УДК 622.2

Определение механических свойств песчаника неразрушающим методом

Х.РАДЖАОАЛИСОН¹, А.ЗЛОТКОВСКИЙ¹, Ж.РАМБОЛАМАНАНА²

¹ Университет науки и технологии AGH, Краков, Польша

² Институт-обсерватория геофизики Антананариву, Антананариву, Республика Мадагаскар

Понимание физико-механических свойств горных пород считается важным в бурении, геотехнике и строительстве. Осведомленность об этих параметрах породы помогает, например, избежать или минимизировать нестабильность зоны вокруг ствола скважины во время бурения. Лабораторный эксперимент по изучению этих параметров может быть выполнен двумя различными методами: статическим, когда образец разрушается после испытания, и динамическим, известным как неразрушающий метод. Неразрушающий метод с использованием ультразвуковых волн в серии различных условий напряжения, начиная с 7 до 56 МПа с шагом в 7 МПа, был использован для характеристики механических свойств сухого песчаника из Збилутова при 20 и 80 °С. Скорость первичных и вторичных волн в этих диапазонах была записана для определения изменения механических свойств. Результаты показали, что модуль Юнга, объемный модуль, модуль сдвига и постоянная Ламе песчаника из Збилутова имеют положительную корреляцию с хорошим коэффициентом и увеличенным напряжением, в то время как коэффициент Пуассона показал отрицательную корреляцию. Кроме того, влияние температуры на параметры породы подтверждается уменьшением скорости первичной волны в двух разных диапазонах температур. Такие результаты необходимы при подготовке бурового раствора соответствующей плотности для бурения, что влияет на нестабильность ствола скважины.

Ключевые слова: механические свойства; неразрушающий метод; песчаник; напряжения; температурный эффект

Благодарность. Исследование было проведено за счет субсидии AGH 16.16.190.779 и AGH-UNESCO.

Как цитировать эту статью. Раджаоалисон Х. Определение механических свойств песчаника неразрушающим методом / Х.Раджаоалисон, А.Злотковский, Ж.Рамболаманана // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 113-117. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.113

Введение. Проектирование бурения, заканчивание скважины и добыча требуют понимания механических свойств окружающей породы, таких как модуль упругости и прочность на сжатие породы, определяющих параметры нестабильности ствола скважины, а также способствующих образованию трещин [2, 8]. Известно, что обрушение стенок скважины происходит из-за неправильного понимания этих параметров [3, 6]. Измерение таких параметров может проводиться двумя различными способами: статическим и динамическим. Статическое измерение может быть выполнено в лаборатории, где образец нагружается до разрушения, или с помощью испытаний непосредственно на объекте, в то время как динамическое измерение, или неразрушающий метод, проводится в лаборатории без разрушения образцов, для проведения такого эксперимента используются звуковые волны [17]. Скорости продольных V_p и поперечных V_s волн измеряются по данным каротажа или в лаборатории и используются для расчета динамических механических свойств породы [10, 11].

Многочисленные исследования подтверждают разницу между результатами этих двух методов. Статические измерения являются более реальными и близкими к фактическим инженерным потребностям, поскольку они представляют возникшую деформацию при большом количестве напряжений, называемой подземным высоконапряженным состоянием, в то время как динамические измерения являются более продолжительными и простыми [5, 9]. Следовательно, динамические модули сильно отличаются от статических, но оба метода необходимы для того, чтобы хорошо понять механические параметры горной породы. В большинстве случаев статические модули меньше, чем динамические. Такая разница зависит также от состояния горных пород. Она больше для непрочных пород и уменьшается с увеличением сцепления породы. Тем не менее, Нео Хи и др. установили связь между динамическими и статическими измерениями, которые могут быть использованы в случае, если статические измерения не могут быть проведены в лаборатории из-за отсутствия оборудования [16].

Во время бурения распределение локальных напряжений вокруг ствола скважины нарушается и изменяется, что способствует нестабильности ствола скважины. Таким образом, понима-

ние свойств породы в условиях повышенных напряжений и температуры является ключевым моментом для решения данной проблемы.

Методология исследований. Механические свойства породы характеризуются как упругими, так и неупругими свойствами. Упругие свойства – модуль Юнга, модуль сдвига, объемный модуль и коэффициент Пуассона; градиент разрушения и прочность пласта представляют неупругие свойства. Эластичные свойства связаны с сопротивлением объемной и структурной деформации, которая соответствует закону Гука при относительно небольшой деформации. Эта деформация зависит от действующей силы геологических условий, ее природы и таких модулей упругости как модуль Юнга E (2) и модуль сдвига μ (3). Оценка динамических механических свойств породы может быть выполнена с использованием акустических волн и рассмотрения образца породы как изотропного и линейно-упругого [1]. Затем отношение $V_{\Pi}/V_{\text{В}}$ и плотность ρ используются для расчета механических свойств образца породы [8]. Связь между скоростью, плотностью акустических волн и механическими свойствами породы показана в следующих формулах:

$$\nu = \frac{\frac{1}{2} - \left(\frac{V_{\text{В}}}{V_{\Pi}}\right)^2}{1 - \left(\frac{V_{\text{В}}}{V_{\Pi}}\right)^2}; \quad (1)$$

$$E = \rho \frac{V_{\Pi}^2(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)}; \quad (2)$$

$$\mu = \rho V_{\text{В}}^2; \quad (3)$$

$$\lambda = \rho(V_{\Pi}^2 - 2V_{\text{В}}^2); \quad (4)$$

$$AI = \rho V_{\Pi}, \quad (5)$$

где V_{Π} – скорость продольной волны, м/с; $V_{\text{В}}$ – скорость поперечной волны, м/с; ρ – объемная плотность, кг/м³, ν – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга, Па; μ – модуль сдвига, Па; λ – постоянная Ламе, Па; AI – акустический импеданс, кг·м⁻²·с⁻¹.

В эксперименте были использованы 12 образцов из Збилутова, расположенного в южной части Польши. Влага, находящаяся в образцах, удалялась с помощью электрической печи при 70 °С более 24 ч. Затем измерялась плотность каждого образца. Плотность сухого образца рассчитывалась по массе и объему образца. Оба конца образцов полировались и шлифовались параллельно до $\pm 0,20$ мм, чтобы минимизировать погрешность и защитить образец от повреждения из-за высоких напряжений. Кроме того, стороны цилиндра делались прямыми с точностью $\pm 0,30$ мм по всей длине каждого образца.

Для проведения динамических измерений использовался аппарат AVS 1000 (рис.1). Он состоит из параметрического передатчика, цифрового осциллографа Tektronix и звуковых валиков, содержащих преобразователи продольных (П) и поперечных (В) волн, а также приемники. Время прохождения П-волны и В-волны регистрируется, и их скорости рассчитываются как отношение длины образца к времени прохождения [12]. При ультразвуковом измерении используются высокочастотные сигналы, приблизительно 1000 кГц для продольных волн и 500 кГц для поперечных волн. Система откалибрована с использованием образцов алюминия и меди с известными скоростями.

Результаты и обсуждение. Значение плотности песчаника из Збилутова варьирует от 2,34 до 2,48 г/см³ при среднем значении 2,43 г/см³, в то время как пористость образцов варьирует от 2,80 до 4,95 % при среднем значении 4,23 %. В статье представлены средневзвешенные значения, выбранные потому, что на них не влияют значения отклонений. Корреляция между механическими свойствами и напряжением выражена центральной тенденцией измеренных значений в пределах диапазонов независимых значений.

Рис.1. Схема аппарата AVS 1000

Измерение механических свойств проводилась при двух разных температурах и локальных уровнях напряжений. Результат (рис.2) показал, что скорость продольных и поперечных волн пропорционально возрастала с ростом напряжений, но только скорость продольных волн обратно пропорциональна температуре. Температура вызвала снижение прочности образца. Повышенное напряжение закрывало трещину внутри образца [15]. Профиль акустического импеданса также показал увеличение скорости сжатия породы относительно напряжений (рис.3).

Кроме того, экспериментальные данные показали положительную корреляцию с хорошей линейной корреляцией модуля Юнга (рис.3, б), объемного модуля (рис.3, в), модуля сдвига (рис.3, г), постоянной Ламе (рис.3, д) и акустического импеданса (рис.3, е) с напряжениями. Отрицательная корреляция с хорошей корреляцией была выявлена между коэффициентом Пуассона и напряжением (рис.3, а).

Поскольку объемный модуль измерял сопротивление сжатию, то было установлено, что увеличение напряжения приводит к увеличению сопротивления породы сжатию. Модуль сдвига представлял собой отношение напряжения сдвига (кручения) к деформации сдвига, поэтому увеличение напряжения увеличивало сдвиг внутри породы. Изменение коэффициента Пуассона показало, что геометрическое изменение формы под напряжением уменьшалось, пока напряжение увеличивалось.

Модуль Юнга, объемный модуль, модуль сдвига и модуль Ламе песчаника увеличиваются с напряжениями и уменьшаются с температурой, а скорость изменения зависит от напряжения и температуры. Закрывающиеся трещины могут объяснить увеличение [4, 13], а изменение объема пор – уменьшение. Объем пор увеличивается (даже небольшая часть), когда температура повышается, а дифференциальный рост температуры, воздействующий на минералы, составляющие породу, может создавать новые трещины, особенно на границе зерен [7, 14].

Выводы. В статье описано проведение динамического измерения, чтобы понять влияние повышенного напряжения и температуры на механические свойства сухого песчаника из Збилутова. По результатам можно выделить следующее:

Рис.2. Скорости продольных и поперечных волн относительно сжимающего напряжения

Рис.3. Результаты динамических измерений: а – коэффициент Пуассона, б – модуль Юнга, в – объемный модуль, г – модуль сдвига, д – постоянная Ламе, е – акустический импеданс относительно сжимающего напряжения при 20 и 80 °C

1. Модуль Юнга, объемный модуль, модуль сдвига и постоянная Ламе песчаника из Збилутова были пропорциональны повышенному сжимающему напряжению и обратно пропорциональны увеличенной температуре, в то время как коэффициент Пуассона обратно пропорционален повышенному напряжению и пропорционален увеличенной температуре.

