Таким образом, предлагаемый алгоритм учета усталостного износа БТ позволяет существенно повысить экономическую эффективность бурения, снизить аварийность по сравнению с традиционными подходами, заключающимися в отбраковке труб по наработке всего комплекта БТ.

Литература

1. Прогнозирование остаточного ресурса бурильных труб / Д. Л. Бакиров, Д. Я. Патрушев, А. К. Шириев [и др.] // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2023. – № 12 (372). – С. 13–18. – DOI 10.33285/0130-3872-2023-12(372)-13-18
2. Gubaidullin, R. I. Innovative approach to analysis drilling tool works / R. I. Gubaidullin // Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Petroleum Technology Conference, 12–15 oct. 2021. – Virtual, Online, 2021. – DOI 10.2118/SPE-206458-MS
3. Стандарт DS-1. Инспекция бурильных колонн / Т. Х. Хилл, Т. М. Вадсворт, К. Бранч, Б. Хаббарт. – Houston, TX : TH HILL Associates, Inc, 2004. – Т. 3. – 253 с.
4. Recommended Practice for Drill Stem Design and Operating Limits : API RP 7 G. – 14th edition. –Washington : API, 1998. – DC : Aug. 1.
5. IADC Drilling Manual // International Association of Drilling Contractors, March–Apr. 2000. – Vol. 11.

УДК 620.178.4/6

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИНДЕНТИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЧИВОСТИ МОДУЛЯ ЮНГА ГОРНЫХ ПОРОД ИЗУЧАЕМОГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА

Н. В. Бочаров, В. М. Ткачев

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Приведены результаты исследования изменчивости модуля Юнга горных пород методом индентирования. Особенностью испытания методом индентирования является небольшая область контакта породы и индентора, что делает возможным исследования небольшого локально однородного объема горной породы. Такой подход позволяет получить полное представление о механических свойствах всех имеющихся на данной глубине механических фаций, что невозможно осуществить стандартными испытаниями на полноразмерных образцах ввиду значительной неоднородности карбонатных горных пород. Расширенный объем исходной информации об упругих свойствах горных пород направлен на улучшение геомеханических моделей, применяемых для проектирования дизайна гидроразрыва пласта и т. д.

Ключевые слова: геомеханика, горные породы, механические свойства, индентирование, неразрушающий метод, модуль Юнга.

APPLICATION OF THE INDENTATION METHOD TO ASSESS THE VARIABILITY OF THE YOUNG'S MODULUS OF THE ROCKS OF THE STUDIED GEOLOGICAL SECTION

N. V. Bocharov, V. M. Tkachev

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The paper presents the results of studying the variability of the Young's modulus of rocks using the indentation method. An advantage of the indentation test is a small area of contact between the rock and the indenter, which makes it possible to study a small locally homogeneous volume of rock. This approach allows us to get a complete representation of the mechanical properties

of all mechanical facies present at a given depth, which cannot be done by standard tests on full-size samples due to the significant heterogeneity of carbonate rocks. The expanded volume of initial information on the elastic properties of rocks is aimed at improving geomechanical models used for hydraulic fracturing design, etc.

Keywords: geomechanics, rocks, mechanical properties, indentation, non-destructive method, Young`s modulus.

Рост значимости геомеханического моделирования для решения задач по оптимизации разработки нефтегазовых месторождений усиливает потребность в инновационных методах исследования керна для получения дополнительных характеристик, значительно повышающих точность и достоверность геомеханических моделей [1]. Получение качественных исходных данных требует проведения значительного объема лабораторных испытаний, включая керновые исследования упруго-прочностных свойств. Надежность входных данных подтверждается повторяемостью (сходимостью) результатов лабораторных измерений и зависит от обоснованности подходов к выбору локализации интервалов отбора серий образцов керна. Это особенно заметно при исследовании трещинно-кавернового коллекторов. Литологическое разнообразие усиливает неопределенность, а различие масштабных факторов лабораторных и скважинных исследований снижает точность привязки результатов, полученных статическими и динамическими методами. Для получения достоверных корреляционных зависимостей упруго-прочностных свойств пород пласта необходимо обеспечить охват свойств всех механических фаций [2]. Однако исследование карбонатных горных пород осложняется тем, что в стандартных образцах может присутствовать несколько разнородных механофаций, что приводит к получению усредненных упруго-прочностных свойств на изучаемой глубине. Уточненную оценку можно получить при использовании дополнительных инструментов керновых исследований, например, испытание методом индентирования.

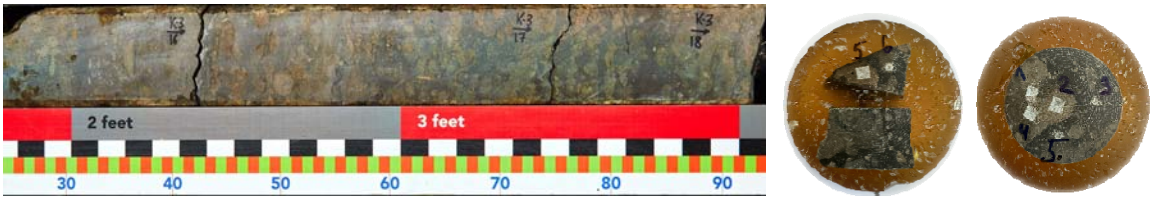
Цель данной работы – определение упругих характеристик горных пород в неоднородных карбонатных разрезах с присутствием разных механических фаций на одной глубине методом индентирования.

