



ДИАГРАММЫ НАГРУЖЕНИЯ И ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ УПРУГО-ПСЕВДОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЧЕРНОСЛАНЦЕВЫХ ПОРОД БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ

Ю.П. Стефанов^{1,2}, Д.К. Жарасбаева^{1,3}

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634055, Томск, просп. Академический, 2/4, Россия,

³Научно-лабораторный центр АО «Геология», 630055, Новосибирск, ул. Мусы-Джалиля, 23, Россия,
e-mail: StefanovYP@ipgg.sbras.ru

Представлены результаты анализа экспериментальных данных по псевдотрехосному нагружению полноразмерных образцов черносланцевых пород баженовской свиты. Эксперименты проводились в условиях одноосного нагружения и при давлениях бокового обжатия 20 и 40 МПа. Показано, что в рассмотренном диапазоне нагрузки деформация породы за пределом упругости протекает в разных режимах: дилатансии и компактии. Несмотря на низкую пористость породы, переход от дилатансии к уплотнению происходит при среднем давлении, не превышающем 34 МПа. На основе анализа полученных данных выделены этапы деформирования на диаграммах нагружения и определены параметры математической модели с комбинированной предельной поверхностью, описывающей процесс деформирования в режимах дилатансии и компактии.

Баженовская свита, геомеханические эксперименты, дилатансия, компакция, математическая модель, предельная поверхность

LOADING DIAGRAMS AND PARAMETERS OF THE MODEL OF ELASTIC-PSEUDOPLASTIC DEFORMATION OF BLACK SHALE ROCKS OF THE BAZHENOV FORMATION

Yu.P. Stefanov^{1,2}, D.K. Zharasbaeva^{1,3}

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

²Institute of Strength Physics and Materials Science, Akademicheskoy Ave., 2/4, Tomsk, 634055, Russia,

³Scientific Laboratory Center of JSC "Geologika", Musy-Jalil Str., 23, Novosibirsk, 630055, Russia,
e-mail: StefanovYP@ipgg.sbras.ru

The results of the analysis of experimental data on pseudotriaxial loading of full-size samples of black shale rocks of the Bazhenov Formation are presented. The experiments were carried out under conditions of uniaxial loading and at lateral compression pressures of 20 and 40 MPa. It is shown that in the considered load range, the deformation of the rock beyond the elastic limit proceeds in different modes: dilatancy and compaction. Despite the low porosity of the rock, the transition from dilatation to compaction occurs at a pressure not exceeding 34 MPa. Based on the analysis of the obtained data, the stages of deformation in the loading diagrams are distinguished and the parameters of the mathematical model with a combined limiting surface are determined, which describes the deformation process in dilatancy and compaction modes.

Bazhenov Formation, geomechanical experiments, dilatancy, compaction, mathematical model, yield surface

ВВЕДЕНИЕ

Черносланцевые отложения в качестве основных нефтематеринских объектов распространены во всем мире: в Западно-Сибирской, Волго-Уральской, Тимано-Печорской, Северо-Кавказской нефтегазоносных провинциях России, бассейнах Северной Америки (Уиллистон, Аппалачский), Ближневосточного и Карибского регионов и др. Уникальность роли таких отложений в нефтегазовых системах состоит в том, что они поочередно или одновременно могут являться нефтегазоматеринской горной породой, флюидоупором и коллектором. Ресурсы углеводородов в этих толщах относятся к трудноизвлекаемым, а сами коллектора к нетрадиционным. За последние годы появились новые, существенно более точные данные о геологическом строении, стратиграфии и палеонтологии, палеогеографии [Конторович и др., 2013, 2019; Стафеев и др., 2017] баженовской свиты и ее возрастных аналогов. Однако не смотря на практически полувековую историю изучения отложений баженовской свиты, остается большое количество нерешенных проблем, в том числе связанных с механическими характеристиками пород.

Основные публикации, посвященные механическим характеристикам, освещают в основном, такие темы как:

1) методика лабораторных исследований механических свойств пород – породы баженовской свиты обладают сложными текстурно-структурными свойствами (слоистость, хрупкость, битуминозность), поэтому геомеханические эксперименты требуют особой подготовки и методики проведения [Тихоцкий и др., 2017; Шустов, 2019; Шубин и др., 2020];

2) определение статических и динамических модулей упругости и их корреляций [Шубин и др., 2020];

3) изучение анизотропии упруго-прочностных параметров пород [Баяк и др., 2015; Тихоцкий и др., 2017].

4) использование традиционных моделей и критериев прочности для прогнозирования предела упругости и прочности и построения геомеханических моделей [Маркин и др., 2016].

