

УДК: 624.042.7

Численная модель механического отклика самоподъемной плавучей буровой установки на сейсмические воздействия

И. А. Васильев^{1,a}, Н. В. Дубиня^{1,2,b}, С. А. Тихоцкий^{1,2,c}, В. А. Начев^{1,3,d},
Д. А. Алексеев^{1,e}

¹Московский физико-технический институт,
Россия, 141701, Московская область, Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9

²Институт физики земли им. О. Ю. Шмидта РАН,
Россия, 123242, Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1

³Институт динамики геосфер им. академика М. А. Садовского РАН,
Россия, 119334, Москва, Ленинский проспект, д. 38, корп. 1

E-mail: ^a vasilev.ivan@phystech.edu, ^b dubinya.nv@gmail.com, ^c sergey.tikhotskiy@gmail.com,
^d nachev@phystech.edu, ^e alexeevgeo@gmail.com

Получено 15.12.2021, после доработки — 21.03.2022.

Принято к публикации 21.03.2022.

В работе представлены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния самоподъемных плавучих буровых установок, использующихся для освоения шельфовых месторождений углеводородов. Изучены равновесное напряженное состояние установки, погруженной в донный грунт, и его изменение, вызванное внешним механическим воздействием. Рассмотрена частная задача, в рамках которой в роли внешнего воздействия выступает поверхностная сейсмическая волна от удаленного землетрясения. Исследован отклик системы «самоподъемная плавучая буровая установка – донный грунт» на такое воздействие: проанализировано перераспределение полей напряжений и деформаций в системе, вызванное сейсмическим воздействием. Рассмотрен вопрос устойчивости установки: продемонстрировано, что приход сейсмической волны приводит к резкому росту напряжений в определенных элементах опорных колонн, что может привести к потере устойчивости. Для численного моделирования рассмотренной контактной задачи теории упругости использован метод конечных элементов. Проверка корректности постановки задачи и сходимости ее решения была выполнена путем рассмотрения известной задачи о вдавливании жесткого цилиндра в упругое полупространство. Показано, что используемая для анализа устойчивости самоподъемной буровой установки численная схема дает верные результаты для рассмотренной модельной задачи при условии корректного построения сетки конечных элементов. В рамках работы были исследованы роли различных факторов, определяющих условия достижения напряжениями в самоподъемной плавучей буровой установке критических значений: рассмотрены степень выраженности сейсмического воздействия, механические свойства донного грунта и глубина погружения опорных колонн установки в грунт. Сделаны предварительные выводы о необходимости заглубления опорных колонн в донный грунт с учетом его механических свойств и характерной для региона сейсмичности. Представленный в работе подход может быть использован в качестве инструмента для прогноза рисков, связанных с освоением месторождений углеводородов, расположенных на континентальном шельфе, а использованная схема численного моделирования — для решения класса контактных задач теории упругости, требующих анализа динамических процессов.

Ключевые слова: сейсмическое воздействие, самоподъемная плавучая буровая установка, метод конечных элементов, механическая устойчивость, контактная задача теории упругости

UDC: 624.042.7

Numerical model of jack-up rig's mechanical behavior under seismic loading

I. A. Vasilev^{1,a}, N. V. Dubinya^{1,2,b}, S. A. Tikhotskiy^{1,2,c}, V. A. Nachev^{1,3,d},
D. A. Alekseev^{1,e}

¹Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

²Schmidt Institute of Physics of The Earth of the RAS,
10/1 B. Gruzinskaya st., Moscow, 123242, Russia

³Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of the RAS,
38/1 Leninskiy ave., Moscow, 119334, Russia

E-mail: ^a vasilev.ivan@phystech.edu, ^b dubinya.nv@gmail.com, ^c sergey.tikhotskiy@gmail.com,
^d nachev@phystech.edu, ^e alexeevgeo@gmail.com

Received 15.12.2021, after completion – 21.03.2022.

Accepted for publication 21.03.2022.

The paper presents results of numerical modeling of stress-strain state of jack-up rigs used for shelf hydrocarbon reservoirs exploitation. The work studied the equilibrium stress state of a jack-up rig standing on seafloor and mechanical behavior of the rig under seismic loading. Surface elastic wave caused by a distant earthquake acts a reason for the loading. Stability of jack-up rig is the main topic of the research, as stability can be lost due to redistribution of stresses and strains in the elements of the rig due to seismic loading. Modeling results revealed that seismic loading can indeed lead to intermittent growth of stresses in particular elements of the rig's support legs resulting into stability loss. These results were obtained using the finite element-based numerical scheme. The paper contains the proof of modeling results convergence obtained from analysis of one problem – the problem of stresses and strains distributions for the contact problem of a rigid cylinder indenting on elastic half space. The comparison between numerical and analytical solutions proved the used numerical scheme to be correct, as obtained results converged. The paper presents an analysis of the different factors influencing the mechanical behavior of the studied system. These factors include the degree of seismic loading, mechanical properties of seafloor sediments, and depth of support legs penetration. The results obtained from numerical modeling made it possible to formulate preliminary conclusions regarding the need to take site-specific conditions into account whenever planning the use of jack-up rigs, especially, in the regions with seismic activity. The approach presented in the paper can be used to evaluate risks related to offshore hydrocarbon reservoirs exploitation and development, while the reported numerical scheme can be used to solve some contact problems of theory of elasticity with the need to analyze dynamic processes.

Keywords: seismic loading, jack-up rig, finite element method, mechanical stability, contact problem of theory of elasticity

Citation: Computer Research and Modeling, 2022, vol. 14, no. 4, pp. 853–871 (Russian).

1. Введение

В настоящее время все большее внимание уделяется освоению и разработке месторождений углеводородов, расположенных на континентальном шельфе. При освоении таких месторождений и бурении скважин активно используются самоподъемные плавучие буровые установки (СПБУ), основные подходы к проектированию и использованию которых были сформулированы сравнительно давно [Агагусейнов и др., 1979]. При эксплуатации СПБУ существует достаточно большое количество экологических рисков, связанных с работой установки, возможными проблемами и непредвиденными внешними воздействиями [Чемодуров, Пшеничная-Ажермачёва, 2014].

Основным фокусом данной работы являются механические процессы, приводящие к упомянутым рискам. Среди рисков можно выделить потерю устойчивости опорных колонн СПБУ, а также развитие в них механических повреждений. Реализация таких рисков напрямую зависит от механических процессов, протекающих как непосредственно в СПБУ, так и в донных грунтах в окрестностях опорных колонн. Эти механические процессы в значительной степени определяются множеством геологических факторов, в том числе наличием в грунтах зон аномально высокого пластового давления, вечной мерзлоты и структурных особенностей строения [Марченко, 2019]. При прогнозе различных рисков в значительной степени используются инженерные подходы, основывающиеся на использовании эмпирических моделей, учитывающих поведение СПБУ в модельных условиях и на объектах, аналогичных рассматриваемым, — месторождениях-аналогах. В то же время механические процессы, имеющие место в условиях эксплуатации СПБУ, определяются особенностями конкретных областей работы, в частности механическими свойствами донных грунтов [Randolph et al., 2005]. При этом существует ограниченное количество источников информации об этих свойствах в реальных условиях: инженерное бурение на континентальном шельфе проводится достаточно редко в связи с высокой ресурсозатратностью [Казанин и др., 2017]. Как результат, развиваются методы косвенного изучения механических свойств донных отложений — результаты сейсморазведки высокого разрешения [Пирогова и др., 2019] и интерпретация данных, полученных в ходе пробоотбора с помощью гравитационных донных трубок [Тихоцкий и др., 2020], позволяют с высокой достоверностью и детальностью строить модель механических свойств донных грунтов. Более того, такие модели позволяют учитывать существенно нелинейную вязкоупругопластическую реологию, характерную для донных отложений и влияющую на устойчивость несущих конструкций СПБУ [Hossain et al., 2005; Xiao et al., 2019]. В свою очередь, наличие этих моделей делает возможным переход от инженерных подходов прогноза рисков при эксплуатации СПБУ [Агагусейнов и др., 1979] к численному прогнозу рисков, использующему данные о непосредственном объекте освоения. Как результат, растет достоверность прогнозов и снижаются геологические и экологические риски освоения шельфовых месторождений.

В данной работе приведен пример полноценного моделирования механического поведения СПБУ с целью прогноза рисков при ее эксплуатации. В качестве частной задачи рассмотрено поведение СПБУ и донных грунтов, на которых она установлена, при сейсмических воздействиях. По результатам численного моделирования были определены пространственные распределения полей напряжений и деформаций в самой СПБУ и в окрестности опорных колонн. Были рассмотрены равновесное напряженно-деформированное состояние среды, обусловленное собственным весом СПБУ и сопротивлением грунтов, а также его возмущение, вызванное приходом поверхностной сейсмической волны от крупного землетрясения. В результате анализа рассчитанных полей напряжений были определены зоны их локализации в колоннах СПБУ и определены наиболее опасные с точки зрения потери устойчивости области. Кроме того, было исследовано влияние механических свойств грунтов на критические значения параметров, характеризующих

сейсмический сигнал: в частности, была определена зависимость амплитуды волны, приводящей к превышению предела прочности материала колонн и их последующему разрушению, от статических упругих модулей грунта. В данной работе рассматривается модельная задача, однако созданный численный алгоритм может быть применен для прогноза устойчивости и анализа рисков с учетом особенностей рассматриваемых объектов и в реальных условиях.

