

УДК 622.831:531.781.2

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД  
ПО ДАННЫМ ПРЕССИОМЕТРИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ  
В ИНТЕРВАЛЕ ГИДРОРАЗРЫВА СКВАЖИНЫ**

**М. В. Курленя, С. В. Сердюков, А. В. Патутин**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: ss3032@yandex.ru,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Предложен способ оценки деформационных свойств горных пород по данным прессиометрических испытаний в интервале гидроразрыва скважин, обеспечивающий нахождение значений модуля Юнга и коэффициента Пуассона горных пород в месте залегания. Показано, что комплексирование прессиометрических исследований и гидроразрыва расширяет возможности деформационных измерений и повышает эффективность определения напряженного состояния массива горных пород методом гидроразрыва.

*Массив горных пород, скважинные прессиометрические испытания, гидроразрыв, трещина, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, напряженное состояние*

Прессиометрические испытания скважин широко используются для изучения деформационных свойств горных пород и грунтов в месте их залегания [1 – 3]. Результаты таких испытаний применяют при проектировании и расчетах устойчивости подземных сооружений, прогнозе геодинамических явлений [4]. Методика исследований включает измерение поперечной деформации скважины в процессе ее нагружения давлением жидкости через эластичную оболочку. Пример регистрируемой диаграммы показан на рис. 1.

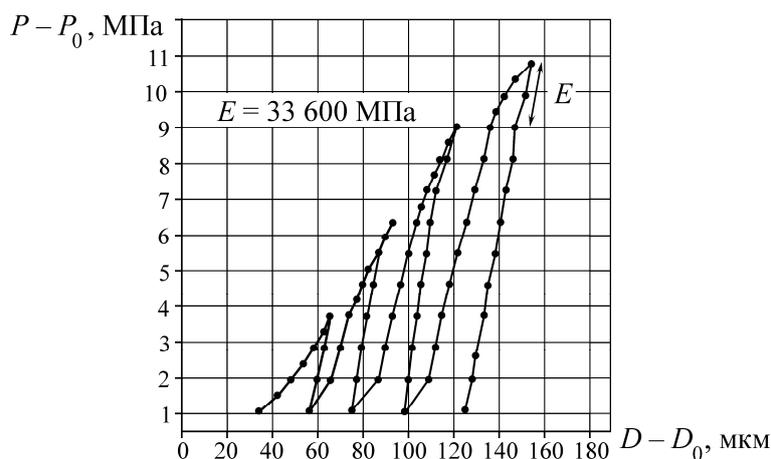


Рис. 1. Прессиометрическая диаграмма, полученная радиальным прессиометром в хлоритовых сланцах в скважине на глубине 986.5 м [5]

Схема интерпретации получаемых данных основана на решении Ламе для толстостенной бесконечной трубы под действием внутреннего давления [6]. Наклон линейного участка зависимости приращения диаметра скважины  $D$  от давления ее нагружения  $P$  дает модуль сдвига  $G$  вмещающей породы:

$$G = \frac{1}{2} D_0 \left( \frac{D - D_0}{P - P_0} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где  $D_0$  — начальное значение диаметра скважины при гидростатическом давлении  $P_0$ .

Проблема состоит в том, что для большинства практических задач необходимо знать не модуль сдвига  $G$ , а модуль Юнга  $E$ , для расчета которого по результатам прессиометрических испытаний  $E = 2G(1 + \nu)$  нужен коэффициент Пуассона  $\nu$  породы. Его значение находят либо по данным акустического каротажа из отношения скоростей продольных и поперечных сейсмических волн, либо по результатам лабораторных исследований кернового материала, отобранного из испытательной скважины. Для приблизительных оценок модуля  $E$  значение  $\nu$  берут из справочных данных [3]. Всем указанным способам присущи недостатки, снижающие их эффективность и достоверность. Так, отбор керна помимо затрат на его извлечение из скважины ведет к неконтролируемому изменению свойств породы. В ослабленных породах представительный керновый материал отобрать, как правило, не удастся.

Недостатком динамического способа нахождения коэффициента Пуассона по скоростям упругих волн является существенное расхождение оценок с результатами механических испытаний горных пород [7, 8]. Так, по данным Центра коллективного пользования “Геомеханические, геофизические и геодинамические измерения” СО РАН, значения модуля Юнга песчаников кровли угольного пласта шахты Березовская, измеренные механическим ( $E_{ст}$ ) и динамическим ( $E_{дин}$ ) методами, различаются между собой в 1.7–2.2 раза (таблица).

