

# ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА. АЭРОГАЗОДИНАМИКА

---

УДК 622.023.62

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-55-60

## Анизотропия физико-механических свойств сланцевых пород Баженовской свиты

Шустов Д. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия  
*e-mail: denispstu@mail.ru*

### Реферат

**Введение.** Определение физико-механических свойств анизотропных глинистых пород является важной и актуальной задачей, так как отложения глин, глинистых сланцев и аргиллитов весьма часто встречаются на нефтяных и газовых месторождениях. Есть данные, что аргиллиты и сланцы создают от 70 до 90 % всех проблем, связанных со стабильностью скважин, что обусловлено особенностями их физических и механических свойств.

**Цель работы.** На основе испытания образцов керна слоистых аргиллитов получить характеристики анизотропии упругих свойств пород.

**Методология.** Лабораторные исследования физико-механических свойств аргиллитов и сланцев имеют существенные особенности как в плане отбора керна и подготовки образцов, так и в методике проведения и обработки экспериментов. Эти особенности обусловлены чрезвычайно низкой проницаемостью, чувствительностью к буровым растворам на водной основе, анизотропией упругих и прочностных свойств вследствие их слоистой структуры. Рассмотрен опыт проведения испытаний образцов керна слоистых аргиллитов, выполнены испытания на оборудовании по программе консолидированно-недренированного нагружения в соответствии со стандартами ASTM.

**Результаты.** В результате экспериментов на образцах керна, выпиленных вдоль и поперек слоистости, изучены анизотропные упругие свойства пород, а также их зависимости от геофизических параметров.

**Выводы.** Анизотропия упругих свойств существенным образом влияет как на напряженно-деформированное состояние при решении конкретных задач механики сплошной среды, так и на расчетные значения исходного поля напряжений в целом. Учет параметров анизотропии, полученных в данной работе, позволит решать задачи геомеханики применительно к слоистым аргиллитам Баженовской свиты.

**Ключевые слова:** геомеханика; анизотропия; прочность; упругость; слоистость; аргиллиты; лабораторные испытания; керн.

**Введение.** Определение физико-механических свойств анизотропных глинистых пород является важной и актуальной задачей, поскольку отложения глин, глинистых сланцев и аргиллитов весьма часто встречаются на нефтяных и газовых месторождениях. Есть данные, что аргиллиты и сланцы создают от 70 до 90 % всех проблем, связанных со стабильностью скважин, что обусловлено особенностями их физических и механических свойств [1, 2]. Лабораторные исследования физико-механических свойств аргиллитов и сланцев имеют существенные особенности как в плане отбора керна и подготовки образцов, так и в методике проведения и обработки экспериментов [3, 4]. Эти особенности обусловлены чрез-

вычайно низкой проницаемостью, чувствительностью к буровым растворам на водной основе, анизотропией упругих и прочностных свойств вследствие их слоистой структуры.

**Объекты и методы исследований.** По сравнению с изотропным массивом, для трансверсально-изотропной среды требуется определение пяти упругих констант вместо двух ( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $G_2$ ,  $\nu_1$ ,  $\nu_2$ ), что подразумевает изготовление образцов разной ориентировки относительно слоистости [3, 4]. Кроме этого, предъявляются повышенные требования к отбору, транспортировке и хранению керна, поскольку его свойства весьма существенно меняются при нарушении природного состояния. Нарушение технологий отбора и подготовки керна может привести к полной невозможности изготовления образцов.