2. Постановка задачи

2.1. Самоподъемная плавучая буровая установка

Морской шельф представляет собой прибрежную часть моря или океана небольшой глубины с ровной поверхностью и незначительными уклонами. Добыча углеводородов на шельфе, в отличие от наземной, осложнена более суровыми природными условиями (волнение моря, тяжелые арктические льды и др.). Данные условия представляют дополнительные сложности при планировании процесса добычи. Затраты на обустройство морских нефтегазовых месторождений составляют свыше 50 % всех капиталовложений [Золотухин и др., 2000].

При разведке и разработке месторождений на море используют плавучие буровые средства: плавучие полупогружные буровые установки, буровые суда и самоподъемные плавучие буровые установки. Основными факторами, определяющими тип и размеры буровой установки, являются параметры технологического оборудования, используемого для добычи, глубина моря и автономность работы [Агагусейнов и др., 1979].

Так, например, полупогружные плавучие буровые установки могут удерживаться на месте с помощью якорей или системы динамической стабилизации. Максимальная глубина работы таких установок может достигать до 3 км. Так как в работе поставлены условия добычи на шельфе, то глубина работы установки небольшая — примерно до 200 метров. Для проведения бурения на таких глубинах часто используются самоподъемные буровые установки (СПБУ).

СПБУ представляет собой корпус-понтон, являющийся одновременно и производственной площадкой. На понтоне размещаются производственное и технологическое оборудование, жилые и служебные помещения, склады, площадка для вертолетов и т. д. Установка имеет колонны, опирающиеся в рабочем положении на морское дно и удерживающие корпус на заданной высоте над поверхностью воды. В походном положении опоры подняты над палубой понтона [Агагусейнов и др., 1979]. Основными режимами работы СПБУ являются походное положение (опоры подняты над палубой понтона) и рабочее (опоры задавлены в грунт, корпус находится на заданной высоте над поверхностью воды). Одним из недостатков использования СПБУ является зависимость от несущей способности грунта.

Обеспечение безопасности при работе на самоподъемных плавучих буровых установках является одной из важнейших задач на начальных этапах освоения месторождений углеводородов на шельфе. Данная работа посвящена вопросу возможности применения численного моделирования для решения вопросов, связанных с безопасностью эксплуатации СПБУ.

Взаимодействие СПБУ с участком донных отложений будет рассматриваться как аналог контактной задачи теории упругости, а именно: абсолютно жесткое тело (СПБУ) находится в контакте с телом с отличающейся реологией (модель донных отложений). Взаимодействие двух тел будет рассматриваться как жесткий контакт: движение элементов (в случае решения с помощью МКЭ — элементов сетки) одного тела относительно элементов другого тела запрещено для нормального перемещения, но допускается для сдвигового. Сдвиг реализуется при достижении критерия проскальзывания, определяемого коэффициентом трения между рассматриваемыми телами.

3. Моделирование системы

Исследование устойчивости будет проводиться в несколько этапов с помощью метода конечных элементов. Сам метод представляет собой обобщение метода Рэлея – Ритца – Галёркина. Создается конечно-элементная сетка известных размеров. На модель накладываются начальные и граничные условия, задаются исходные параметры. В случае решения задач в области механики сплошных сред такими параметрами являются плотность, упругие модули, различные модели поведения тела (модель пластичности, вязкости) и др. Затем в узлах конечных элементов решается система однородных дифференциальных уравнений и идет обработка результатов.

3.1. Верификация модели

Для того чтобы иметь возможность использовать численное моделирование для анализа устойчивости реальных буровых установок при внешних воздействиях, необходимо проверить применимость используемой численной схемы для решения задачи, исследовать сходимость и устойчивость численного решения рассматриваемой контактной задачи.

Из контактных задач, близких по постановке к задаче анализа напряженно-деформированного состояния системы «СПБУ – донный грунт», можно выделить задачу о распределении напряжений и деформаций при вдавливании цилиндра в горизонтальную плоскость (рис. 1).

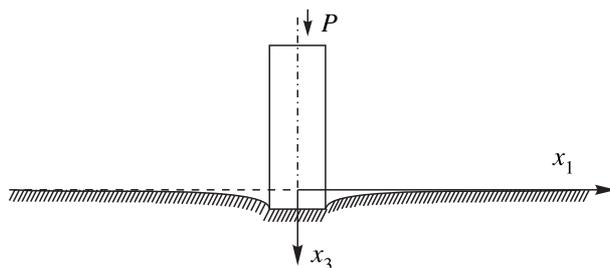


Рис. 1. Постановка задачи о вдавливании цилиндра

Рассматривается задача вдавливания жесткого, недеформируемого цилиндра в упругое полупространство под действием нормальной силы P , приложенной к одному из его оснований. Вводится система координат x_1, x_2, x_3 такая, что ее начало совпадает с центром основания цилиндра, находящегося в контакте с полупространством, а третья ось сонаправлена с действием силы P . В случае пренебрежения массовыми силами, при выполнении условия отсутствия проскальзывания между нижним основанием цилиндра и поверхностью однородного изотропного линейно-упругого полупространства, а также при рассмотрении равномерного распределения нормальной силы, приложенной к верхнему основанию цилиндра, задача определения пространственных распределений компонент тензоров напряжений и деформаций и вектора смещений имеет известное аналитическое решение [Франк, Мизес, 1937]:

$$\begin{cases} u_1(x_1, x_2, x_3) = \varphi_1(x_1, x_2, x_3) - \frac{x_3}{2(1-\nu)} \frac{\partial \varphi_3(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_3}, \\ u_2(x_1, x_2, x_3) = \varphi_2(x_1, x_2, x_3) - \frac{x_3}{2(1-\nu)} \frac{\partial \varphi_3(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_3}, \\ u_3(x_1, x_2, x_3) = \varphi_3(x_1, x_2, x_3) - \frac{x_3}{2(1-\nu)} \frac{\partial \varphi_3(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_3}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь u_1, u_2, u_3 – компоненты вектора смещения точек, принадлежавших до деформирования упругому полупространству в используемой системе координат; ν – коэффициент Пуассона

среды, в которую происходит вдавливание. Потенциальные функции φ_1 , φ_2 и φ_3 могут быть найдены из решения задачи об электростатическом потенциале бесконечно тонкой круговой заряженной пластинки и имеют вид

$$\begin{cases} \varphi_1(x_1, x_2, x_3) = -\frac{k}{\pi} \frac{2-v}{1-v} \frac{x_1}{r} \int_0^{\infty} \frac{\sin(\alpha a)}{\alpha} J_1(\alpha r) e^{-\alpha x_3} d\alpha, \\ \varphi_2(x_1, x_2, x_3) = -\frac{k}{\pi} \frac{2-v}{1-v} \frac{x_2}{r} \int_0^{\infty} \frac{\sin(\alpha a)}{\alpha} J_1(\alpha r) e^{-\alpha x_3} d\alpha, \\ \varphi_3(x_1, x_2, x_3) = \frac{2k}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin(\alpha a)}{\alpha} J_0(\alpha r) e^{-\alpha x_3} d\alpha. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $r = (x_1^2 + x_2^2)^{1/2}$ — расстояние от рассматриваемой точки до оси x_3 (до оси симметрии задачи), a — радиус цилиндра, $J_0(\alpha r)$ и $J_1(\alpha r)$ — функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка соответственно. Величина k определяется глубиной вдавливания цилиндра и зависит от силы вдавливания P и модулей упругости полупространства как

$$k = \frac{P(1-v)(1+v)}{2Ea}, \quad (3)$$

где E — модуль Юнга упругого полупространства.

Подстановка выражений (2) в определения (1) позволяет определить распределение смещений в упругом полупространстве при вдавливании; дифференцирование полей смещений позволяет определить деформированное состояние полупространства, а подстановка полей деформаций в определяющие соотношения (закон Гука) ведет к возможности анализа напряжений, возникающих в окрестности зоны вдавливания цилиндра.

Для того чтобы наглядно верифицировать результаты численного моделирования, можно рассмотреть смещения точек, находящихся на поверхности полупространства, то есть имевших координаты $x_3 = 0$ в отсчетной конфигурации. Для этих точек компоненты вектора смещения имеют простой вид:

$$\begin{cases} u_1(x_1, x_2)|_{x_3=0} = -\frac{k}{\pi} \frac{2-v}{1-v} \frac{x_1}{r} \int_0^{\infty} \frac{\sin(\alpha a)}{\alpha} J_1(\alpha r) d\alpha, \\ u_2(x_1, x_2)|_{x_3=0} = -\frac{k}{\pi} \frac{2-v}{1-v} \frac{x_2}{r} \int_0^{\infty} \frac{\sin(\alpha a)}{\alpha} J_1(\alpha r) d\alpha, \\ u_3(x_1, x_2)|_{x_3=0} = \frac{2k}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin(\alpha a)}{\alpha} J_0(\alpha r) d\alpha. \end{cases} \quad (4)$$

Выражения (4) могут быть использованы для верификации численной модели, построенной для решения поставленной задачи с помощью метода конечных элементов.