Деформационные свойства песчаников кровли угольного пласта (шахта Березовская, гор. 200 м) по результатам лабораторных испытаний керна

Вид испытания	Направление выбуривания образцов относительно напластования	Модуль Юнга $E_{ст}, E_{дин}$ , ГПа (среднее значение)	Коэффициент Пуассона $\nu_{ст}, \nu_{дин}$ (среднее значение)
Объемное сжатие 5 МПа	Продольное	13.98, 24.31	0.22, 0.23
Объемное сжатие 2.5 МПа	»	10.89, 23.29	0.2, 0.2
Одноосное сжатие	»	10.58, 22.93	0.19, 0.16
Объемное сжатие 5 МПа	Поперечное	11.76, 21.78	0.18, 0.17
Объемное сжатие 2,5 МПа	»	9.93, 20.78	0.21, 0.15
Одноосное сжатие	»	9.45, 19.5	0.15, 0.135

Ошибка в оценке коэффициента Пуассона снижает достоверность определения модуля упругости прессиометрическим методом. Это может приводить к неверным технологическим решениям, например при выборе режима гидроразрыва угольных пластов [9] или газификации угля в подземных условиях [10].

Существующие способы измерения коэффициента  $\nu$  in-situ основаны на бурении нескольких скважин [11, 12] и проведении в них испытаний в комплексе с нагружением стенок горной выработки [13]. Такие способы обладают высокой трудоемкостью, могут быть реализованы только на небольшом удалении от горных выработок и не применимы в протяженных скважинах направленного бурения.

Известен также метод, в котором вместо радиально симметричного нагружения используется комбинация одноосных растяжений скважины в нескольких различных направлениях. Этот метод из-за технической сложности реализации получил ограниченное применение в монолитных породах.

В данной статье предложен новый способ определения модуля Юнга и коэффициента Пуассона горных пород в скважинах, основанный на комплексировании прессиометрических испытаний и измерений напряженного состояния методом гидроразрыва.

Идея предлагаемого подхода состоит в дополнении обычных прессиометрических испытаний скважины со сплошным контуром испытаниями этой же скважины с открытой трещиной гидроразрыва, ориентированной по направлению максимального сжимающего напряжения (рис. 2).

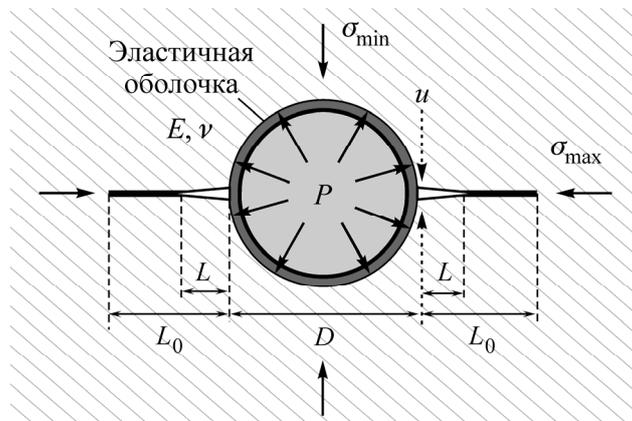


Рис. 2. Схема прессиометрических испытаний скважины, контур которой содержит открытые трещины гидроразрыва:  $L_0$  — длина трещины гидроразрыва;  $L$  — длина открытого участка трещины;  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  — максимальное и минимальное сжимающие напряжения в плоскости измерений

Наличие на контуре скважины раскрытой трещины гидроразрыва ведет к отличной от (1) зависимости  $D$  от  $P$ , что обеспечивает получение дополнительной информации, которая, как будет показано, позволяет найти значения и модуля Юнга и коэффициента Пуассона вмещающих пород.

Отметим, что задача деформирования скважины, содержащей трещину, ранее рассматривалась с позиций оценки напряженного состояния в сильно проницаемых горных породах, когда давление запираения трещины гидроразрыва измерить не удастся, а коэффициент Пуассона, наоборот, известен [14, 15].

