

УДК 539.372

## НОВЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ХОДЕ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОБООТБОРА

© 2020 г. Член-корреспондент РАН С. А. Тихоцкий<sup>1,2</sup>, Н. В. Дубиня<sup>1,2,\*</sup>, В. А. Начев<sup>1,3</sup>

Поступило 09.10.2020 г.

После доработки 12.10.2020 г.

Принято к публикации 12.10.2020 г.

Работа посвящена вопросу возможности изучения реологических свойств верхних слоев донных отложений в процессе пробоотбора с использованием гравитационных донных трубок. Рассматривается задача погружения трубки пробоотбора на морское дно, являющееся средой со сложной вязкоупруго-пластической реологией. Определение механических свойств этих отложений является одной из важнейших задач, которые необходимо решать при освоении нефтегазовых месторождений, расположенных на арктическом шельфе: корректное предсказание реакции объектов инфраструктуры на внешние воздействия (землетрясения, сильные волны) необходимо для предотвращения серьезных аварий, происходящих на шельфе. Представлен новый подход к определению параметров, определяющих устойчивость несущих конструкций объектов инфраструктуры: статических упругих модулей сред, слагающих верхние слои донных отложений, их параметры пластичности и ползучести. Источником информации об этих параметрах является динамика погружения трубки пробоотбора в морское дно — измеряемая зависимость ускорения трубки от времени. Решается обратная задача реконструкции механических свойств донных отложений по характеру этой зависимости. Представлены результаты решения соответствующей прямой задачи с помощью метода конечных элементов. Продемонстрирована возможность определения механических свойств донных отложений по таким параметрам, как время, прошедшее до полного торможения донной трубки, и глубина ее погружения при пробоотборе.

*Ключевые слова:* арктический шельф, модель механических свойств, пробоотбор

DOI: 10.31857/S2686739720120117

В настоящий момент топливно-энергетический комплекс России активно развивается в том числе и за счет освоения новых месторождений углеводородов, расположенных на Российском континентальном шельфе. В стадии, близкой к постановке буровых установок и строительству объектов инфраструктуры, находятся десятки лицензионных участков в Баренцевом, Карском, Восточно-Чукотском, Охотском морях и море Лаптевых. При освоении этих объектов возникают технологические трудности, не характерные для освоения месторождений, расположенных на материке. Одну из основных трудностей представляют создание инфраструктуры и бурение:

при освоении месторождений, расположенных на континентальном шельфе, ключевую роль играют самоподъемные буровые установки. К инфраструктуре при освоении шельфовых месторождений предъявляются весьма жесткие требования: несущие конструкции должны не только обеспечивать бесперебойную работу, но и быть устойчивыми к сильным внешним воздействиям — сильным волнам, последствиям землетрясений и контакту с торосами. Для того чтобы должным образом проектировать несущие конструкции инфраструктуры при освоении месторождений на континентальном шельфе, необходимо корректно решать ряд задач их устойчивости при внешних воздействиях [1]. Ключевую роль в таких расчетах играют механические свойства верхних слоев донных отложений: от того, насколько прочна или пластична среда, в которую погружаются несущие конструкции, сильно зависит механическое поведение всего объекта инфраструктуры. В связи с этим задачу оценки механических свойств верхних слоев донных отложений теми или иными методами можно отнести к ключевым

<sup>1</sup> Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: Dubinya.NV@gmail.com

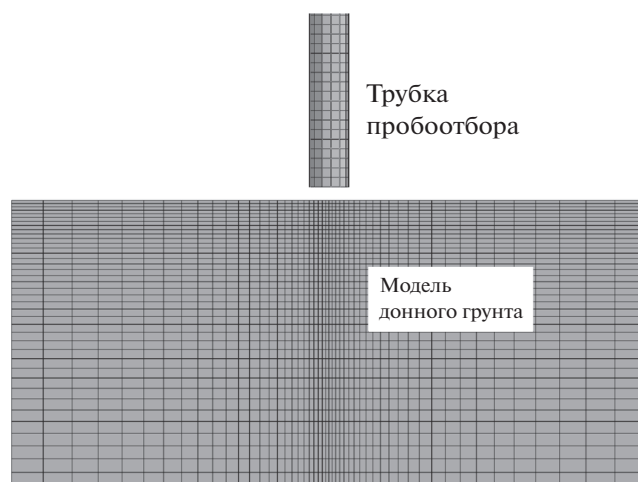


Рис. 1. Схема расчета для задачи погружения донной трубки.