Для проверки возможности исследования поведения СПБУ в донном грунте требуется собрать простейшую модель взаимодействия двух объектов. Для этого построена сборка из двух элементов: куб и заглубленный в него цилиндр.

Элементам задаются свойства материала: для того чтобы впоследствии иметь возможность анализировать поля напряжений и деформаций в опорах СПБУ, модель цилиндра, как и модель

куба, задается как упругое тело с известными упругими модулями: модулем Юнга E и коэффициентом Пуассона ν . Механические свойства модели цилиндра имеют средние значения, присущие стали, в то время как модель куба имеет значения, соответствующие усредненным типичным значениям грунта. Далее строится сетка конечных элементов (КЭ). Элементы сетки имеют форму тетраэдров с четырьмя узлами. Построенная модель представлена на рис. 2, а.

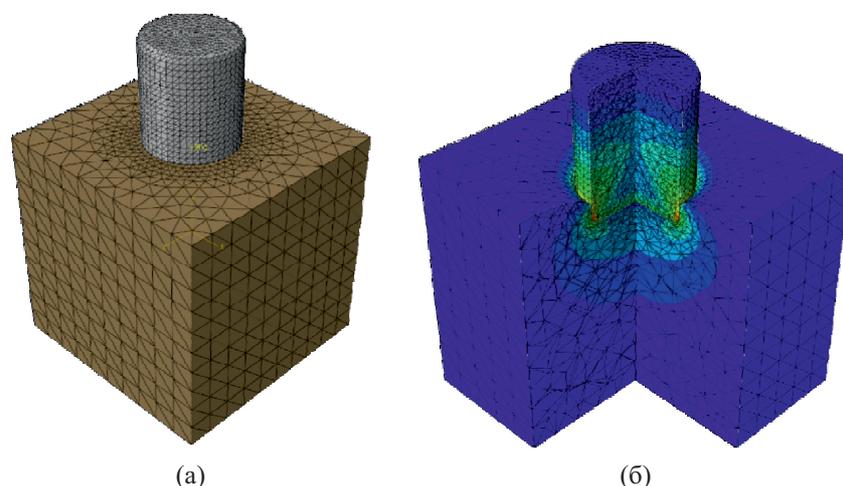


Рис. 2. Расчетная модель (а) и результаты моделирования (б). Цветовая палитра от холодных к теплым цветам показывает модуль вектора перемещения в элементе. Чем выше значение, тем теплее цвет

Размер расчетной области выбирается таким образом, чтобы расстояние до границы превышало характерный размер зоны концентрации напряжений в области контакта. Проверка корректности такого выбора границ области осуществляется путем сравнения результатов численного моделирования с аналитическим решением (1)–(4).

К верхней границе цилиндра прикладывается равномерно распределенная нормальная сила с равнодействующей P . В качестве граничных условий задается отсутствие смещений нижней грани куба. Для корректного расчета поставленной задачи также задается условие контакта. При взаимодействии цилиндра и грунта потенциально возможны нормальное и касательное смещения КЭ одного тела относительно другого. Нормальное перемещение ограничено жестким контактом — перемещение при таком контакте отсутствует. Для моделирования взаимодействия СПБУ и грунта может допускаться проскальзывание элементов друг относительно друга, но в верификационной задаче такое проскальзывание не допускается.

В результате численного моделирования поставленной задачи определяются компоненты тензоров напряжений и деформаций, а также вектора смещения точек, относящихся как к грунту, так и к вдавливаемому цилиндру. На рис. 3 представлены эпюры смещений точек грунта, расположенных на его поверхности и относящихся к лучу $x_1 \geq 0, x_2 = x_3 = 0$ (в силу симметрии задачи рассмотрение только одного луча, лежащего на поверхности грунта до деформирования, не ограничивает общность полученных результатов). На рис. 3, а показано смещение точек в вертикальном направлении, на рис. 3, б — смещение вдоль оси x_1 (вторая компонента вектора смещения равна нулю из-за формы выражений (4) для случая $x_2 = 0$). По горизонтальной оси отложено расстояние r , нормированное на радиус цилиндра a . По вертикальной оси отложено нормированное перемещение. Из выражений (4) можно заметить, что максимальное (по амплитуде) горизонтальное смещение реализуется на кольце $r = a$, величину этого смещения можно использовать для нормировки горизонтального смещения. В свою очередь, вертикальное смещение по условию задачи постоянно в области $x_3 = 0, r \leq a$ и равно вертикальному перемещению цилиндра как жесткого тела. Естественно выбрать значение этого перемещения

(связанного с приложенной силой через выражение (3)) в качестве величины, на которую выполняется нормировка вертикального смещения точек поверхности, ограничивающих упругое полупространство.

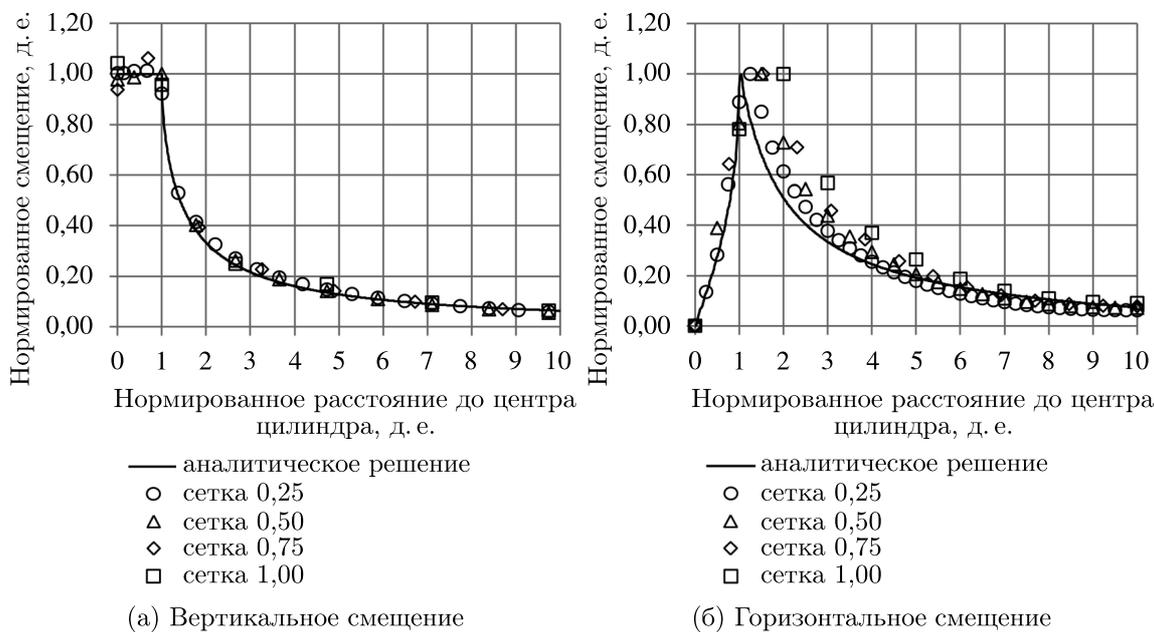


Рис. 3. Смещение поверхности грунта при вдавливании цилиндра

Точками на рис. 3 показаны результаты расчета смещений в узлах конечно-элементной сетки для различных сгущений сетки. Характерный размер элемента сетки, отнесенный к радиусу цилиндра a , в окрестности зоны контакта указан в легенде. Видно, что по мере уменьшения характерного размера элемента численное решение сходится к аналитическому, что позволяет говорить о корректности метода решения поставленной задачи. Кроме того, результаты исследования позволили оценить необходимый размер элемента для изучения напряженного состояния в окрестности опоры, а также необходимый для минимизации граничных эффектов размер расчетной области: так, можно говорить о том, что на расстоянии порядка десяти радиусов цилиндра от его центра смещения становятся достаточно малы. Важно также отметить необходимость сгущения сетки в окрестности поверхности контакта. На рис. 2, б представлено распределение в элементах расчетной схемы эквивалентного напряжения по Мизесу — его величина отображена цветом. Зона возмущенного напряженного состояния соразмерна с характерным линейным размером вдавливаемого тела и должна изучаться более детально по сравнению с более отдаленными от контакта областями.

Выполненная верификация подхода к рассмотрению задачи позволяет говорить о его применимости для решения аналогичных задач более сложной геометрии, приближенных к условиям, возникающим в области погружения опор самоподъемной буровой установки в донный грунт.

