УДК 531.781.2

А.В. Патутин, Л.А. Рыбалкин

ПРЕССИОМЕТРИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В НЕРАВНОМЕРНОМ ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ*

Предложен способ прессиометрических исследований, позволяющий определять в заданном интервале скважины как модуль Юнга, так и коэффициент Пуассона. Используется решение задачи о напряженно-деформированном состоянии среды в условиях двухосного сжатия, при этом скважина изнутри нагружена равномерным давлением. Разработанный метод основан на совместном использовании данных прессиометрии и измерительного гидроразрыва, с помощью которого определяют напряженное состояние в окрестности скважины. Результаты расчетов с использованием полученных формул показывают, что контур скважины трансформируется в эллипс, причем смещения в направлениях его большой и малой полуоси составляют до нескольких сотен микрометров в зависимости от типа вмещающих пород. Такие деформации могут быть зафиксированы современными прессиометрами и использованы для оценки физико-механических свойств массива.

Ключевые слова: прессиометрические исследования, двуосное сжатие, деформация, напряженное состояние, гидроразрыв.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-64-69

Прессиометрические испытания грунтов и горных пород являются одним из наиболее распространенных методов изучения их деформационных и прочностных характеристик [1, 2]. Полученные данные используются при проектировании и эксплуатации сооружений различного назначения, подземном строительстве, разработке месторождений полезных ископаемых.

В рамках стандартного метода выполняют нагружение стенок скважины давлением жидкости через непроницаемую оболочку. Схема интерпретации полученных данных основана на решении уравнения Ламе для толстостенной бесконечной трубы под действием внутреннего давления [3]. Для большинства практических задач горного дела необходимо знать не модуль сдвига, определяемый по данному методу, а модуль Юнга, для вычисления которого используется коэффициент Пуассона вмещающих пород. Чаще всего значение коэффициента Пуассона берется из табличных данных, что уменьшает достоверность метода и может привести к неверным технологическим решениям.

Другим недостатком является принимаемое приближение, согласно которому при нагрузке изучаемого интервала контур скважины деформируется равномерно и описывается окружностью с определенным радиусом. Такая модель нагружения не учитывает возможные деформации стенок скважины в нерав-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 16-35-00161 мол_а.

© А.В. Патутин, Л.А. Рыбалкин. 2017.

номерном поле напряжений, в результате которых ее контур принимает вид эллипса.

В предлагаемом подходе прессиометрические испытания выполняют совместно с измерительным гидроразрывом (ГРП), что позволяет дополнительно оценить минимальные и максимальные напряжения, действующие в массиве, а затем использовать их для расчета модуля Юнга и коэффициента Пуассона. Похожий способ рассматривался в работе [4], однако, для его реализации необходимо рассчитывать безразмерную функцию, зависящую от нескольких параметров, что усложняет использование метода и может приводить к росту ошибки при вычислениях.

Рассмотрим упругую изотропную среду в состоянии плоской деформации с круговым отверстием радиуса R, которое деформируется под действием внешнего сжимающего поля напряжений σ_{min} и σ_{max} в эллипс с полуосями a и b (рис. 1). Внутри отверстия действует давление σ_0.

Напряженно-деформированное состояние среды в окрестности отверстия и смещения для данной задачи известны [5, 6], поэтому полуоси эллипса запишутся в виде

$$a = R\left(1 + \frac{\left(1-\nu^2\right)}{E}\left[\sigma_{max} - 3\sigma_{min} + \frac{\sigma_0}{1-\nu}\right]\right)$$

$$b = R\left(1 + \frac{\left(1-\nu^2\right)}{E}\left[\sigma_{min} - 3\sigma_{max} + \frac{\sigma_0}{1-\nu}\right]\right) \quad (1)$$

где E — модуль Юнга, ν — коэффициент Пуассона среды. Совместное решение двух уравнений (1) позволяет определить модуль Юнга и коэффициент Пуассона при остальных известных величинах:

$$E = \frac{\left(1-\nu^2\right)R}{a-R}\left[\sigma_{max} - 3\sigma_{min} + \frac{\sigma_0}{1-\nu}\right], \quad (2)$$

$$\nu = 1 + \frac{\sigma_0}{A}\left(\frac{a-R}{b-R} - 1\right)$$

где

$$A = \frac{(a-R)\left(\sigma_{min} - 3\sigma_{max}\right)}{(b-R)} + 3\sigma_{min} - \sigma_{max}.$$

Предположим, что в ходе прессиометрических испытаний поперечный размер скважины определяется вдоль трех измерительных осей, развернутых друг относительно друга на 120°, как это реализовано в некоторых серийно выпускаемых прессиометрах [7]. При этом полуоси эллипса могут определяться по из-