Объекты и методики исследований. В данной работе исследовался керн скважины Х Мармовичского нефтяного месторождения. Было выполнено несколько испытаний: два многостадийных трехосных испытания на сжатие стандартных образцов с целью определения упругих свойств; шесть испытаний методом индентирования на вертикально ориентированных фрагментах горных пород, зафиксированных в эпоксидной смоле; три испытания – методом индентирования на торцах вертикальных стандартных образцов.

Испытания методом индентирования для определения модуля Юнга горных пород проводились по методу Оливера–Фарра [3], но с авторской модификацией, заключающейся в циклическом воздействии на испытуемый материал в одном и том же месте, с ростом максимального значения силы вдавливания, что позволяет снизить влияние масштабного фактора, который обуславлен композиционной природой материала горных пород. По мере возрастания нагрузки и соответственно глубины вдавливания и контактной поверхности между индентором и испытуемым материалом увеличивается интегральная сущность дюрометрического испытания, регистрирующего реакцию локально однородного материала в целом, а не его отдельных составляющих (минеральных зерен). Многостадийные трехосные испытания на сжатие проводились

по ступенчатой схеме с последовательным приближением действующих напряжений обжима (боковое давление) и осевого (горного давления) к пластовым условиям. При этом было дополнительное циклическое изменение осевого напряжения при постоянном напряжении обжима на определенных стадиях испытания с постоянным поровым давлением.

Результаты исследований и их обсуждение. Как показано на рис. 1, в работе исследовался керн со значительной неоднородностью и чередованием различных литологических фаций, отличающихся механическими свойствами. Исследование упруго-прочностных свойств по стандартным методикам на образцах ∅ 30 × 60 мм или ∅ 38 × 76 мм дает усредненные значения упругих свойств, что не позволяет точно оценить диапазон свойств всех механических фаций на данной глубине.

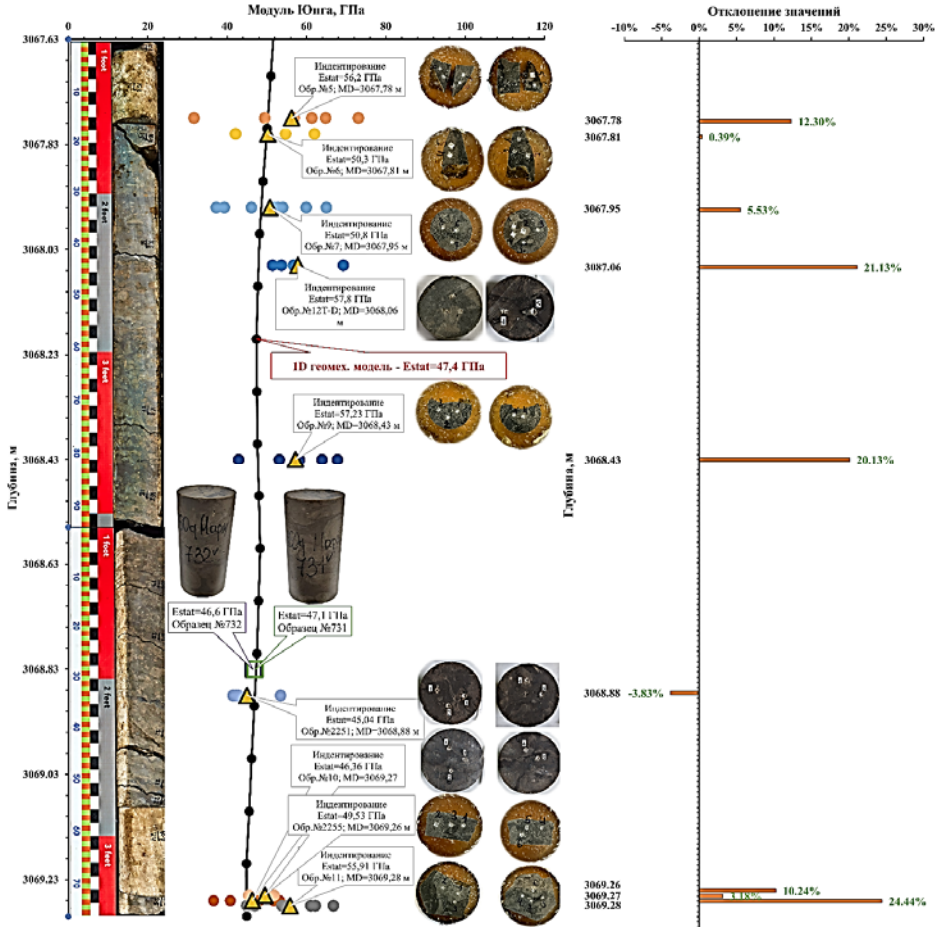


а) *б*)

Рис. 1. Фото керна, извлеченного из скважины Х Мармовичского месторождения:
а – полноразмерный керн; *б* – фрагменты керна, зафиксированного
в эпоксидной смоле, с отпечатками разных размеров, образованных
после испытания индентированием

Испытание образцов горных пород методом индентирования дает возможность определить механические свойства всех литологических фаций с учетом минералогичского состава, характеризующихся различием упругих и прочностных свойств.