3.2. Моделирование системы «СПБУ – донный грунт»

Так как сама СПБУ представляет собой довольно большой объект, то подробная прорисовка всех элементов установки потребовала бы сложных и долгих вычислений. В связи с этим 3D-модель СПБУ была несколько упрощена:

- 1) 3D-модель выполнена однородным телом, без прорисовки сопряжений опорных колонн к понтону;

- 2) не были прорисованы внутренние каюты и некоторые внешние постройки (цистерны для хранения добытых ископаемых, вертолетная площадка и др.);
- 3) опоры СПБУ не имеют опорного башмака, а также балочная стержневая конструкция заменена на треугольную сплошного сечения; также для уменьшения влияния сходимости напряжений на концах опорных колонн углы были скруглены.

Для создания модели системы свойства материала для СПБУ заданы как для стали: модуль Юнга E — 200 ГПа, коэффициент Пуассона ν — 0,3. Из-за отсутствия прорисовки внутренних отсеков и замены конструкции опорных колонн плотность вычисляется как среднее значение всей модели и примерно равна $\rho \approx 400$ кг/м³. Модель донных отложений на текущем этапе работ, так же как и модель СПБУ, моделировалась сплошным однородным телом в форме куба. Механические свойства характеризуют усредненные значения грунта: плотность $\rho \approx 2300$ кг/м³, модуль Юнга E — 56 МПа, коэффициент Пуассона ν — 0,3.

Размеры модели буровой установки имели масштаб 1:1000 относительно физического аналога. Модели СПБУ, опорной колонны и донных отложений показаны на рис. 4.

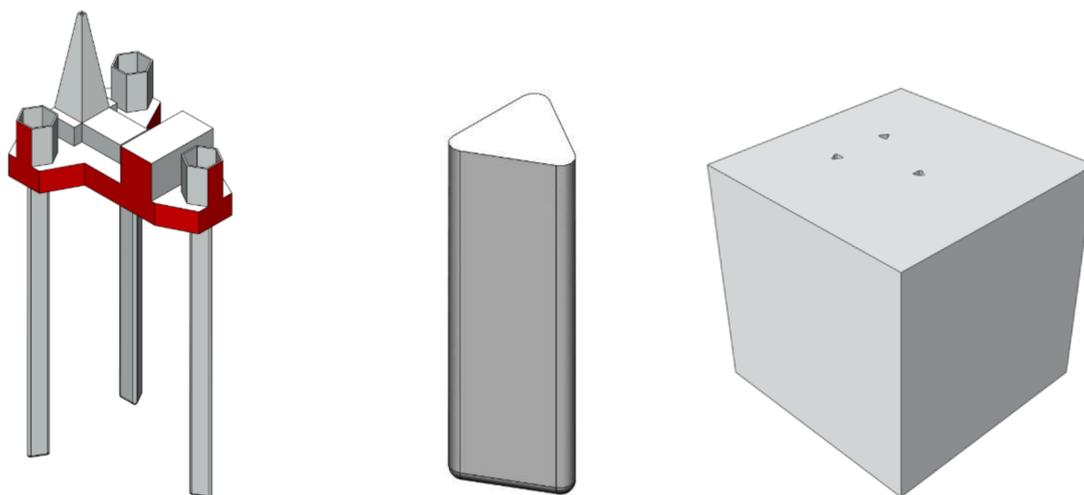


Рис. 4. Слева направо: модели СПБУ, опорной колонны и донных отложений

На данном этапе работы СПБУ рассматривается как сплошное упругое тело, которое находится в жестком контакте с другим объектом — моделью донных отложений. В связи с этим на СПБУ не будут действовать следующие типы нагрузок: внешние нагрузки от действия морского объема (волновые и нагрузки от течения) и ветровые нагрузки.

3.3. Внешнее воздействие

Для исследования зависимости устойчивости установки при сейсмическом воздействии к модели прикладывается внешнее возмущение, моделирующее крупное землетрясение. Для задания внешнего воздействия на одну из вертикальных границ модели донного грунта было задано динамическое граничное условие — зависимость изменения скорости нормального смещения от времени, показанная на рис. 5. На грань, находящуюся напротив приложения сейсмического воздействия, были наложены ограничения по перемещению по трем осям координат. На данном этапе исследования внешнее воздействие рассматривается как плоская волна, волновой вектор которой нормален к одной из граней расчетной области. В дальнейшем необходимо рассматривать также и поверхностные волны, оказывающие значительное влияние на механическое поведение объектов инфраструктуры.

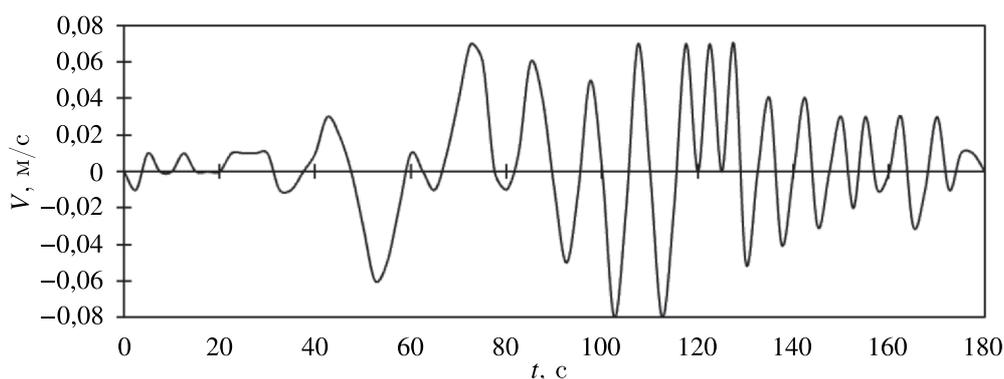


Рис. 5. Зависимость скорости смещения частиц грунта от времени при сейсмическом воздействии

Приведенный на рис. 5 сигнал представляет собой масштабированный по амплитуде фрагмент сейсмологической записи, полученной на станции WMQ (Урумчи, Китай) 11 марта 2011 г. после катастрофического землетрясения Тохоку (по данным портала IRISI Global Seismogram Viewer, <https://ds.iris.edu/gsv/>). Выбор указанного фрагмента отражает наиболее характерные особенности телесеismicких колебаний, связанных с удаленными землетрясениями большой магнитуды и имеющих низкочастотную составляющую с периодами более десяти секунд.

При оценке интенсивности сейсмического воздействия в настоящее время используют два подхода. Первый — макросейсмический, интенсивность оценивается баллами макросейсмической шкалы; второй — инструментальный, оценка интенсивности производится на основе физических характеристик воздействия.

При макросейсмическом подходе интенсивность оценивается по степени разрушений, масштабу и форме остаточных деформаций в грунте и другим показателям, полученным в результате воздействия. Оценка выражается в баллах сейсмической шкалы, где каждому баллу соответствуют свой уровень ощущений, характер явлений и степень повреждений и разрушений. К сожалению, подобная шкала не может дать точных данных для анализа и моделирования событий. Соответственно, необходимо использовать инструментальную шкалу, в которой интенсивности в баллах сопоставляются количественные параметры воздействия: ускорение, скорость или смещение. В работе использовалась инструментальная шкала (таблица 1), где приведены интервалы изменения различных инструментальных характеристик (скорость, ускорение, смещение) определенной интенсивности.

Важное свойство данной шкалы — ее линейность, т. е. отношение параметров, соответствующих отличию в 1 балл, остается постоянным независимо от того, к какой части таблицы находится исследуемая величина. Данное свойство важно для определения приращения балльности по отношению к амплитуде сейсмических воздействий [Алешин, 2010].

Таблица 1. Корреляция инструментальных характеристик землетрясений с интенсивностью I

Интенсивность I	Смещение, см	Скорость, см/с	Медианное значение скорости, см/с
2	0,0006–0,0028	0,029–0,086	0,05
3	0,0028–0,014	0,086–0,25	0,15
4	0,014–0,065	0,25–0,75	0,44
5	0,065–0,31	0,75–2,2	1,3
6	0,31–1,5	2,2–6,5	3,8
7	1,5–7,1	6,5–19	11
8	7,1–34	19–57	33
9	34–164	57–170	98

При моделировании данного воздействия к начальному шагу, находящемуся в равновесном состоянии, добавляется следующий шаг. Он является динамическим, так как начальным условием для него является переменное во времени воздействие. К боковой грани модели грунта прикладывается динамическое воздействие: таблично заданное изменение скорости нормальных смещений с течением времени. Длительность воздействия равна длительности самого возмущающего воздействия (в данном эксперименте время $t = 180$ с). На противоположную грань накладывается ограничение по перемещениям, аналогичное с первоначальным шагом.