Рассмотрим более распространенную ситуацию, когда давление запираения трещины наблюдается отчетливо. Будем придерживаться основных допущений классического метода гидроразрыва: вмещающая среда изотропна, однородна и линейно упруга за исключением малой области вокруг конца трещины, контур скважины при закрытой трещине гладкий, трещина радиально симметрична и направлена вдоль максимального сжимающего напряжения в плоскости измерений.

При такой постановке задачи раскрытие двойной симметричной трещины на контуре скважины, нагружаемой радиальным прессиометром (см. рис. 2), дается формулой [15]

$$u = \frac{2(1-\nu^2)}{E} P_r D_0 u^*(\alpha; P/P_r), \quad (2)$$

где  $u$  — раскрытие трещины на контуре скважины;  $P_r$  — давление нагружения, выше которого трещина начинает раскрываться (reopening pressure);  $\alpha = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$  — отношение минимального и максимального сжимающих напряжений в плоскости измерений;  $u^*$  — безразмерная функция, зависящая от  $\alpha$  и отношения  $P/P_r$ , графики которой для разных значений  $\alpha$  приведены на рис. 3. Методика расчета функции  $u^*$ , основанная на решении комплексного сингулярного интегрального уравнения при граничных условиях, соответствующих рассматриваемой задаче, представлена в работе [15].

Из (2) следует, что раскрытие трещины на контуре скважины, а значит, и его деформация зависят от сжимающих напряжений, которые априорно неизвестны.

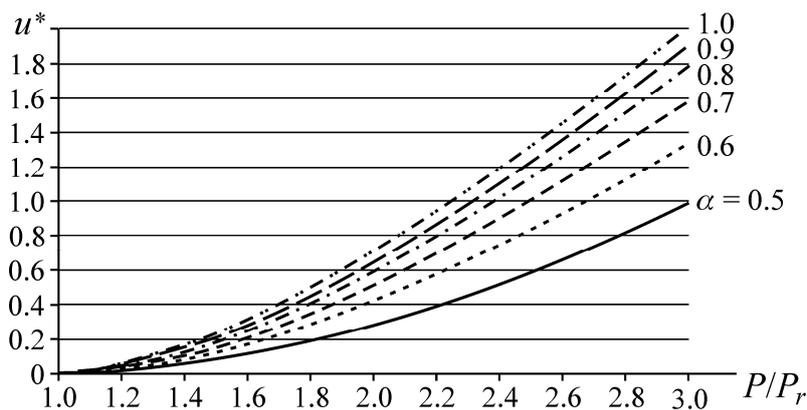


Рис. 3. Функции  $u^*(\alpha, P/P_r)$  для значений  $\alpha = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$  в диапазоне от 0.5 до 1.0

Недостающие данные могут быть получены из результатов измерений давлений запира-ния  $P_s$  и повторного открытия  $P_r$  трещины. Первое из них дает искомое значение  $\sigma_{\min}$ . Второе давление установить в процессе гидроразрыва сложно из-за проникновения рабочей жидкости в сомкнутую трещину. Этот эффект ведет к равенству  $P_r = P_s$  и является одной из основных проблем оценки напряженного состояния горных пород методом гидроразрыва [16].

На прессиометрической диаграмме  $D(P)$  началу раскрытия трещины соответствует смена линейного закона деформирования скважины со сплошным контуром на нелинейный характер, отвечающий неполному раскрытию трещины гидроразрыва. Методика нахождения  $P_r$  по данным прессиометрических испытаний приведена в работе [15], и на этом вопросе здесь останавливаться не будем.

По измеренным значениям  $P_r, P_s$  легко найти искомые напряжения [17]:

$$\sigma_{\max} = 3P_s - P_r, \quad \sigma_{\min} = P_s.$$

В результате получаем значения  $\alpha = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$  и  $P_r$ , которые задают функцию  $u^*$  от  $P$ , т. е. каждому значению  $P > P_r$  ставится в соответствие определенное значение  $u^*$ . Это позволяет получить в дополнение к (1) следующее уравнение:

$$G = (1 - \nu) D_0 P_r \frac{u^*}{u}, \quad (P > P_r). \quad (3)$$

Рассмотрим далее способ определения величины раскрытия трещины на контуре скважины  $u$  по результатам прессиометрических испытаний. Будем полагать, что в процессе испытаний поперечные размеры скважины измеряют вдоль трех ее диаметров  $D_1, D_2, D_3$ , развер-

нутых друг относительно друга на  $120^\circ$ . Предположим, что положение измерительной оси  $D_1$  известно и что она наклонена под искомым углом  $\varphi$  к направлению действия напряжения  $\sigma_{\min}$ , а максимальный поперечный размер скважины из-за раскрытия трещины при  $P > P_r$  перпендикулярен плоскости разрыва (рис. 4).