На рис. 2 приведены основные результаты данной работы по определению модуля Юнга стандартным способом и методом индентирования. Следует отметить, что в результате стандартного многостадийного трехосного сжатия устанавливается усредненное значение свойств одного исследуемого образца. В то же время испытание методом индентирования позволяет определить диапазон значений матричных упругих характеристик на одном образце, отобранном с определенной глубины, что помогает более точно охарактеризовать распределение упругих свойств. Также представлена гистограмма процентных отклонений средних значений статического модуля Юнга, определенных методом индентирования, от принятой в РУП «ПО «Белоруснефть» референсной кривой распределения статического модуля Юнга по стволу скважины, построенной на основе акустичекого каротажа и откалиброванной по результатам стандартных испытаний, – отклонение не превышает 25 %, что говорит о приемлемости использования метода индентирования как дополнительного инструмента в исследовании механических свойств горных пород.



а) *б*)

Рис. 2. Результаты исследования:
а – сводный планшет, включающий фотоколонку керна, результаты 1D геомеханического моделирования (модуль Юнга), результаты стандартных испытаний, результаты испытаний методом индентирования: □ – трехосное многостадийное сжатие; ● – статический модуль Юнга, определенный в процессе одного акта индентирования; ▲ – среднее значение модуля Юнга, определенный в процессе индентирования одного образца;
б – отклонение средних значений модуля Юнга, определенного методом индентирования, от принятой в РУП «ПО «Белоруснефть» 1D геомеханической модели (распределения модуля Юнга)

Таким образом, на примере горных пород Припятского прогиба проведено сопоставление результатов дюрометрических и стандартных статических исследований модуля Юнга. Анализ полученных результатов позволил сформулировать гипотезу о возможности применения метода индентирования для получения детального распределения модуля Юнга по длине кернового образца. Результаты дюрометрического исследования в совокупности с данными, полученными при объемном сжатии стандартных образцов, сопоставлены с каротажными диаграммами распределения модуля Юнга. Высокая степень детализации наиболее актуальна для оценки физико-механических свойств интервалов с тонкочередующимися пропластками, а также при подготовке граничных условий для построения цифрового двойника керна. При этом для проведения испытаний не требуется специализированного оборудова-

ния, а также трудоемкой подготовки образцов. Также метод индентирования позволяет проводить экспресс анализ упругих свойств горных пород на частицах шлама в скважинах, где отбор керна не предусмотрен.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (грант №ГР 20240634 от 22.04.2024 г.).

Литература

1. Специализированные лабораторные исследования керна для решения задач бурения, ГРП и разработки нефтегазовых месторождений / М. Д. Субботин, В. А. Павлов, Д. О. Кроль [и др.] // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2020. – №. 10. – С. 84–92.
2. Использование предварительной 1D геомеханической модели для планирования исследований керна / В. А. Фадеева [и др.] // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2020. – № 7. – С. 29–35.
3. Oliver, W. C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W. C. Oliver, G. M. Pharr // Journal of materials research. – 1992. – Vol. 7, N 6. – P. 1564–1583.

УДК 641.642

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗИМНЕЙ БЕЗОПАСНОСТИ СВЕРХБОЛЬШИХ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ СЫРОЙ НЕФТИ

Янян Юй

Чжэцзянская нефтехимическая компания с ограниченной ответственностью, Китайская Народная Республика

А. Б. Невзорова

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Отмечено, что большие незакрепленные резервуары для хранения нефти являются одними из передовых устройств нефтяных запасов, и исследованиям их безопасности уделено большое внимание. В качестве объекта исследования выбран недавно построенный большой резервуар с плавающей крышей размером 15 × 10^4 $м^3$ в Китае. С использованием методом конечных элементов ANSYS Workbence проведен анализ стрессовых условий, напряжений и деформаций резервуаров под воздействием температуры при различных уровнях заполнения (от 0 до 20 м). Даны рекомендации по улучшению условий эксплуатации.

Ключевые слова: топливные емкости, температурное поле, анализ напряжений, ограниченный элемент, ANSYS.

WINTER SAFETY STUDY OF ULTRA-LARGE CRUDE OIL STORAGE TANKS

Yu Yangyang

A refining and chemical integration project of Zhejiang Petrochemical Co., Ltd, China

A. Nevzorova

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

Large loose oil storage tanks are one of the advanced devices of oil reserves, and research on their safety has attracted a lot of attention. In this article, a newly built large tank with a float-