Выбор использования смещений, нормальных к вертикальной грани области, обусловлен возможностью рассмотрения поверхностной сейсмической волны, длина которой велика по сравнению с размером рассматриваемой областью. В работе рассматривается случай прихода сейсмической волны, преодолевшей значительное расстояние: так, расстояние от станции Урумчи до эпицентра землетрясения Тохоку превышает 4000 км, тогда как размер области, рассматриваемой в работе, составляет 200 м. Такой подход может быть не вполне корректным при более детальном исследовании сейсмоустойчивости СПБУ, если рассматривать сейсмические события, происходящие в близости СПБУ. Тем не менее для получения общих методических рекомендаций на данном этапе сейсмическая волна будет рассматриваться как плоская для упрощения вычислительных операций. В общем случае граничные условия могут быть поставлены и для более реалистичных зависимостей смещения границы области от координат (в первую очередь от глубины).

3.4. Исследование зависимости устойчивости от величины сейсмического воздействия

В серии опытов по исследованию зависимости устойчивости от степени сейсмического воздействия описанное выше граничное условие масштабировалось по инструментальной шкале, представленной в табл. 1. Максимальное значение скорости смещений исходной волны ≈ 8 см/с, что соответствует уровню в 7 баллов. Далее амплитуда была скоррелирована к средним значениям по каждому из уровней балльности. Таким образом, было проведено 8 испытаний, где на вертикальную грань приходило внешнее воздействие.

В качестве показателя, характеризующего выраженность механических процессов в СПБУ, способных привести к потере устойчивости, была выбрана интенсивность эквивалентных напряжений по Мизесу. При дальнейшем анализе потери устойчивости можно рассмотреть условие достижения эквивалентными напряжениями по Мизесу критических значений, что позволит оценить потенциальную опасность сейсмических воздействий разной интенсивности. Поскольку можно ожидать, что катастрофические процессы будут зарождаться в максимально нагруженной зоне СПБУ, рассматривался узел, в котором эквивалентное напряжение по Мизесу достигает максимального среди всех узлов сетки значения.

Было получено семейство зависимостей максимального напряжения (по Мизесу) на узле от времени при различных величинах сейсмического воздействия. Для всех случаев максимального значения эквивалентное напряжение достигалось в одном и том же узле, расположенном у основания опорной колонны. Результаты представлены на рис. 6а и 6б.

Из рис. 6а и 6б видно, что максимальные значения напряжений на узле при воздействиях с интенсивностью выше 6 баллов уменьшаются. На некоторых участках графика напряжения отличаются более чем в 2,3 раза. По табл. 1 можно определить, что значения амплитуд скоростей у соседних значений балльности отличаются примерно в 5 раз. При балльности выше 6 амплитуда составляет уже единицы см/с. По зависимости, показанной на рис. 6, можно определить, что при амплитуде уровнем до 6 баллов включительно напряжение на узле растет, после чего начинает резко падать. Это наблюдение заслуживает отдельного внимания.

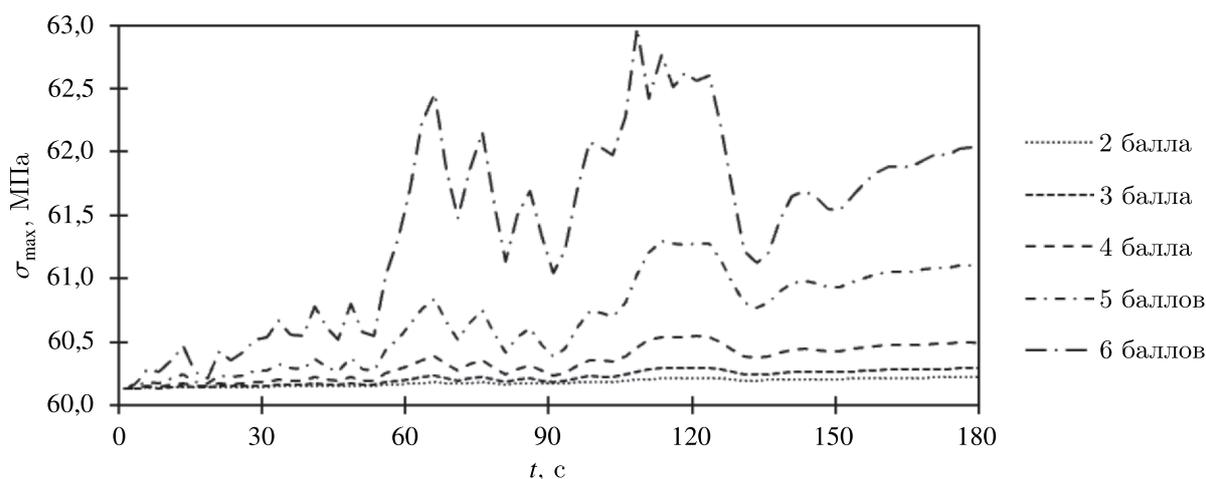


Рис. 6а. Значения напряжения в узле СПБУ при величине интенсивности до 6 баллов

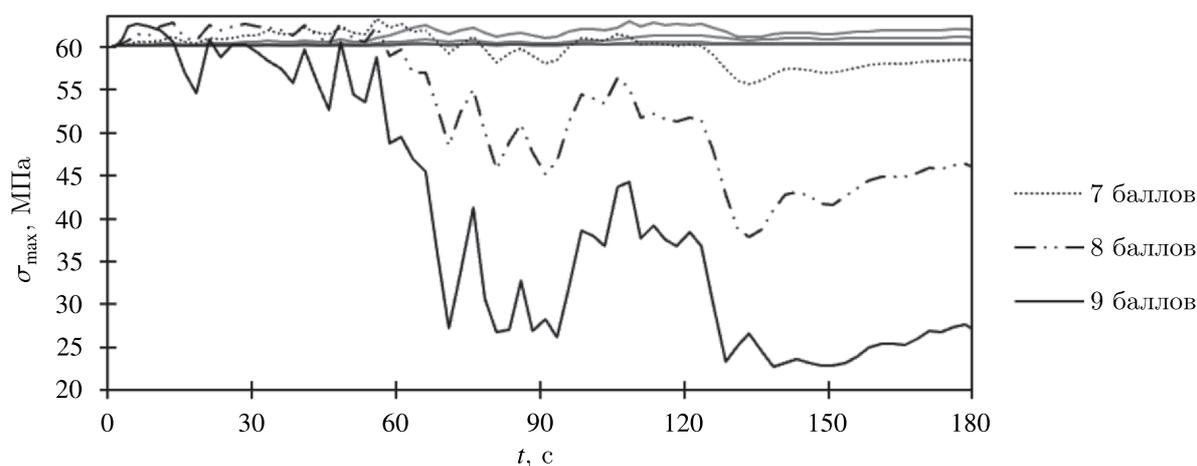


Рис. 6б. Значения напряжения в узле СПБУ при величине интенсивности свыше 6 баллов

Подобное поведение связано с движением элементов опор относительно элементов модели грунта. Если рассматривать данную проблему в приближении, то существует контактная задача: грани конечных элементов опор СПБУ находятся в контакте с гранями элементов модели грунта.

При задании поведения деформаций при взаимодействии моделей нормальная составляющая смещений была определена как жесткий контакт, в то время как для тангенциальной были заданы следующие параметры: коэффициент трения, равный 0,3, отсутствие максимальной величины напряжения сдвига, которое может выдержать граница раздела до того, как поверхности начнут скользить, а также величина допустимой скорости упругого скольжения (в модели это значение соответствует 0,5 см/с (0,005 м/с)). Этот параметр показывает допустимую величину скорости скольжения, при которой не будет допущено смещение поверхностей (т. е. при величинах скорости ниже 0,5 см/с модель будет считать сопряжение жестким контактом, а при значениях скорости скольжения выше заданной — трением скольжения).

Построив зависимость максимального напряжения от интенсивности источника при фиксированном значении времени t (рис. 7), можно увидеть, что напряжение начинает резко уменьшаться после достижения интенсивности, равной 6 баллов. Это связано с тем, что уровню в 6 баллов соответствует средняя скорость смещения равна 0,68 (значение указано в таблице 1), что больше заданной допустимой скорости упругого скольжения. Таким образом, поведе-

ние функции трения меняется — из трения «прилипания» в трение скольжения. Это значит, что поверхности, которые до этого находились в жестком контакте, начинают сдвигаться, соответственно, перераспределяется и напряжение на конечные элементы. Чем выше значение средней скорости, тем больше происходит смещение, и максимальное напряжение на фиксированном узле, с которого снимались показания, падает.