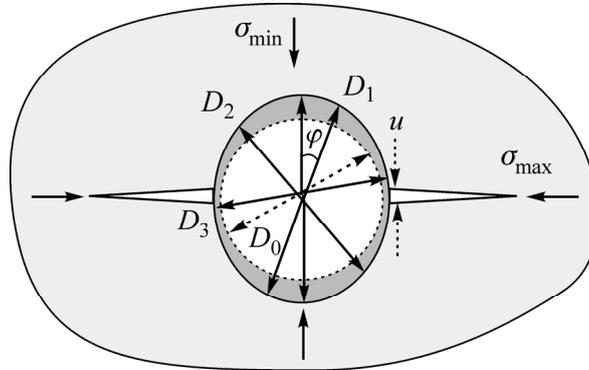


Рис. 4. Схема расположения измерительных осей при выполнении прессиометрических испытаний

При малых значениях  $u$  сечение скважины можно считать эллипсом, что дает следующую систему уравнений для расчетов величин и ориентации максимального  $D_{\max}$  и минимального  $D_{\min}$  диаметров скважины:

$$\begin{aligned} D_{\max}^{-2} \cos^2 \varphi + D_{\min}^{-2} \sin^2 \varphi &= D_1^{-2}, \\ D_{\max}^{-2} \cos^2(\varphi + \pi/3) + D_{\min}^{-2} \sin^2(\varphi + \pi/3) &= D_2^{-2}, \\ D_{\max}^{-2} \cos^2(\varphi - \pi/3) + D_{\min}^{-2} \sin^2(\varphi - \pi/3) &= D_3^{-2}. \end{aligned} \tag{4}$$

Из (4) следует:

$$\begin{aligned} D_{\max}^{-2} &= \frac{D_1^{-2} + D_2^{-2} + D_3^{-2}}{3} + \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(D_1^{-2} - D_2^{-2})^2 + (D_2^{-2} - D_3^{-2})^2 + (D_3^{-2} - D_1^{-2})^2}, \\ \varphi &= \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left[ \frac{\sqrt{3}(D_3^{-2} - D_2^{-2})}{2D_1^{-2} - D_2^{-2} - D_3^{-2}} \right]. \end{aligned}$$

Значение угла  $\varphi$  дает направления действия напряжений  $\sigma_{\min}$ ,  $\sigma_{\max}$ . Таким образом, комплексирование прессиометрических испытаний и гидроразрыва помимо расширения возможностей деформационных измерений повышает также эффективность оценки напряженного состояния массива горных пород как за счет повышения достоверности измерения  $P_r$ , так и за счет определения направления максимального сжатия контура скважины вмещающими породами.

Искомую величину раскрытия трещины получаем, вычитая из максимального диаметра скважины прогнозную величину  $D$  в отсутствии трещины (1):

$$u = D_{\max} - D_0 \left( 1 + \frac{P - P_0}{2G} \right).$$

Полученное значение  $u$  нормируем на  $u^*$  и усредняем по нескольким точкам участка  $P > P_r$  прессиометрической диаграммы. Использование среднего значения отношения  $u/u^*$  повышает достоверность оценки деформационных свойств горных пород в пункте наблюдений.

В соответствии с (1) и (3) значения коэффициента Пуассона и модуля Юнга рассчитываются по формулам

$$\nu = 1 - \frac{G}{D_0 P_r} \left( \frac{u}{u^*} \right)_{\text{ср}} \Big|_{P > P_r} = 1 - \frac{1}{2 P_r} \left( \frac{D - D_0}{P - P_0} \right)^{-1} \Big|_{P \leq P_r} \left( \frac{u}{u^*} \right)_{\text{ср}} \Big|_{P > P_r},$$

$$E = 2G(1 + \nu) = (1 + \nu) D_0 \left( \frac{D - D_0}{P - P_0} \right)^{-1} \Big|_{P \leq P_r}.$$

В заключение отметим, что предложенный способ комплексных прессиометрических испытаний и измерений напряжений методом гидроразрыва обеспечивает высокую точность определения деформационных свойств горных пород при относительно небольших сжимающих напряжениях, когда с помощью радиального прессиометра удастся раскрыть трещину гидроразрыва на значительную глубину.