задачам геомеханики при освоении нефтегазовых месторождений арктического шельфа.

Существуют различные методы оценки механических свойств верхних слоев донных отложений: к наиболее распространенным можно отнести детальные сейсмические съемки и инженерное бурение. При освоении шельфовых месторождений инженерное бурение оказывается весьма ресурсозатратным и используется редко, сейсмические исследования проводятся значительно активнее [2]. В то же время сейсмические исследования позволяют судить о скоростях упругих волн в средах. При этом верхние слои донных отложений обладают сложной вязко-упруго-пластической реологией, параметры которой затруднительно определить по результатам интерпретации данных сейсмической съемки [3, 4].

В связи с этим актуальна задача создания альтернативных методов оценки механических свойств верхних слоев донных отложений [5], одному из которых посвящена данная работа. В основе этого метода лежит идея об оценке механических свойств отложений в процессе прободоотбора, осуществляемого с использованием донных гравитационных трубок. Прободоотборник, использующийся для таких задач, можно рассматривать как полу трубку, которая сбрасывается с борта исследовательского судна, опускается до дна под действием силы тяжести и погружается в него по инерции. Во время погружения трубки непосредственно в донные отложения ее скорость снижается, причем особенности этого снижения определяются механическими свойствами донных отложений: статическими упругими модулями, параметрами закона пластического течения и ползучестью [6]. Иными словами, динамика погружения трубки прободоотбора в дно определяется именно теми параметрами, которые

необходимо оценивать перед решением задач устойчивости несущих конструкций объектов инфраструктуры. В связи с этим можно сформулировать обратную задачу оценки механических свойств верхних слоев донных отложений в процессе прободоотбора по данным о ходе процесса погружения в них донной трубки [7]. Ключевым фактором для решения обратной задачи является регистрируемая техническими средствами зависимость ускорения донной трубки от времени на протяжении всего процесса погружения в донные отложения. По особенностям этой зависимости можно определить возможные реологические параметры грунта и снизить тем самым неопределенность в построении модели механических свойств донных отложений.

Для решения задачи погружения донной трубки в отложения со сложной реологией активно используется численное моделирование методом конечных элементов [8]. Первым этапом решения поставленной обратной задачи является решение набора прямых задач: определение динамики погружения донной трубки в вязко-упруго-пластическую среду с варьирующимися реологическими параметрами: упругими модулями, параметрами закона пластического течения, коэффициентами, определяющими ползучесть донных отложений. Решается контактная задача: трубка представляется абсолютно жестким телом, падающим на полупространство, заполненное средой с указанными свойствами. Схема рассматриваемой задачи представлена на рис. 1. Можно заметить, что в области предполагаемого контакта сетка существенно сгущается.

По мере погружения донной трубки в ее окрестности начинает формироваться зона накопления необратимых пластических деформаций. На рис. 2 представлено распределение ин-

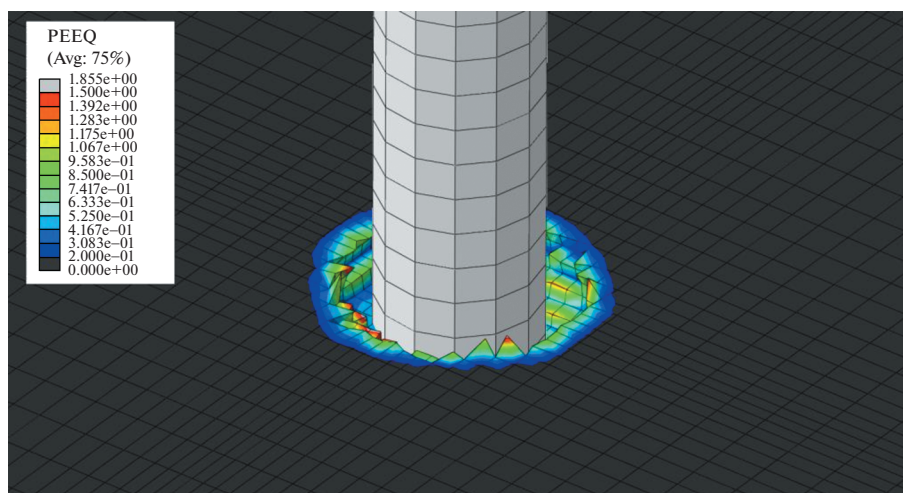


Рис. 2. Распределение накопленных пластических деформаций в процессе погружения трубки пробоотбора в донные отложения.