Таким образом, основная масса работ посвящена методике лабораторных исследований, определению упругих модулей и их анизотропии, а прочностные свойства описывают в рамках традиционных моделей Кулона–Мора и Друккера–Прагера. Кроме указанных, существует множество вариантов моделей поведения материалов под нагрузкой и их различные обобщения [Colmenares, Zoback, 2002]. Основная проблема математического описания поведения горных пород состоит в том, что в процессе деформирования изменяются их свойства, соответственно, должны меняться и параметры модели. Поэтому без учета важнейших особенностей протекания деформации за пределом упругости общепринятые модели дают лишь оценку начала необратимой деформации и разрушения. В то время как необходимостью является именно описание процесса развития деформации, которая обычно протекает неоднородно, деформация часто имеет локализованный характер, а свойства среды постоянно меняются. Для черносланцевых пород баженовской свиты проблема стоит наиболее остро ввиду трудностей экспериментального изучения и недостатка данных. Для проведения численного моделирования и решения задач геомеханики необходимо иметь адекватную математическую модель, учитывающую важнейшие особенности поведения породы.

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Геомеханические исследования проводились с помощью специального испытательного оборудования, предназначенного для исследования механических свойств образцов горных пород в атмосферных и пластовых условиях (оборудование производства АО «Геологика»). Оборудование оснащено камерой прочности, обеспечивающей моделирование пластовых условий, включая горное и поровое давление, а также поддержание пластовой температуры и блок измерения деформаций. Измерение упругих и прочностных свойств керна баженовской свиты заключалось в проведении экспериментов на одноосное и псевдотрехосное сжатие: UCS – одноосное сжатие, при котором образец деформируется в осевом направлении (без бокового обжима) до его разрушения; CCS – трехосный тест на сжатие, при котором образец деформируют в осевом направлении до разрушения в условиях постоянного давления обжима σ_c .

Все эксперименты проводились на полноразмерных образцах (8×16 см) керна баженовской свиты при пластовой температуре 105°C . Полученные диаграммы нагружения – графики зависимости осевой ε_1 и радиальной деформации ε_2 образцов от приложенной нагрузки приведены на рис. 1. Объемная деформация определяется как сумма трех компонент деформации: $\varepsilon = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_2$. На представленных диаграммах можно выделить ряд стадий деформирования:

Стадия 0–1: начальный нелинейный участок. Данная нелинейность сильно проявляется в тестах на одноосное сжатие при отсутствии бокового обжатия (рис. 1, а). Она связана с закрытием микродефектов, которые имеются в образце при приложении нагрузки. При боковом обжатии 20 и 40 МПа закрытие большей части микротрещин происходит на этапе приложения всестороннего обжима.

Стадия 1–2: упругое сжатие образца, наиболее линейный участок на графике нагружения. На этом участке определяются упругие модули.

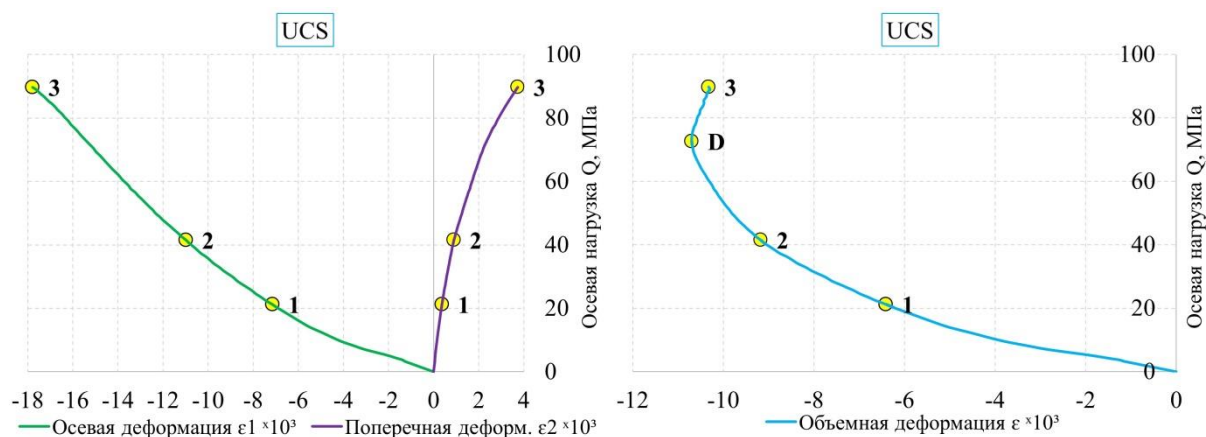
Стадия 2–3: упруго-псевдопластическое деформирование. Появление псевдопластической – необратимой деформации приводит к отклонению от линейности на графиках осевой, радиальной и объемной деформации. В образце развиваются сдвиговая и объемная необратимая деформация. В режиме дилатансии график для объемной деформации отклоняется вверх и вправо (см. рис. 1, а), в режиме компакссии – вниз и влево (рис. 1, б, в).