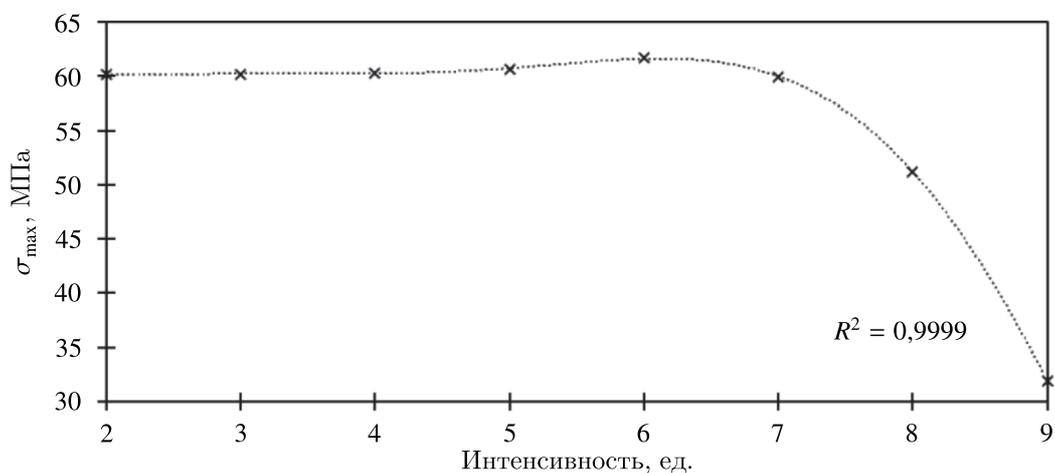


Рис. 7. Зависимость напряжения от интенсивности воздействия

3.5. Исследование зависимости устойчивости от свойств грунта

При исследовании зависимости устойчивости СПБУ от свойств грунта меняются механические характеристики модели донных отложений. Таким образом, можно исследовать влияние местоположения точки установки СПБУ на ее устойчивость.

Существует ряд требований перед процессом задавливания опор в грунт и началом работы. Изначально требуется провести подробный анализ грунта, на который планируется установка СПБУ. В перечень характеристик, требуемых для предварительного анализа, рекомендованный «Правилами классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ», включаются:

- 1) вид грунта (глина, песок и т. д.),
- 2) вес грунта в воде,
- 3) коэффициент Пуассона,
- 4) величина сцепления,
- 5) угол внутреннего трения,
- 6) коэффициент пористости,
- 7) показатель текучести грунта.

Необходимо располагать инженерно-геологическим разрезом площадки установки СПБУ с указанием мощности пластов по глубине. Площадка не должна иметь инородных тел, валунов и других неровностей. Также не должно быть сильного уклона (более 1–2 градусов). Для этого проводится обследование морского дна водолазами.

Проводятся инженерно-геологические изыскания по слоям грунта, где определяются физико-механические свойства грунта, которые используются при расчете по заглублению опор. Полученные показатели сравниваются с минимально необходимыми значениями, принятыми для конкретной СПБУ, используемой при добыче.

Далее проводится подготовка грунта: он укрепляется (например, выполняют подсыпку из гравия или песка). При неправильной подготовке грунта возможно нарушение его структуры или размытие под башмаком, в результате чего может произойти неконтролируемое проникновение опоры в грунт, что приведет к недопустимому перекосу установки.

В исследовании к СПБУ, так же как и в простейшей модели, приложена сила тяжести, а на вертикальную стенку модели донного грунта приходит сейсмическая волна. Амплитуда волны не масштабировалась по корреляционной таблице балльности, но варьировались модули Юнга и коэффициенты Пуассона у модели грунта. Таким образом, моделируется расположение буровой установки в различных точках поверхности земного шара. Механические характеристики у модели СПБУ остаются без изменений. Для достоверности результатов анализа значение максимального напряжения по Мизесу, так же как и в предыдущих этапах моделирования, снижалось с одного и того же узла расчетной сетки одной из опор буровой установки.

Так как при постановке задачи модель грунта была определена как линейно-упругая, то для анализа поведения этой модели необходимо использовать соответствующие упругие модули. В «Правилах классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ» требуемой для анализа характеристикой указан только коэффициент Пуассона, чего недостаточно для проведения численного моделирования при заданных условиях. Поэтому в модель был добавлен второй упругий модуль — модуль Юнга.

При моделировании зависимости устойчивости от свойств грунта в текущей модели возможно только изменение упругих модулей. Коэффициент Пуассона ν_2 варьировался в пределах от 0,15 до 0,4, а модуль Юнга E_2 — в пределах от 46 до 66 МПа. В результате моделирования были получены семейства зависимостей максимального напряжения на опоре буровой установке от модуля Юнга (рис. 8) и от коэффициента Пуассона (рис. 9) грунта.

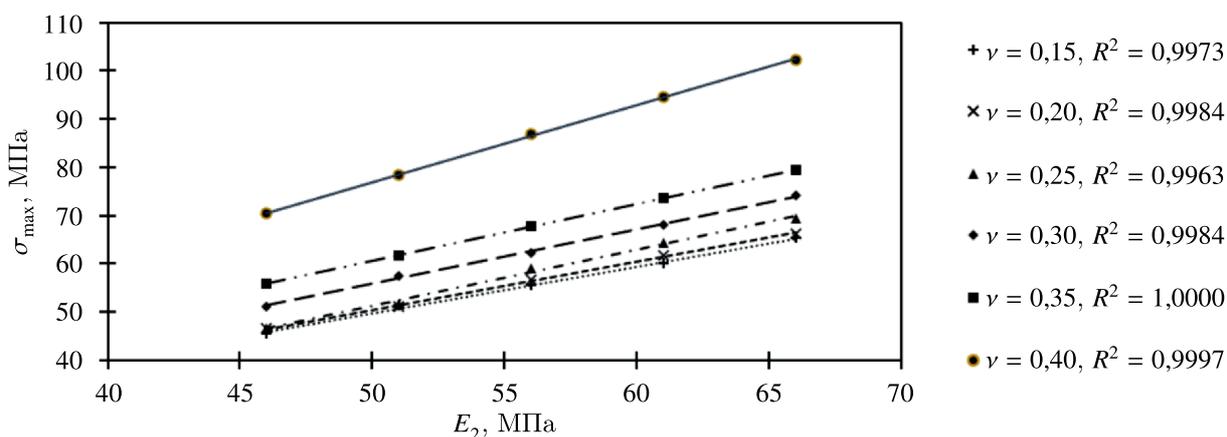


Рис. 8. Зависимость максимального напряжения на опоре СПБУ от модуля Юнга грунта

Семейство зависимостей максимального напряжения узла опоры СПБУ от модуля Юнга грунта на рис. 8 имеет линейный вид. По полученным результатам были также нанесены линии аппроксимации с коэффициентом достоверности R^2 , близким к 1. Такой результат находится в соответствии с теоретическими представлениями: как можно увидеть из выражений (3) и (4), в случае рассмотрения цилиндра между изменениями смещений (и, следовательно, напряжений и деформаций) и изменением модуля Юнга существует линейная зависимость. Полученный

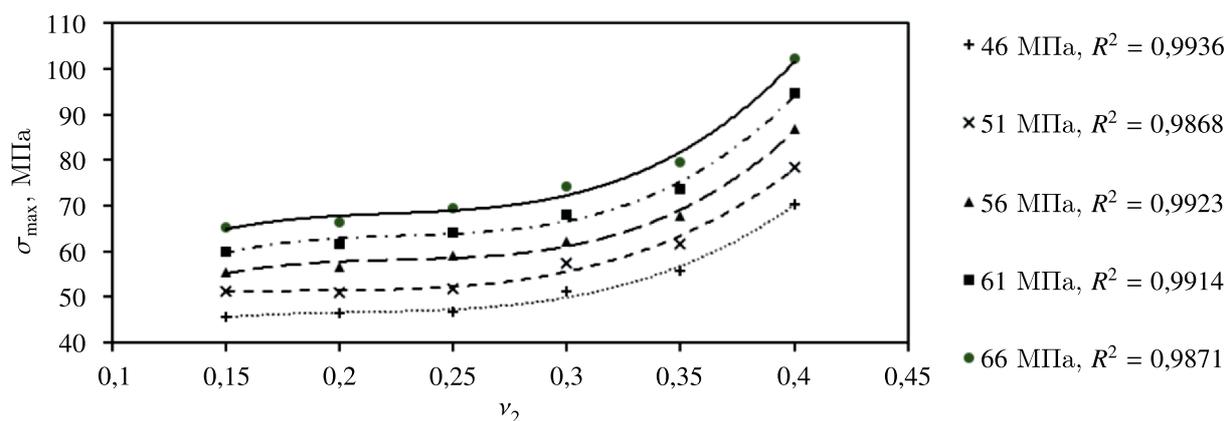


Рис. 9. Зависимость максимального напряжения на опоре СПБУ от коэффициента Пуассона грунта

результат позволяет подтвердить корректность построенной модели и упростить дальнейший анализ влияния свойств грунта на изменение напряжений и деформаций в рассматриваемой контактной задаче при внешних механических воздействиях.

Аналогичную картину можно наблюдать и с графиками зависимости σ_{\max} от ν_2 , представленными на рис. 9: получены семейства линий прогноза, построенные на экспериментальных данных. Как и следовало ожидать из формы выражений (3) и (4), зависимость между напряжением и коэффициентом Пуассона грунта существенно нелинейная. Тем не менее с достаточно высокой достоверностью полученные зависимости могут быть аппроксимированы полиномом третьей степени.