тенсивности накопленных к определенному моменту деформаций сдвига в окрестности трубки пробоотбора.

Динамика процесса погружения трубки пробоотбора в донные отложения показана на рис. 3. Разными цветами показаны различные параметры донных отложений: рассмотрены среды с варьирующимися механическими параметрами: модулем Юнга, когезией, углом внутреннего трения и плотностью. За начало отсчета принят момент касания трубкой дна; ясно, что до этого момента свойства дна на динамику падения трубки не влияют. Видно, что изменение механических свойств явным образом приводит к изменению динамики погружения трубки: изменяется как максимальная глубина погружения трубки, так и время, прошедшее до ее полной остановки. Варьирующиеся свойства рассматриваемых сред пред-

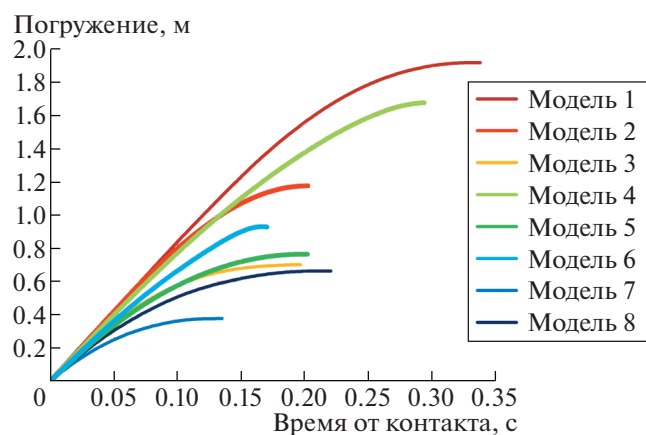


Рис. 3. Изменение кинетической энергии трубки в процессе пробоотбора.

ставлены в табл. 1. Не варьировались такие параметры, как коэффициент Пуассона (0.3) и угол дилатансии ( $0^\circ$ , пластическое упрочнение не рассматривалось).

На рис. 4 демонстрируется, каким образом может быть решена поставленная обратная задача: ключевые параметры зависимостей, представленных на рис. 3, – глубина максимального погружения трубки пробоотбора в грунт и время до полной ее остановки – представлены как функции механических свойств верхних слоев донных отложений. Из табл. 1 можно сделать вывод о том, что в рассматриваемых моделях наиболее сильно менялись модуль Юнга  $E$  и угол внутреннего трения  $\varphi$ . По горизонтальной оси на рис. 4 отложена

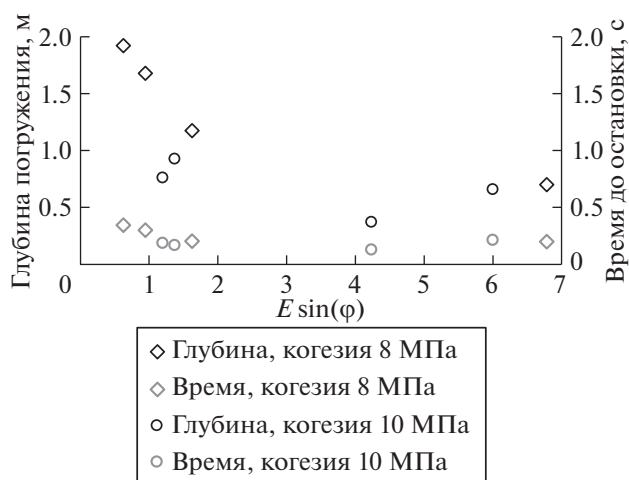


Рис. 4. Зависимость параметров динамики погружения трубки пробоотбора от механических свойств верхних слоев донных отложений.

**Таблица 1.** Свойства сред в рассмотренных моделях

Модель	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль Юнга, МПа	Когезия, МПа	Угол внутреннего трения, °
1	1790	2.2	8	16.2
2	1910	3.8	8	25.3
3	1940	12.7	8	32.3
4	1800	3.7	8	14.7
5	1900	3.5	10	20.0
6	1900	4.0	10	20.0
7	1900	10.0	10	25.0
8	1900	12.0	10	30.0

их функция – произведение модуля Юнга на синус угла внутреннего трения.