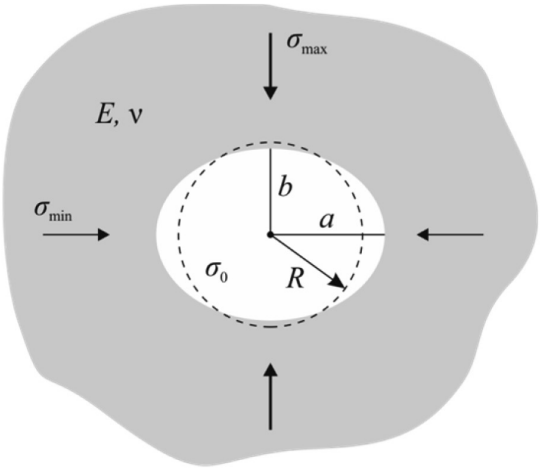

Рис. 1. Постановка задачи и направление действия главных напряжений

Упругие свойства горных пород

Порода	Модуль Юнга (*E*), ГПа	Коэффициент Пуассона (ν)
Песчаник	20	0,15
Уголь	1,2	0,35

вестной методике [4]. Проведение операции ГРП в окрестности скважины позволяет определить минимальное и максимальное напряжения, действующие в массиве. Таким образом, все необходимые параметры для решения уравнений (2) известны.

Для анализа полученных формул используем данные о физико-механических свойствах угля и пород кровли из открытых источников [8, 9] (таблица).

Для оценки возможностей метода рассчитывались смещения стенок скважины радиусом R = 0,05 м с внутренним

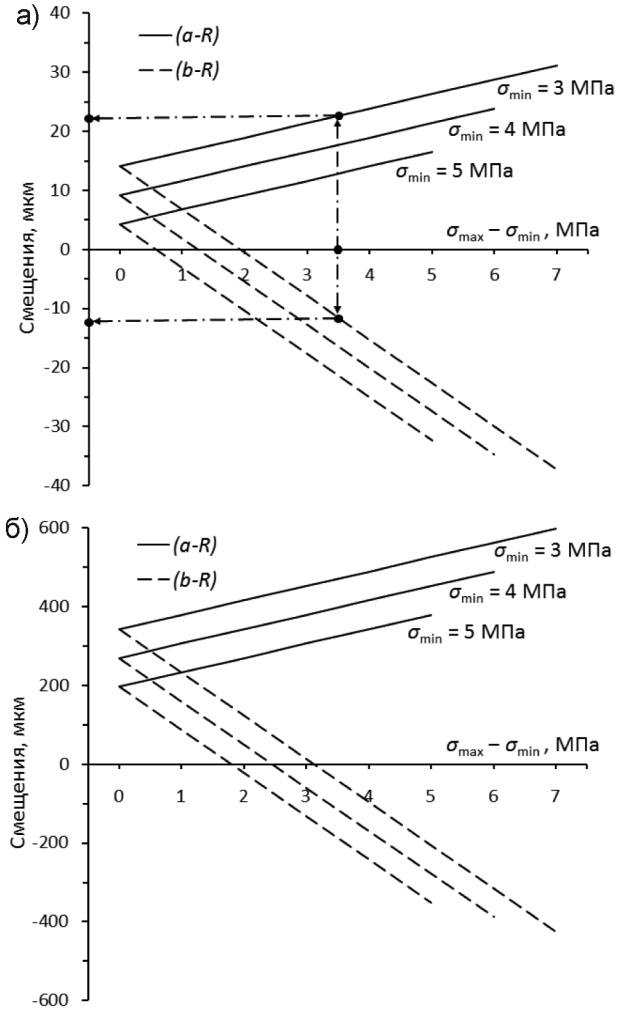

Рис. 2. Расчет смещений (a–R) и (b–R) в направлении большой и малой полуоси эллипса соответственно при различных значениях и для песчаника (а) и угля (б)

нагружением σ_0 = 10 МПа для двух типов пород (рис. 2).

Рассмотрим случай, когда минимальное напряжение σ_{min} в песчанике составляет 3 МПа, а разница между максимальным и минимальным напряжениями $\sigma_{max} - \sigma_{min}$ = 3,5 МПа, т.е. максимальное напряжение, действующее в массиве, равно 6,5 МПа (см. рис. 2, *а*). При этом контур скважины трансформируется в эллипс за счет расширения вдоль полуоси *a* на 22 мкм и сжатия на 12 мкм вдоль полуоси *b*. В угольном пласте смещения (*a* — *R*) и (*b* — *R*) за счет нагрузки контура скважины могут быть значительно выше, и достигать нескольких сотен мкм (см. рис. 2, *б*). Современные прессиометры способны регистрировать смещения в 1 мкм; некоторые разработанные образцы позволяют измерять деформацию контура скважины с точностью до 0,5 мкм [10], что в совокупности с проведением нескольких замеров в одной точке приводит к низким погрешностям результатов измерений.