Для реализации предлагаемого способа разработаны технические решения [18], обеспечивающие измерения модуля Юнга и коэффициента Пуассона горных пород в шахтных условиях на значительном удалении от устья протяженных скважин направленного бурения.

#### ВЫВОДЫ

Разработан способ определения модуля Юнга и коэффициента Пуассона горных пород в месте залегания по результатам прессиометрических испытаний в интервале гидроразрыва скважин.

Комплексирование прессиометрических исследований и гидроразрыва повышает эффективность измерений напряженного состояния массива горных пород за счет улучшения достоверности оценки давления открытия трещины гидроразрыва и оперативного определения направления ее развития.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Clarke B. G. Pressuremeter testing in ground investigation Part I -site operations, Proc. Instn Civ. Engrs Geotech. Engng, 1996, Vol. 119.
2. Amadei B., Valverde M., Jernigan R., Touseull J., and Cappelle J. F. The directional dilatometer: a new option to determine rock mass deformability, in The Pressuremeter and Its New Avenues: Proceedings of 4th international symposium, Sherbrooke, Québec, 17–19 May 1995.
3. ГОСТ 20276-2012. Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости. — М., 2012.
4. Шкуратник В. Л., Николенко П. В. Методы определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород: Научно-образовательный курс. — М., 2012.
5. Zalesky M., Bühler Ch., Burger U., and John. M. Dilatometer tests in deep boreholes in investigation for brenner base tunnel, in Proceedings of World Tunnelling Congress 2007 in Prague, Rotterdam: A. Balkema, 2006.

6. **Варданын Г. С., Андреев В. И., Атаров Н. М., Горшков А. А.** Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности. — М.: АСВ, 1995.
7. **Бельтюков Н. Л., Евсеев А.В.** Сопоставление упругих свойств горных пород // Вестн. ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2010. — № 5.
8. **Gercek H.** Poisson's ratio values for rocks, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2007, Vol. 44.
9. **Lu P., Li G., Huang Zh., Tian Sh., and Shen Zh.** Simulation and analysis of coal seam conditions on the stress disturbance effects of pulsating hydro-fracturing, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2014, Vol. 21.
10. **Akbarzadeh H., Chalaturnyk R. J.** Structural changes in coal at elevated temperature pertinent to underground coal gasification: A review, *International Journal of Coal Geology*, 2014, Vol. 131.
11. **Lu P. H.** In situ determination of deformation modulus and Poisson's ratio of a rock mass with hydraulic borehole pressure cells, 28th US Symposium on Rock Mechanics, Tucson, 29 June – 1 July 1987.
12. **Method** for obtaining Poisson's ratio in rock masses by boreholes made in situ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.swisseen.ch/marketplace/index.php?file=bbs-show.php&bbsref=11%20ES%2024D4%203MMD> (дата обращения 05.06.2015).
13. **Unal E.** Determination of in situ Deformation Modulus: New Approaches for Plate-Loading Tests, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1997, Vol. 34 (6).
14. **Pavlov A., Martynuk P. A., Serdyukov S. V.** The hydraulic fracture opening pressure multiple test for the stress state measurement in permeable rock, in "Rock Stress and Earthquakes" (Edited by Furen Xie), *Proceedings of the Fifth International Symposium on In-situ Rock Stress (Beijing, China, 25-27 August 2010)*, London: CRC Press/Balkema, 2010.
15. **Мартынюк П. А., Павлов В. А., Сердюков С. В.** Метод оценки напряженного состояния массива горных пород по деформационной характеристике прискважинной зоны, содержащей трещину гидроразрыва // ФТПРПИ. — 2011. — № 3.
16. **Haimson B. C.** A hybrid method for constraining the in situ stress regime in deep vertical holes. *Rock Stress and Earthquakes*, in "Rock Stress and Earthquakes" (Edited by Furen Xie), *Proceedings of the Fifth International Symposium on In-situ Rock Stress (Beijing, China, 25-27 August 2010)*, London: CRC Press/Balkema, 2010.
17. **Haimson B. C., Fairhurst C.** Initiation and extension of hydraulic fracture in rocks, *Soc. Petr. Engrs. J.*, Sept. 1967.
18. **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.

*Поступила в редакцию 08/VI 2015*