Представленные в данной работе результаты носят иллюстративный характер и призваны подтвердить возможность использования измерений параметров процесса погружения трубки в грунт для оценки физико-механических свойств донных отложений. При полноценном решении обратной задачи необходимо варьировать все реологические параметры донных отложений и использовать современные методы анализа данных. С другой стороны, в рассмотрение могут быть включены дополнительные данные: точки перегиба зависимостей, изображенных на рис. 4, или сами регистрируемые кривые, характеризующие динамику погружения трубки. Задачу изучения неопределенности, возникающей при решении сформулированной обратной задачи, и определение области эквивалентности ее решений можно отнести к основным приоритетам дальнейшего развития описанного исследования. Кроме того, существует возможность проведения контролируемых лабораторных экспериментов для донных отложений с известными реологическими параметрами, что позволит верифицировать подход к рассмотрению процесса пробоотбора, описанный в работе.

Результаты, описанные в работе, в дальнейшем будут использованы для развития методов оценки механических свойств донных отложений и построения моделей их механических свойств, необходимых для решения задач устойчивости несущих конструкций объектов инфраструктуры, актуальных при освоении нефтегазовых месторождений, расположенных на арктическом континентальном шельфе.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы повышения конкурентоспособности МФТИ (Программа 5–100).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Марченко И.А.* Особенности инженерных изысканий для постановки буровых платформ в арктических морях // Вести газовой науки. 2019. № 2 (39). С. 149–156.
2. *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 (61). С. 120–124.
3. *Randolph M.F., Cassidy M.J., Gourvenec S.M., Erbrich C.* Challenges of Offshore Geotechnical Engineering // Proc. 16th Int. Conf. “Soil Mechanics and Geotechnological Engineering”. 2005. V. 1. P. 123–176.
4. *Pirogova A.S., Tikhotskii S.A., Tokarev M.Y., Suchkova A.V.* Estimation of Elastic Stress-related Properties of Bottom Sediments via the Inversion of Very- and Ultra-high-Resolution Seismic Data // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 2019.V. 55. № 11. P. 1755–1765.
5. *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. № 38. P. 818–834.
6. *Hossain M.S., Hu Y., Randolph M.F., White D.J.* Limiting Cavity Depth for Spudcan Foundations Penetrating Clay // Geotechnique. 2005. V. 55. № 9. P. 679–690.
7. *Tikhotskiy S., Dubinya N., Krasnova M.* Problems of Establishing Mechanical Properties Model and Stability Analysis of Supporting Constructions of Infrastructure Facilities for Offshore Oil Field Exploration // Proceedings of Far East Hydrocarbons. 2015. P. 1–5.
8. *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. № 193.

## NEW APPROACH OF THE ESTIMATION OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF SEAFLOOR SEDIMENTS DURING SAMPLING PROCESS

Corresponding member of the RAS S. A. Tikhotskiy<sup>a,b</sup>, N. V. Dubinya<sup>a,b,#</sup>, and V. A. Nachev<sup>a,c</sup>

<sup>a</sup> *Moscow institute of Physics and Technology, Moscow, Russian Federation*

<sup>b</sup> *Schmidt institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>c</sup> *Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>#</sup> *E-mail: Dubinya.NV@gmail.com*

The paper is devoted to the problem of the possibility to study rheological properties of seafloor sediments during sampling process with usage of tube samplers. The problem of sampling tube penetration through soil with complicated visco-elasto-plastic rheology is considered. Estimation of mechanical properties of this medium is among the most important problems emerging during hydrocarbon fields located at Arctic shelf exploration. The proper evaluation of infrastructure objects reaction to external effects (earthquakes, large waves) is needed to reduce the risks of serious accidents at shelf. The paper presents a new approach to determine parameters governing infrastructure stability: static elastic moduli of seafloor sediments, their plastic and viscous properties. Dynamics of tube sampler penetration – measurable dependency of tube acceleration – acts as the source of information regarding these parameters. The inverse problem of reconstructing mechanical properties of seafloor sediments from the characteristics of this dependency is being solved. The paper presents the results of solving the corresponding direct problem with the use of finite element method. The possibility to estimate mechanical properties of seafloor sediments from data on such parameters as time passed until the complete stop of tube sampler and depth of its penetration is demonstrated.

*Keywords:* arctic shelf, model of mechanical properties, core sampling