Разработанный подход может быть использован при исследовании протяженных пластовых скважин направленного бурения длиной до 1000 м, технологии проходки которых в последние годы получили широкое распространение в развитых угледобывающих странах [11]. В большинстве случаев такие скважины применяются для дегазации угольных пластов, позволяют многократного увеличить зону дренирования и повысить дебит метана.

Несмотря на значительную цену установок направленного бурения, отечественные компании также оценили преимущества данного подхода и постепенно вводят в работу подобные комплексы.

Актуальной проблемой является практически полное отсутствие исследований свойств угольных пластов посредством протяженных пластовых скважин, так как после проходки они подключаются к общей дегазационной системе, что не предполагает проведение дальнейшего изучения массива.

Другим фактором является высокая стоимость нецелевого использования станка при проведении исследований, поэтому актуальна разработка систем доставки скважинного оборудования в заданный интервал без использования буровых колонн, что существенно снижает себестоимость работ [12, 13]. Осуществление профильных исследований вдоль ствола скважины на значительных расстояниях от выработки позволит выявить особенности распределения механических напряжений и возможную анизотропию упругих свойств в незатронутом разработкой массиве.

Анализ и обработка полученных данных поможет выделить зоны с различными физико-механическими свойствами, выбрать наиболее благоприятные интервалы для проведения контролируемых воздействий на массив, что приведет к более эффективной разработке угольного месторождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Трофименков Ю. Г., Воробков Л. Н.* Полевые методы исследования строительных свойств грунтов. — М.: Стройиздат, 1981. — 215 с.

2. *Amadei B., Valverde M, Jernigan R., Touseull J., Cappelle J. F.* The directional dilatometer: a new option to determine rock mass deformability / The Pressuremeter and Its New Avenues: Proceedings of 4th international symposium, Sherbrooke, Québec, 17—19 May 1995.

3. *Варданян Г. С., Андреев В. И., Атаров Н. М., Горшков А. А.* Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности. — М.: АСВ, 1995. — 568 с.

4. *Курленя М. В., Сердюков С. В., Патутин А. В.* Определение деформационных свойств горных пород по данным прессиометрических испытаний в интервале гидроразрыва сква-

жины // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2015. — № 4. — С. 96—102.

5. *Мусхелишвили Н. И.* Некоторые основные задачи математической теории упругости. — М.: Наука, 1966. — 708 с.

6. *Макаров Е. В.*, *Монахов И. А.*, *Нефедова И. В.* Двуосное растяжение пластины с круговым отверстием // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. — 2015. — № 1. — С. 100—105.

7. Dilatometer tests. URL: http://www.solexperts.com/index.php?option=com_content&view=article&id=188&Itemid=214&lang=en (дата обращения 30.08.2017).

8. *Макаров П. В.*, *Евтушенко Е. П.*, *Еремин М. О.* Эволюция напряженно-деформированного состояния горного массива с выработками. Математическое моделирование. — Томск: ИД ТГУ, 2016. — 184 с.

9. *Kang H., Zhang X., Si L., Wu Y., Gao F.* In-situ stress measurements and stress distribution characteristics in underground coal mines in China // Engineering Geology. 2010. Vol. 116. pp. 333—345.

10. An introduction to pressuremeters [Электронный ресурс]. — URL: https://www.cambridge-insitu.com/products/pressuremeters/introduction-pressuremeters (дата обращения 30.08.2017).

11. *Hungerford F., Ren T., Aziz N.* Evolution and application of in-seam drilling for gas drainage // International Journal of Mining Science and Technology. 2013. Vol. 23, no 4. pp. 543—553.

12. *Сердюков С. В.*, *Дегтярева Н. В.*, *Патутин А. В.*, *Рыбалкин Л. А.* Скважинный прецизионный дилатометр с интегрированной системой транспортирования вдоль ствола скважины // ФТПРПИ. — 2015. — № 4. — С. 198—203.

13. *Тимонин В. В.*, *Кондратенко А. С.* Система транспортирования технологического и измерительного оборудования в необсаженных скважинах // ФТПРПИ. — 2015. — № 5. — С. 187—193. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Патутин Андрей Владимирович[1] — кандидат технических наук,
старший научный сотрудник, e-mail: andrey.patutin@gmail.com,
Рыбалкин Леонид Алексеевич[1] — аспирант,
младший научный сотрудник,
[1] Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 12, pp. 64–69.