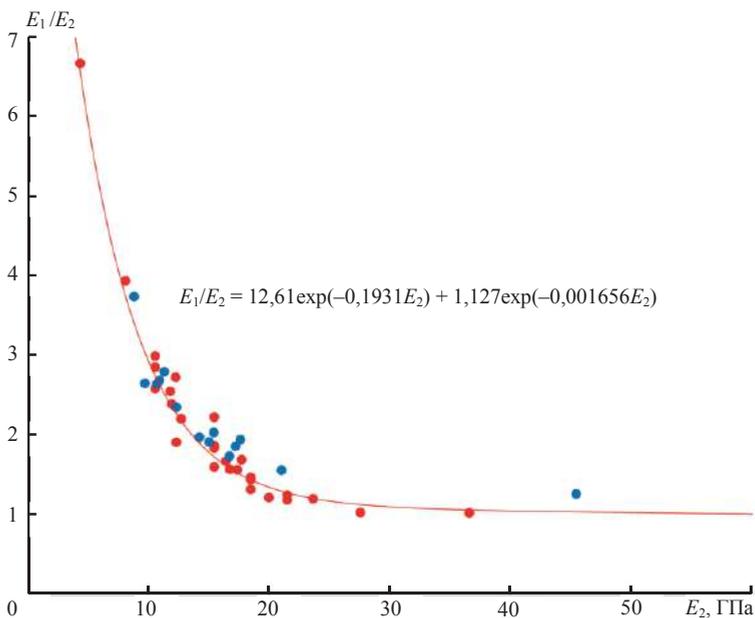


Рис. 1. Зависимость отношения модулей упругости  $E_1/E_2$  от модуля упругости  $E_2$

Fig. 1. Dependence between the ratio of elasticity moduli  $E_1/E_2$  and elasticity modulus  $E_2$

Подобные проблемы возникли при исследовании керна Фроловской, Баженовской и Абалакской свит Средне-Назымского месторождения Западной Сибири. Статические и динамические упругие и прочностные характеристики пород были необходимы для создания геолого-геомеханической 3D-модели месторождения с целью последующего анализа устойчивости скважин и проектирования операций многозонного гидроразрыва пласта (ГРП) [1].

Керновый материал, полученный по одной из скважин, был в неудовлетворительном состоянии: керн практически утратил природную влажность, произошло растрескивание и разрушение по слоистости. Однако из отдельных неповрежденных монолитов удалось изготовить образцы нестандартного размера диаметром 77–79 мм, ориентированные перпендикулярно слоистости. Проведение испытаний нестандартных образцов потребовало доработки установки ПИК-УИДК/ПЛ.

Результаты испытаний на таких образцах позволили получить деформационные и прочностные характеристики для образцов, ориентированных по оси скважины, т. е. перпендикулярно слоистости.

Образцы испытывались в сухом состоянии, поскольку их естественная влажность была утеряна, а насыщение могло повлечь дополнительные изменения структуры и свойств образцов. То есть фактически при испытаниях данных образцов определялись упругие модули  $E_2$  и  $\nu_2$  в дренированных условиях. В дальнейшем при бурении двух новых скважин удалось получить керн стандартного размера 30 x 60 мм, естественной влажности и в кратчайшие сроки провести на нем испытания. Образцы выпиливались как вдоль, так и поперек слоистости и исследовались по схеме консолидированно-недренированного нагружения, так как в случае низкопроницаемых пород для обеспечения дренированных условий требуются предельно низкие скорости нагружения ( $10^{-7}$ – $10^{-8}$  с $^{-1}$ ), что означает неприемлемо большие затраты времени [5–8].

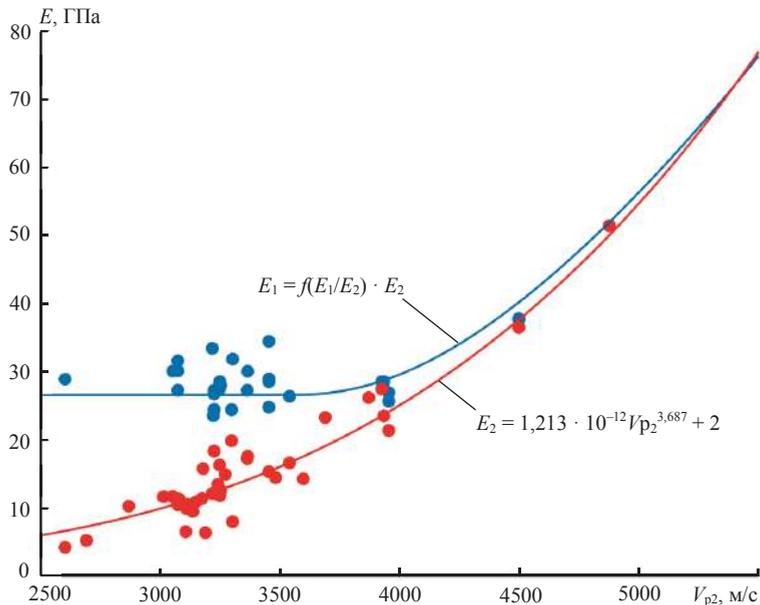


Рис. 2. Зависимость упругих параметров, полученных при недренированном нагружении, от скорости продольной волны

