov G.K., Obidin YU.I., Grigor'ev A.M., Gushchin I.V., Alisejchik A.A., Livshic B.R. Samopod'emnye plavuchie burovye ustanovki: istoriya, sovremennost', perspektivy. Analiticheskij obzor. [Self-lifting floating drilling rigs: history, modernity, prospects. Analytical review]. SPb: FGUP «Krylovskij gosudarstvennyj nauchnyj centr», 2013. 206 p.
 6. Pirogova A.S., Tihockij S.A., Tokarev M.YU., Suchkova A.V. Geofizicheskie processy i biosfera. 2019. T. 18. № 4. pp. 191–202.
 7. Hossain M.S, Hu Y., Randolph M.F. Geotechnique. 2005. V. 55. No. 9. P. 679–690.
 8. ZHur V.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2144
 9. Nikitin B.A., Mirzoev D.A. Metodicheskie ukazaniya po raschyotu glubiny zadavlivaniya v grunt opornyh kolonn SPBU. [Methodological guidelines for
-



calculating the depth of crushing into the ground of the support columns of the SPBU] Moskva: RGU Nefti i gaza im. I.M. Gubkina, 2000. 19 p.

10. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design (API RP 2A-WSD), American Petroleum Institute, Washington, 2000. 292 p.

11. Isaev O.N., Volkov F.E., Minkin M.A. Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. 1987, №5, pp.17-19.

Дата поступления: 15.02.2024

Дата публикации: 5.04.2024