В режиме дилатансии на начальном этапе приращение упругой деформации больше, чем приращение псевдопластической. На следующем этапе после достижения точки D график нагружения для объемной деформации разворачивается в другую сторону (см. рис. 1, а). Данную точку нередко обозначают как D-point, а стадию интерпретируют как неустойчивое трещинообразование [Bieniawski, 1967], хотя неустойчивость возникает лишь с началом интенсивного разрушения образца после достижения предела прочности.

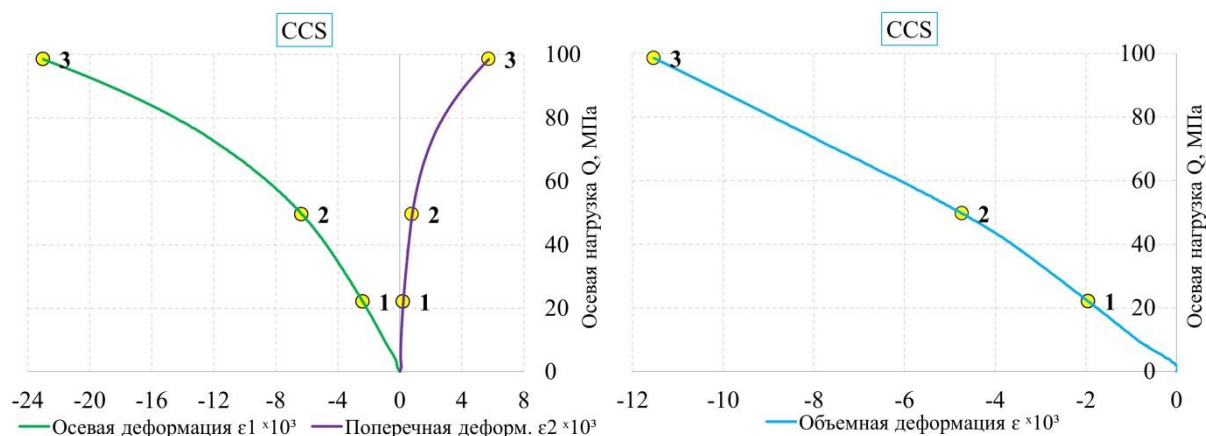
В режиме компакссии сокращение объема в данных экспериментах менее выражено, поскольку развивается при сильном упрочнении, что связано с низкой пористостью породы.

Следующая стадия неустойчивого деформирования, соответствующая формированию полос локализованной деформации и разрушению, в данных экспериментах не рассматривалась, т. к. имело место быстрое разрушение образцов и резкий сброс напряжений.