Fig. 2. Dependence between elastic parameters obtained under undrained loading and compression wave velocity

Исследования образцов, ориентированных перпендикулярно и параллельно слоистости, позволили определить упругие константы  $E_2$ ,  $\nu_2$  (перпендикулярно слоистости) и  $E_1$  (параллельно слоистости). Коэффициент Пуассона  $\nu_1$  на образцах цилиндрической формы определить невозможно. Модуль сдвига  $G_2$  крайне сложно определить экспериментальным путем, вследствие чего использовалась приближенная зависимость, приведенная в [2, 6]:  $G_2 \approx 0,5E_2 / (1 - \nu_2)$ .

**Результаты.** Для определения анизотропии упругих свойств необходимы испытания расположенных рядом образцов, выпиленных вдоль и поперек слоистости, со схожими свойствами и минералогическим составом. При выполнении данной работы выпиливать образцы в непосредственной близости друг от друга удавалось не всегда. Исходя из этого, максимальное расстояние между соседними образцами принималось 0,15 м, также производилась оценка схожести образцов по минералогическому составу. Для каждого образца определялись скорости прохождения продольных и поперечных волн, а также статические упругие модули (рис. 1).

На рис. 1 красными точками показаны результаты текущих испытаний, синими приведены данные испытаний слоистых аргиллитов Северной Америки [9]. Можно видеть, что испытания дали достаточно близкие результаты.

В ходе проведения экспериментов определялась скорость прохождения продольной волны [10–12], что позволило получить зависимость соответствующих упругих модулей от данного параметра. На рис. 2 представлены зависимости модуля упругости как перпендикулярно, так и параллельно слоистости от скорости продольной волны. Модуль упругости  $E_1$  в интервале скоростей продольной волны 2500–4000 м/с практически не изменяется и составляет 25–35 ГПа, в то время как модуль упругости  $E_2$  на данном интервале закономерно падает с 25 до 7 ГПа.

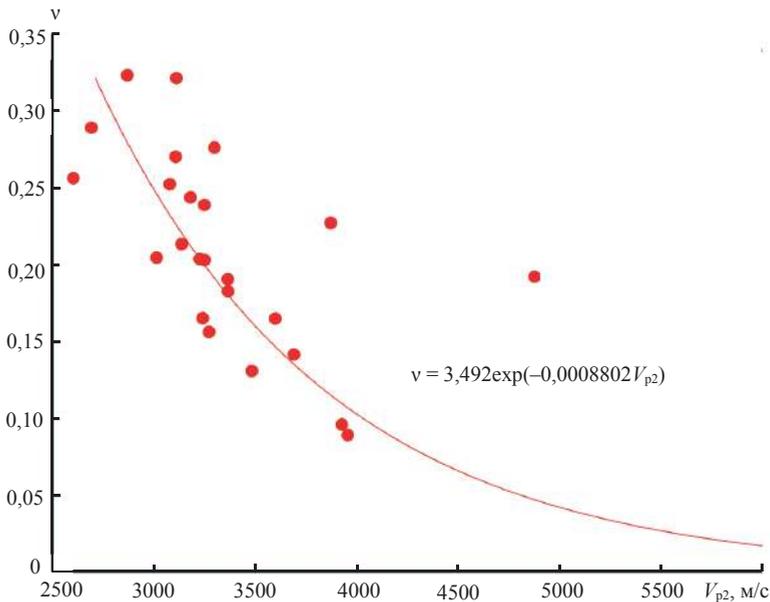


Рис. 3. Зависимость коэффициента Пуассона образцов, ориентированных перпендикулярно напластованию, от скорости продольной волны  
Fig. 3. Dependence between the Poisson coefficient of samples oriented perpendicular to bedding and longitudinal wave velocity