2. Акустический импеданс подтвердил, что повышение напряжений привело к увеличению скоростей сжатия, в то время как повышение температуры уменьшило скорость волн сжатия в образцах породы.

3. Полученный результат необходим для определения диапазона плотности бурового раствора при бурении и позволяет бурильщику определять поведение песчанистого пласта в зависимости от действующих значений напряжения и температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bailin W.* Boit's Effective Stress Coefficient Evaluation: Static and Dynamic Approaches // ISRM International Symposium – 2nd Asian Rock Mechanics Symposium / International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering. 2001.
2. *Baoping L. B.* Advances in calculation methods for rock mechanics parameters / L.Baoping, B.Hongzhi // Petroleum Drilling Techniques. 2005. Vol. 33. № 5. P. 44-47.

3. *Chang C.* Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks / C.Chang, M.D.Zoback, A.Khaksar // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2006. Vol. 51. № 3-4. P. 223-237.
4. *Cheng C.H.* Inversion of seismic velocities for the pore aspect ratio spectrum of a rock / C.H.Cheng, M.N.Toksöz // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1979. Vol. 84. Iss. B13. P. 7533-7543.
5. *Petroleum related rock mechanics* / E.Fjar, R.M.Holt, A.M.Raaen, R.Risnes, P.Horsrud // Elsevier. 2008. Vol. 53. 514 p.
6. *Han D.* Investigation and future research strategy on engineering disasters induced by coal mining at deep depth in China coal industry / D.Han, S.Peng // China Coal. 2002. Vol. 28. № 2. P. 5-9.
7. *Hellwege K-H.* Physical properties of rocks: Berlin-Heidelberg. Springer-Verlag. 1982. Vol. 1. 476 p.
8. *Guo J.* A comprehensive model for simulating fracturing fluid leakoff in natural fractures / J.Guo, Y.Liu // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2014. Vol. 21. P. 977-985.
9. *Mavko G.* Rock physics handbook-Tools for seismic analysis in porous media / G.Mavko, T.Mukerji, J.Dvorkin. Cambridge University Press. 2009. 524 p. DOI: 10.1017/CB09780511626753
10. *Rajaoalison H.* Changes of dynamic mechanical properties of brine-saturated Istebna sandstone under action of temperature and stress / H.Rajaoalison, D.Knez, A.Zlotkowski // Przemysl Chemiczny. 2019. Vol. 98. № 5. P. 801-804.
11. *Ranjbar-Karami R.* A modified fuzzy inference system for estimation of the static rock elastic properties: A case study from the Kangan and Dalan gas reservoirs, South Pars gas field, the Persian Gulf / R.Ranjbar-Karami, M.Shiri // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2014. Vol. 21. P. 962-976.
12. *Rao M.V.M.S.* Shear wave propagation in rocks and other lossy media: An experimental study / M.V.M.S.Rao, K.J.Prasanna Lakshmi // Current Science 2003. Vol. 85. № 8. P. 1221-1225.
13. *Toksöz M.N.* Velocities of seismic waves in porous rocks / M.N.Toksöz, C.H.Cheng, A.Timur // Geophysics. 1976. Vol. 41(4). P. 621-645.
14. *Zhang J.J.* Change of bulk and shear moduli of dry sandstone with effective pressure and temperature / J.J.Zhang, L.R.Bentley // CREWES Res Rep. 1999. Vol. 11. P. 1-16.
15. *Walsh J.B.* The effect of cracks on the compressibility of rock // Journal of Geophysical Research. 1965. Vol. 70(2). P. 381-389.
16. *Characterization of rock mechanical properties using lab tests and numerical interpretation model of well logs* / H.Xu, W.Zhou, R.Xie, L.Da, C.Xiao, Y.Shan, H.Zhang // Mathematical Problems in Engineering. 2016. Vol. 5. DOI: 10.1155/2016/5967159
17. *Yuming S.* Experimental study on dynamic and static mechanics parameters of rocks under formation conditions / S.Yuming, L.Guowei // Journal of Chengdu University of Technology. 2000. Vol. 27. № 3. P. 249-253.

Авторы: **Х.Раджаоалисон**, аспирант, rajaoalison@agh.edu.pl (Университет науки и технологии AGH, Краков, Польша), **А.Злотковский**, адъюнкт, azlot@agh.edu.pl (Университет науки и технологии AGH, Краков, Польша), **Ж.Рамболаманана**, профессор, ведущий исследователь, g_rambolamanana@yahoo.fr (Институт-обсерватория геофизики Антананариву, Антананариву, Республика Мадагаскар).

Статья поступила в редакцию 18.11.2019.

Статья принята к публикации 10.01.2020.