а



б



в

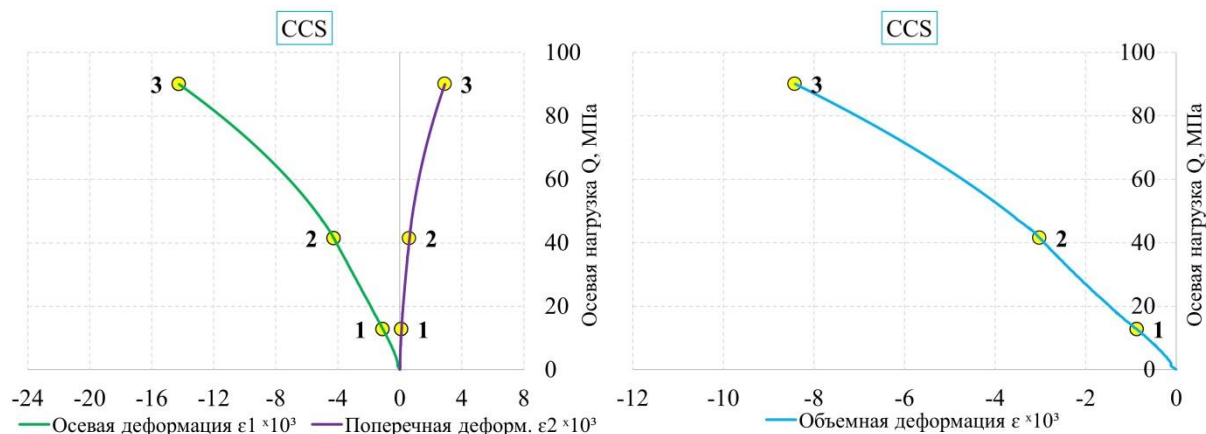


Рис. 1. Диаграммы нагружения для экспериментов: а – на одноосное сжатие (давление обжима 0 МПа); б – псевдотрехосное сжатие при давлении бокового обжатия $\sigma_c = 20$ МПа; в – $\sigma_c = 40$ МПа. 1 – начало линейно упругого деформирования; 2 – предел упругости; 3 – предел прочности (разрушение образца)

Несмотря на ряд особенностей поведения, которые зависят от давления бокового обжатия, перечисленные стадии наблюдаются на графиках для всех проведенных экспериментов. На этапе, когда развивается необратимая деформация – стадия (2–3) – характер изменения объема проявляется на

диаграммах поперечной и объемной деформации. На этих диаграммах имеет место отклонение от линейного участка в разные стороны в зависимости от бокового обжатия. В эксперименте на одноосное сжатие наблюдается увеличение объема образца, вызванное ростом и раскрытием микротрещин, деформация развивается в режиме дилатансии. В то же время, на графиках нагружения, в условиях трехосного сжатия (см. рис. 1, б, в), наблюдается обратный процесс, сокращение объема образца, его уплотнение. Таким образом, свойства среды претерпевают значительные изменения и находятся в большой зависимости от напряженно-деформированного состояния. Изменение механизма деформирования пород баженовской свиты происходит при увеличении всестороннего давления (давления обжима в геомеханических экспериментах). Переход из режима дилатации в режим компакций происходит в ходе деформации при давлении бокового обжатия в диапазоне 15–20 МПа.

МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ СРЕДЫ И ЕЕ ПАРАМЕТРЫ

По результатам проведенных экспериментов обнаружено, что деформация исследуемых пород в зависимости от давления развивается в режимах дилатансии и компакций. Соответственно математическая модель и предельная поверхность, лежащая в ее основе должны отражать данное свойство. Кроме того, необходимо учесть существенную нелинейность на начальных этапах нагружения, которая приводит к зависимости упругих модулей от давления среды [Стефанов, 2016]. На рисунке 2 показаны аппроксимации значений модулей сдвига и сжатия в зависимости от давления. Данная зависимость достаточно хорошо описывается одним уравнением: $F = F_0 \cdot (b \left(\frac{P_{обж}}{P_0}\right)^a + c \frac{P_{обж}}{P_0} + 1)$, где F принимает значение модулей сжатия K или сдвига μ , $b=3 \cdot 10^2$, $c=7.96$, $P_0 = 1$ МПа.

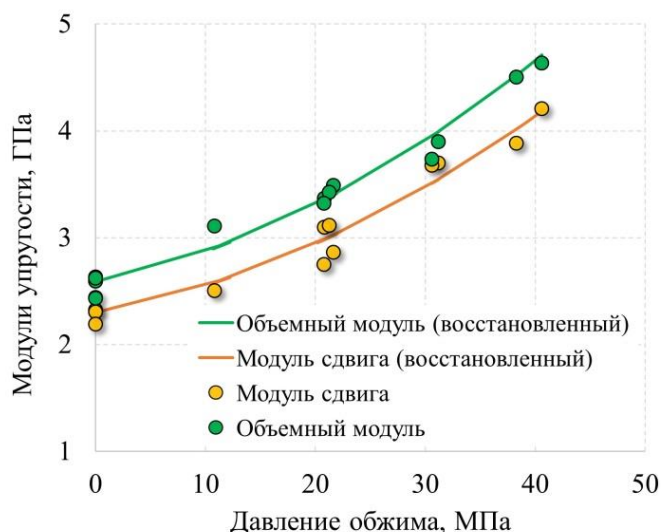


Рис. 2. Графики зависимости упругих модулей от давления обжима

Для описания деформации за пределом упругости примем за основу комбинированную предельную поверхность [Stefanov et al., 2011; Garavand et al., 2020], представленную на рис. 3. Для определения параметров приведем основные соотношения модели.