Разница в количестве образцов, выпиленных вдоль и поперек слоистости – точек, приведенных на рис. 1 – вызвана способом их отображения. Вследствие того, что осью ординат выбрана скорость пробега продольной волны поперечных образцов  $V_{p2}$  (в соответствии с направлением прохождения упругих волн при акустических исследованиях в вертикальной скважине), поперечные образцы могут быть приведены все, а продольные – только парные к поперечным.

Вторым, не менее значимым, параметром является коэффициент Пуассона. Его определение для анизотропной среды сопряжено с более серьезными трудностями, нежели определение модулей упругости  $E_1$  и  $E_2$ . В рамках проведения эксперимента удалось получить только значения  $v_2$  пород, расположенных перпендикулярно слоистости. На рис. 3 представлена зависимость данного параметра от скорости продольной волны. Как видно, имеется определенная зависимость статического коэффициента Пуассона от скорости продольной волны в интервале скоростей 2500–4000 м/с.

**Выводы.** Таким образом, удалось получить зависимости для анизотропных модулей упругости от единого параметра, характеризующего скорость пробега

продольных волн, с целью последующей привязки ГИС и использования при построении геомеханической модели.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ашихмин С. Г., Кашников Ю. А., Шустов Д. В., Кухтинский А. Э. Влияние анизотропии упругих и прочностных свойств пород на устойчивость наклонной скважины // Нефтяное хозяйство. 2018. № 8. С. 21–24.
2. Fjaer E. et al. Petroleum related rock mechanics. 2nd edition. Elsevier, 2008. 515 с.
3. Вахрушева И. А., Гильманов Я. И., Костин Д. К. Современные технологии отбора и транспортировки керн как основа качественного его исследования // Научно-технический вестник ОАО НК «РОСНЕФТЬ». № 2. 2014. С. 68–70.
4. Тихоцкий С. А., Фокин И. В., Баяк И. О., Белобородов Д. Е., Березина И. А., Гафурова Д. Р., Дубиня Н. В., Краснова М. А., Корост Д. В., Макарова А. А., Патонин А. В., Пономарев А. В., Хамидуллин Р. А., Цельмович В. А. Комплексные лабораторные исследования керн в ЦПГИ ИФЗ РАН // Наука и технологические разработки. 2017. Т. 96. № 2. С. 17–32.
5. Amadei B. Rock anisotropy and the theory of stress measurements. Springer-Verlag, 1983.
6. Cheng A. H.-D. Material coefficients of anisotropic poroelasticity. Int. J. Rock Mech. Miner. Sci. 1997. No. 34 (2). P. 199–205.
7. ASTM D7012-14. Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures. URL: <https://www.astm.org/Standards/D7012.htm> (дата обращения 19.04.2019)
8. Loret B., Rizzi E., Zerfa Z. Relations between drained and undrained moduli in anisotropic poroelasticity // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2001. No. 49 (11). P. 2593–2619.
9. Hiroki Sone. Mechanical properties of shale gas reservoir rocks and its relation to the in-situ stress variation observed in shale gas reservoirs. PhD thesis, 2012.
10. Berryman J. G., Nakagawa S. Inverse problem in anisotropic poroelasticity: drained constants from undrained ultrasound measurements // Journal of the Acoustical Society of America. 2010. No. 127(2). P. 720–729.
11. Youn H., Tonon F. Multi-stage triaxial test on brittle rock // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2010. No. 47. P. 678–684.
12. Charlez F. P. Rock mechanics. Petroleum applications. Vol. 2. Paris, 1997.

Поступила в редакцию 4 февраля 2019 года

#### Сведения об авторах:

**Шустов Денис Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: denispstu@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-55-60

### Bazhen Formation shale rock physical and mechanical properties anisotropy

Denis V. Shustov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia.