UDC 531.781.2

A.V. Patutin, L.A. Rybalkin

PRESSURE METER TESTING OF ROCKS IN NONUNIFORM STRESS FIELD

The main task of pressuremeter tests is to determine the deformation and strength characteristics of rocks. According to the test technique, the pressure of the working fluid through an impermeable membrane loads the walls of the borehole. During processing and interpreting the data, the Lame solution for an infinite thick-walled cylinder under the influence of internal pressure is used. For most practical mining issues, it is necessary to know not the shear modulus determined by this method, but the Young's modulus. To calculate the Young's modulus the Poisson's coefficient of the enclosing rocks is used. Most often, the value of the Poisson's ratio is taken from the reference data, which reduces the reliability of the method and leads to incorrect technological solutions.

In this paper, we propose a method of pressuremeter test that makes it possible to determine both the Young's modulus and the Poisson's ratio in a given interval of the borehole. The solution of the problem of the stress-strain state of the medium under conditions of biaxial compression is used, while the well is internally loaded with uniform pressure. The developed method based on the joint

use of the pressuremeter test data and hydraulic fracturing with the help of which the stress state in the neighbor of the well is determined. The results of calculations using the obtained formulas show that the well contour is transformed into an ellipse, and the displacements in the directions of its large and small semiaxes are up to several hundred micrometers depending on the rock type. Such deformations can be detected by modern pressuremeters and can be used to evaluate physical and mechanical properties of rocks.

Key words: pressuremeter test, biaxial loading, deformation, stress state, hydraulic fracturing.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-64-69

AUTHORS

Patutin A.V.[1], Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher, e-mail: andrey.patutin@gmail.com,
Rybalkin L.A.[1], Graduate Student, Junior Researcher,
[1] Chinakal Institute of Mining,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630091, Novosibirsk, Russia.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study has been supported by the Russian Foundation for Basic Research, Project No. 16-35-00161mol_a.

REFERENCES

1. Trofimenkov Yu. G., Vorobkov L. N. *Polevye metody issledovaniya stroitel'nykh svoystv gruntov* (Field methods for the studies of constructive properties of soils), Moscow, Stroyizdat, 1981, 215 p.

2. Amadei B., Valverde M, Jernigan R., Touseull J., Cappelle J. F. The directional dilatometer: a new option to determine rock mass deformability. *The Pressuremeter and Its New Avenues: Proceedings of 4th international symposium*, Sherbrooke, Québec, 17—19 May 1995.

3. Vardanyan G. S., Andreev V. I., Atarov N. M., Gorshkov A. A. *Soprotivlenie materialov s osnovami teorii uprugosti i plastichnosti* (Strength of materials with the bases of the theory of elasticity and plasticity), Moscow, ASV, 1995, 568 p.

4. Kurlenya M. V., Serdyukov S. V., Patutin A. V. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2015, no 4, pp. 96—102.

5. Muskhelishvili N. I. *Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoy teorii uprugosti* (Some basic problems of the mathematical theory of elasticity), Moscow, Nauka, 1966, 708 p.

6. Makarov E. V., Monakhov I. A., Nefedova I. V. *Vestnik RUDN. Inzhenernye issledovaniya*. 2015, no 1, pp. 100—105.

7. Dilatometer tests, available at: http://www.solexperts.com/index.php?option=com_content&view=article&id=188&Itemid=214&lang=en (accessed 30.08.2017).

8. Makarov P. V., Evtushenko E. P., Eremin M. O. *Evolyutsiya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gornogo massiva s vyrabotkami. Matematicheskoe modelirovanie* (Stress-strain state evolution in a rock mass with mine openings. Mathematical modeling), Tomsk, ID TGU, 2016, 184 p.

9. Kang H., Zhang X., Si L., Wu Y., Gao F. In-situ stress measurements and stress distribution characteristics in underground coal mines in China. *Engineering Geology*. 2010. Vol. 116. pp. 333—345.

10. An introduction to pressuremeter, available at: https://www.cambridge-insitu.com/products/pressuremeters/introduction-pressuremeters (accessed 30.08.2017).

11. Hungerford F., Ren T., Aziz N. Evolution and application of in-seam drilling for gas drainage. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2013. Vol. 23, no 4. pp. 543—553.

12. Serdyukov S. V., Degtyareva N. V., Patutin A. V., Rybalkin L. A. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2015, no 4, pp. 198—203.

13. Timonin V. V., Kondratenko A. S. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2015, no 5, pp. 187—193.