Таким образом, полученные кривые дают возможность спрогнозировать изменение напряженно-деформированного состояния элементов СПБУ и области контакта ее опор с грунтом по известным характеристикам грунта в соседних точках без проведения дополнительных вычислений. Полученные результаты также могут быть показаны в виде поверхности $\sigma_{\max}(E, \nu)$, представленной на рис. 10. В таком представлении наглядно видно, что наибольшего значения напряжение достигает при условии установки СПБУ в наиболее жесткий грунт, характеризующийся максимальными значениями модуля Юнга и коэффициента Пуассона.

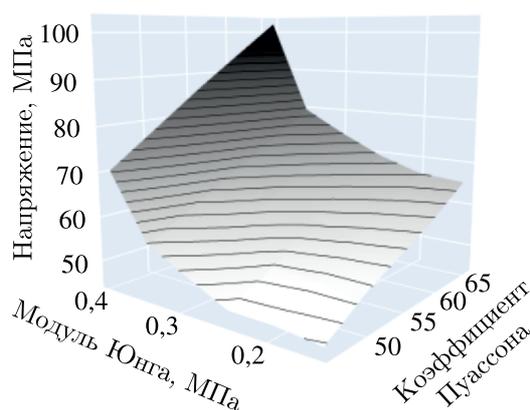


Рис. 10. Зависимость максимального напряжения от упругих модулей грунта

3.6. Исследование зависимости устойчивости от положения установки в грунте

Заключительным этапом исследований был анализ зависимости устойчивости от положения установки в грунте. Варьировалась глубина задавливания опор в грунт.

Наиболее важными операциями при работе на СПБУ являются постановка их на точку бурения и снятие с нее. В исследуемом типе буровой установки (трехколонная СПБУ) процесс задавливания происходит благодаря принятию соответствующего количества балласта. В связи с неровностями дна моря и неодинаковой несущей способностью грунта, между колоннами могут возникнуть крен и дифферент установки. Зафиксировать момент касания колоннами грунта тяжело. Одним из признаков того, что колонны достигли дна, может являться уменьшение осадки понтона СПБУ.

Когда опорные колонны начинают заглубляться в грунт, а корпус находится в воде, на опорные колонны также передается горизонтальная нагрузка, возникающая от воздействия волн на корпус. Также в положении, когда вес опорной колонны полностью воспринимается грунтом, к нагрузкам добавляются удары захватов о кромки опорных колонн, возникающие при перемещении захватов от вертикальной качки буровой установки. Эти нагрузки и удары значительно возрастают при увеличении волнения. Так как в работе отсутствует модель «моря», то смоделировать данные воздействия не представляется возможным на текущем этапе работы.

Глубина задавливания опор зависит от глубины моря на участке. Общая глубина, включая глубину моря, не должна превышать допустимую спроектированную глубину для буровой установки, используемой для добычи.

Обычно положение опор физических аналогов исследуемой СПБУ в грунте имеет малое значение — до 2 до 10 метров. Но для исследования устойчивости установки данный диапазон был расширен до 52 метров. Физически достигнуть подобного значения не представляется возможным.

Начальные условия, как и в предыдущих исследованиях, были одинаковыми: на вертикальную грань модели грунта с боковой стороны СПБУ приходило сейсмическое воздействие, полученное на основании реальных источников. Механические характеристики модели буровой установки и модели донных отложений оставались постоянными. Изменялась только глубина задавливания опор в грунт.

В результате моделирования было получено семейство зависимостей максимального напряжения в узле одной из опор от времени. Из-за большого количества полученных результатов данные зависимости нецелесообразно выводить по отдельности.

Альтернативой может послужить поверхность, построенная с помощью методов современной обработки данных. С помощью данного метода была построена зависимость максимального напряжения на узле от времени и глубины задавливания опор. Поверхность представлена на рис. 11.

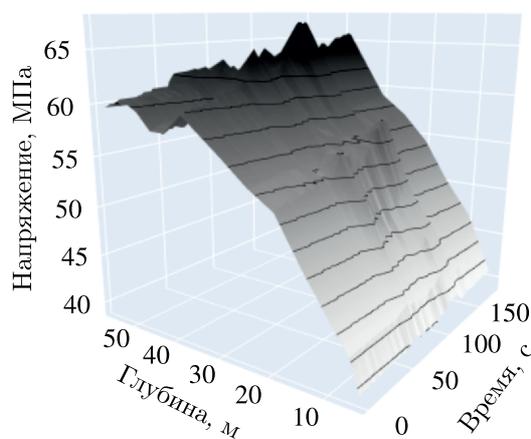


Рис. 11. Зависимость максимального напряжения от времени и глубины задавливания опор

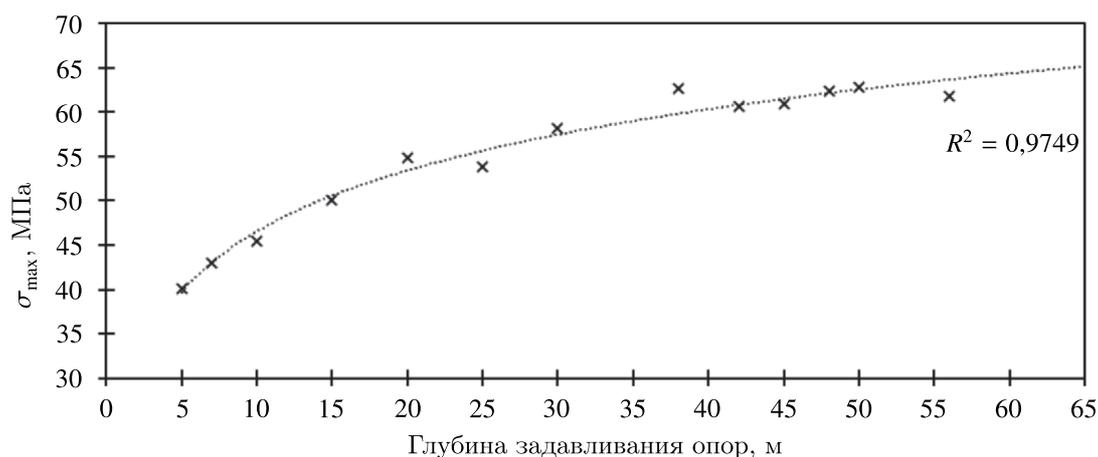


Рис. 12. Зависимость максимального напряжения от глубины задавливания при фиксированном моменте времени

Более информативной является зависимость максимального напряжения на узле от глубины задавливания опор при фиксированном моменте времени. Момент времени был выбран исходя из максимального значения напряжения. Полученный результат может быть с высокой достоверностью (коэффициент детерминации R^2 равен 0,9749) приближен логарифмической зависимостью, показанной на рис. 12.

Анализ рис. 11 и 12 позволяет сделать некоторые качественные выводы, касающиеся особенностей напряженно-деформированного состояния СПБУ при различных глубинах задавливания. Несмотря на то что в целом полученные зависимости имеют нелинейный характер, причем увеличение глубины задавливания опор приводит к выходу максимального напряжения узла опорной колонны к асимптоте, реалистичные условия заглубления — первые десятки метров — достаточно точно описываются линейной зависимостью. Это обстоятельство позволяет существенно упростить выполнение работ по прогнозу устойчивости СПБУ при сейсмических воздействиях для определения оптимальной глубины задавливания опор в грунт.

4. Заключение

Анализ устойчивости объектов инфраструктуры при различных внешних воздействиях является важной задачей, успешное решение которой напрямую связано с прогнозом рисков. Сложность построения реалистичных моделей воздействий и корректных моделей свойств материалов приводит к тому, что анализ рисков выполняется с помощью инженерных подходов: часто используются корреляционные зависимости, позволяющие оценить воздействия и свойства для конкретных регионов.

В работе представлен альтернативный инженерному подходу к решению частной задачи — задачи анализа устойчивости самоподъемной буровой установки, использующейся при проведении буровых работ на шельфе, при внешних сейсмических воздействиях. Представлена математическая модель данного процесса, основанная на динамическом анализе контактной задачи теории упругости. Для решения поставленной задачи был использован метод конечных элементов с использованием схемы, предварительно верифицированной на задаче, имеющей известное аналитическое решение.

В ходе работы появилась возможность рассматривать различные аспекты проблемы потери устойчивости самоподъемной буровой установки. Так, было продемонстрировано, что, помимо степени выраженности сейсмического воздействия, очевидно связанной с процессом потери

устойчивости, важную роль также играют глубина задавливания опорных колон буровой установки в донный грунт и его механические свойства. Было обнаружено, что в рабочем диапазоне глубин задавливания опор зависимость между максимальным напряжением, возникающим в элементах буровой установки при сейсмическом воздействии, и глубиной задавливания является линейной, что существенно упрощает некоторые задачи эксплуатации буровых установок.