#### Abstract

**Introduction.** Anisotropic clay rocks mechanical properties determination is an important and relevant problem, because the sediments of clays, clay shales and argillites are quite often present in oil and gas fields. It is reported that mudstones and shales are the reason for 70–90% of all problems associated with wells stability, which is due to the peculiarities of their physical and mechanical properties.

**Research aims** to obtain the anisotropy characteristics of rocks elastic properties based on bedded argillites core samples testing.

**Methodology.** Laboratory studies of argillites and shales physical and mechanical properties have significant features in both core sampling and sample preparation and experimental procedure and processing methodology. These features are due to extremely low permeability, sensitivity to water-based drilling mud, and strong anisotropy of elastic and strength properties caused by their bedded structure. The experience of testing bedded argillites core samples is considered. The tests were carried out on the equipment available under the consolidated undrained loading program in accordance with ASTM standards.

**Results.** Anisotropic elastic properties of the rocks and their dependence on geophysical parameters were studied in the course of tests on core samples drilled along and across the bedding.

**Conclusion.** The elastic properties anisotropy significantly affects both the stress-strain state when solving specific problems of continuum mechanics and the calculated values of the initial stress field as a whole. Accounting for the anisotropy parameters obtained in this work will allow solving the problems of geomechanics as applied to bedded argillites of the Bazhen Formation.

**Key words:** geomechanics; anisotropy; strength; elasticity; bedding; argillites; laboratory tests; core sample.

#### REFERENCES

1. Ashikhmin S. G., Kashnikov Iu. A., Shustov D. V., Kukhtinskii A. E. Anisotropic effect of elastic and strength properties of rock on the downhole stability. *Neftianoe khozaisvo = Oil Industry*. 2018; 8: 21–24. (In Russ.)
2. Fjaer E. et al. *Petroleum related rock mechanics. 2nd edition*. Elsevier, 2008. 515 p.
3. Vakhrusheva I. A., Gilmanov Ia. I., Kostin D. K. Modern technologies of coring and core transportation as basement for good quality core analysis. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik OAO NK «ROSNEFT» = Rosneft Research and Technology Bulletin*. 2014; 2: 68–70. (In Russ.)
4. Tikhotskii S. A., Fokin I. V., Baiuk I. O. Complex of laboratory core analysis at CPGR IPE RAS. *Nauka i tekhnologicheskie razrabotki = Science and Technological Developments*. 2017; 96 (2): 17–32. (In Russ.)
5. Amadei B. *Rock anisotropy and the theory of stress measurements*. Springer-Verlag, 1983.
6. Cheng A. H.-D. Material coefficients of anisotropic poroelasticity. *Int. J. Rock Mech. Miner. Sci.* 1997; 34 (2): 199–205.
7. ASTM D7012-14. Standard test method for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under varying states of stress and temperatures. Available from: <https://www.astm.org/Standards/D7012.htm> [Accessed 19th April 2019]
8. Loret B., Rizzi E., Zerfa Z. Relations between drained and undrained moduli in anisotropic poroelasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2001; 49 (11): 2593–2619.
9. Hiroki Sone. *Mechanical properties of shale gas reservoir rocks and its relation to the in-situ stress variation observed in shale gas reservoirs*. PhD thesis, 2012.
10. Berryman J. G., Nakagawa S. Inverse problem in anisotropic poroelasticity: drained constants from undrained ultrasound measurements. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2010; 127(2): 720–729.
11. Youn H., Tonon F. Multi-stage triaxial test on brittle rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2010; 47: 678–684.
12. Charlez F. P. *Rock mechanics. Petroleum applications*. Vol. 2. Paris, 1997.

Received 4 February, 2019

#### Information about authors:

**Denis V. Shustov** – PhD (Engineering), associate professor of the Department of Mine Surveying, Geodesy, and Geoinformation Systems, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: denispstu@mail.ru

**Для цитирования:** Шустов Д. В. Анизотропия физико-механических свойств сланцевых пород Баженовской свиты // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 4. С. 55–60. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-55-60

**For citation:** Shustov D. V. Bazhen Formation shale rock physical and mechanical properties anisotropy. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 4: 55–60 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-55-60