Ясно, что некоторые аспекты механических процессов, протекающих в рассматриваемой системе, не были рассмотрены в рамках данной работы. Так, в данной работе донный грунт рассматривался как однородная изотропная линейно-упругая среда, хотя для корректного описания его поведения более необходимо использовать модель пластического течения. Условие однородности также может быть нарушено, что может повлиять на результаты анализа устойчивости. Наконец, предположение о возможности рассмотрения сейсмического воздействия как плоской упругой волны также представляется значительным упрощением. Тем не менее все перечисленные недостатки могут быть устранены без значительных изменений представленного подхода к моделированию: более корректное описание сейсмического воздействия может быть выполнено при незначительном изменении граничных условий, а неоднородность донных грунтов может быть учтена при построении модели их механических свойств. Более существенную проблему представляет собой необходимость учета пластического течения грунта: несмотря на то что подходы к численному моделированию деформирования упругопластических сред известны и развиты, на практике существует ограниченное количество способов изучения определяющих соотношений морских отложений экспериментальными методами. Более того, задача распространения точечных определений пластического потенциала донных грунтов остается актуальной. Таким образом, несмотря на принципиальную возможность решения рассмотренной задачи в упругопластической постановке, результаты этого решения могут оказаться некорректными не из-за несовершенства численной модели, но из-за неточности задания реологических свойств грунтов. Наконец, доработка представленной в работе модели может быть осуществлена путем усовершенствования модели самой самоподъемной буровой установки: могут быть более корректно поставлены условия контакта опорных колонн с понтоном. Это позволит детально проанализировать вопросы крена и дифферента установки, являющиеся актуальными при эксплуатации буровой установки.

Несмотря на перечисленные недостатки, представленная в работе модель уже сейчас может быть использована для изучения процессов, протекающих при сейсмических воздействиях на самоподъемные буровые установки. Дополнение развитых инженерных подходов к анализу устойчивости буровых установок результатами численного моделирования позволит повысить достоверность прогноза и снизить технологические и экологические риски при освоении шельфовых месторождений углеводородов.

Список литературы (References)

- Агагусейнов Ю. А., Вишневецкая Э. Л., Кулиев И. П. и др. Самоподъемные плавучие буровые установки. — М.: Недра, 1979.
Agaguseynov Yu. A., Vishnevskaya E. L., Kuliev I. P. et al. Samopod'emnye plavuchie burovye ustanovki [Self-lifting floating drilling rigs]. — Moscow: Nedra, 1979 (in Russian).
- Алешин А. С. Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов. — М.: Светоч плюс, 2010.
Aleshin A. S. Sejsmicheskoe mikrorajonirovanie osoboответstvennyh ob'ektov [Seismic microzoning of especially critical objects]. — Moscow: Svetoch plus, 2010 (in Russian).
- Золотухин А. Б., Гудместад О. Т., Ермаков А. И. и др. Основы разработки шельфовых нефтегазовых месторождений и строительство морских сооружений в Арктике. — М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2000.
Zolotuhin A. B., Gudmestad O. T., Ermakov A. I. et al. Osnovy razrabotki shel'fovyyh neftegazovyh mestorozhdenij i stroitel'stvo morskikh sooruzhenij v Arktike [Basics of offshore oil and gas fields development and construction of arctic offshore structures]. — Moscow: GUP Izd-vo «Neft' i gaz» RGU nefti i gaza im. I. M. Gubkina, 2000 (in Russian).

- Казанин Г. С., Казанин А. Г., Иванов Г. И., Саркисян М. В.* Инновации для шельфа. Инженерно-геологические технологии для работы в акваториях Арктике // *Neftegaz.ru*. — 2017. — № 1. — URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/geologorazvedka/539081-innovatsii-dlya-shelfa-inzhenerno-geologicheskie-tekhnologii-dlya-raboty-v-akvatoriyakh-arktike> (дата обращения: 14.12.2021).
- Kazanin G. S., Kazanin A. G., Ivanov G. I., Sarkisyan M. V.* Innovatsii dlya shel'fa. Inzhenerno-geologicheskie tekhnologii dlya raboty v akvatoriyah Arktike [Innovations for shelf. Engineering and geological technologies for offshore studies in Arctic] // *Neftegaz.ru*. — 2017. — No. 1 (in Russian). — Available at: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/geologorazvedka/539081-innovatsii-dlya-shelfa-inzhenerno-geologicheskie-tekhnologii-dlya-raboty-v-akvatoriyakh-arktike> (accessed: 14.12.2021).
- Марченко И. А.* Особенности инженерных изысканий для постановки буровых платформ в арктических морях // *Вести газовой науки*. — 2019. — Т. 39, № 2. — С. 149–156.
- Marchenko I. A.* Osobennosti inzhenernykh izyskaniy dlya postanovki burovyykh platform v arkticheskikh moryakh [Features of engineering surveys for drilling platforms installation in Arctic seas] // *Vesti gazovoy nauki*. — 2019. — Vol. 39, No. 2. — P. 149–156 (in Russian).
- Пирогова А. С., Тихоцкий С. А., Токарев М. Ю., Сучкова А. В.* Прогноз упругопрочностных свойств придонных грунтов на основе инверсии данных сейсморазведки сверхвысокого и ультравысокого разрешения // *Геофизические процессы и биосфера*. — 2019. — Т. 18, № 4. — С. 191–202.
- Pirogova A. S., Tikhotskiy S. A., Tokarev M. Yu., Suchkova A. V.* Estimation of elastic stress-related properties of subbottom sediments via inversion of ultra and very high-resolution seismic data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. — 2019. — Issue 55. — P. 1755–1765. (Original Russian paper: *Pirogova A. S., Tikhotskiy S. A., Tokarev M. Yu., Suchkova A. V.* Prognoz uprugoprochnostnykh svoystv pridonnykh gruntov na osnove inversii dannykh sejsmorazvedki sverhvyssokogo i ul'travysokogo razresheniya // *Geofizicheskie processy i biosfera*. — 2019. — Vol. 18, No. 4. — P. 191–202.)
- Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок (ПБУ) и морских стационарных платформ (МСП) / Рос. мор. регистр судоходства.* — М.: Рос. мор. регистр судоходства, 2012. — 480 с.
- Pravila klassifikatsii, postroyki i oborudovaniya plavuchikh burovyykh ustanovok (PBU) i morskikh statsionarnyykh platform (MSP) / Ros. mor. registr sudokhodstva* [Rules for the classification, construction and equipment of mobile offshore drilling units and fixed offshore platforms / Russian Maritime Register of Shipping]. — Moscow, 2012. — 480 p. (in Russian).
- Тихоцкий С. А., Дубиня Н. В., Начев В. А.* Новый подход к оценке физико-механических свойств донных отложений в ходе проведения пробоотбора // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. — 2020. — Т. 495, № 2. — С. 18–22.
- Tikhotskiy S. A., Dubinya N. V., Nachev V. A.* New Approach of the Estimation of Rheological Properties of Seafloor Sediments During Sampling Process // *Doklady Earth Sciences*. — 2020. — Vol. 495, Issue 2. — P. 880–883. (Original Russian paper: *Tikhotskiy S. A., Dubinya N. V., Nachev V. A.* Novyj podhod k ocenke fiziko-mekhanicheskikh svoystv donnykh otlozhenij v hode provedeniya probootbora // *Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle*. — 2020. — Vol. 495, No. 2. — P. 18–22.)
- Чемодуров В. Т., Пшеничная-Ажержмачёва К. С.* Мониторинг окружающей среды при разработке морских месторождений углеводородов // *Строительство и техногенная безопасность*. — 2014. — № 49. — С. 116–120.
- Chemodurov V. T., Pshenichnaya-Azhermachyova K. S.* Monitoring okruzhayushchej sredy pri razrabotke morskikh mestorozhdenij uglevodorodov [Environment monitoring during offshore hydrocarbon reservoir development] // *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'*. — 2014. — No. 49. — P. 116–120 (in Russian).
- Франк Ф., Мизес Р.* Дифференциальные и интегральные уравнения математической физики. Часть вторая. — Л.–М.: ОНТИ. Главная редакция общетехнической литературы, 1937. — С. 290–295.
- Frank F., Mises R.* Die differential and integralgleichungen der mechanik und physik. Vol. 2 / Braunschweig, Weimarer Republik: Druck und Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn, 1925. (Russ. ed.: *Gurevich L. E.* Differentsial'nye i integral'nye uravneniya matematicheskoy fiziki. Chast' vtoraya. — Leningrad–Moscow: ONTI. Glavnaya redakciya obshchetekhnicheskoy literatury, 1937. — P. 290–295.)
- Hossain M. S., Hu Y., Randolph M. F., White D. J.* Limiting cavity depth for spudcan foundations penetrating clay // *Geotechnique*. — 2005. — Vol. 55, No. 9. — P. 679–690.
- Randolph M. F., Gaudin C., Gourvenec S. M., White D. J., Boylan N., Cassidy M. J.* Recent advances in offshore geotechnics for deep water oil and gas developments // *Ocean Engineering*. — 2011. — No. 38. — P. 828–834.
- Xiao Z., Fu D., Zhou Z., Lu Y., Yan Y.* Effects of Strain Softening on the Penetration Resistance of Offshore Bucket Foundation in Nonhomogeneous Clay // *Ocean Engineering*. — 2019. — No. 193.