Примем гипотезу о разложении деформации и ее скорости на упругую и пластическую части: $\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p$, где $\dot{\varepsilon}_{ij}$ – компонента скорости деформации. Тогда закон упругости может быть записан в виде:

$$\sigma_{ij} = \lambda(\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}^p)\delta_{ij} + 2\mu(\dot{\epsilon}_{ij} - \dot{\epsilon}_{ij}^p),$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, точка сверху означает производную по времени; λ , μ – параметры Ламе; $\dot{\epsilon}$ – первый инвариант девиатора тензора деформации, δ_{ij} – символ Кронекера. Заметим, что в приведенных соотношениях скорости изменения напряжений и деформаций могут быть заменены на их приращения.

Приращение неупругой или пластической части тензора деформации, которое рассчитывается при достижении напряжениями предельной поверхности $f(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}^p) = 0$, определяется уравнением:

$$d\epsilon_{ij}^p = d\theta \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}},$$

где $d\epsilon_{ij}^p$ – приращение пластических деформаций; $g(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}^p)$ – пластический потенциал; $d\theta$ – множитель, определяемый в ходе процесса.

Необходимо отметить, что используется неассоциированный закон пластического течения, то есть функция пластического потенциала и функция текучести являются независимыми.

Предельная поверхность, показанная на рис. 3, состоит из двух частей, поверхности Друккера-Прагера [Николаевский, 1971; Друккер, Прагер, 1975]:

$$f_1 = \tau - \alpha\sigma - Y, \quad \text{при } \sigma_t \leq \sigma \leq \sigma_0$$

и эллиптической поверхности [Grueschow, Rudnicki, 2005]:

$$f_2 = \frac{(\sigma - \sigma_0)^2}{a^2} + \frac{\tau^2}{b^2} - 1 = 0, \quad \text{при } \sigma > \sigma_0,$$

где $\sigma = -\sigma_{kk}/3$ – первый инвариант тензора напряжений; $\tau = (s_{ij}s_{ij}/2)^{1/2}$ – интенсивность касательных напряжений, α и Y – параметры, $a = \sigma_1 - \sigma_0$, $b = c + \alpha\sigma_0$ – полуоси эллипса.

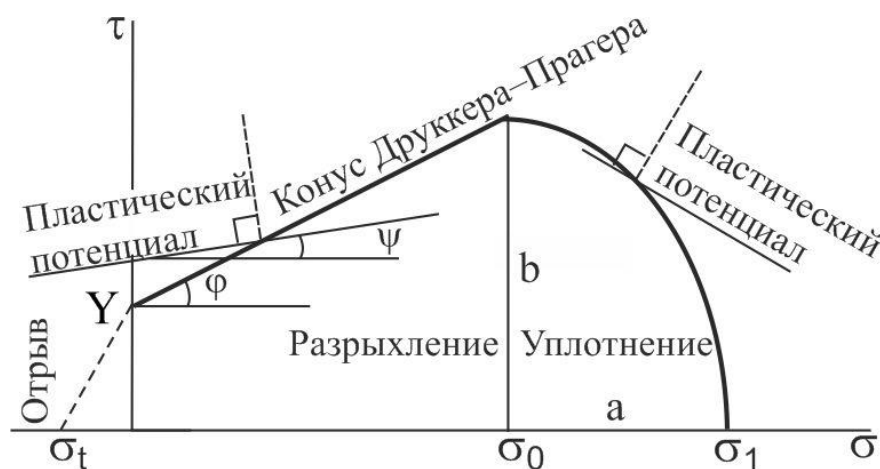


Рис. 3. Схема комбинированной предельной поверхности: τ – интенсивность сдвигового напряжения; σ – средние напряжения; ϕ – угол внутреннего трения Друккера-Прагера; Y_0 – когезия Друккера-Прагера; σ_0 – пороговое эффективное давление перехода от режима дилатансии к компактии

Начальная предельная поверхность соответствует пределу упругости и описывает лишь начало процесса, дает первые оценки зарождения пластической деформации. Изменения предельной поверхности в ходе развития необратимой деформации на стадиях упрочнения и разупрочнения задается с помощью уравнений [Стефанов, 2002]:

$$Y(\gamma^p) = Y_0[1 + h(A(\gamma^p) - D(\gamma^p))],$$

где h – коэффициент упрочнения, $d\gamma^p$ – приращение интенсивности сдвиговой пластической деформации, $A(\gamma^p) = 2\gamma^p/\gamma^*$, $D(\gamma^p) = (\gamma^p/\gamma^*)^2$, γ^* – критическая деформация, после которой преобладает деградация материала.

В процессе уплотнения происходят изменения эллиптической части предельной поверхности, она может смещаться вдоль оси давления и расширяться. Опишем это при помощи соотношения:

$$\sigma_0(\varepsilon^p) = \sigma_0 \left(\frac{\varepsilon^*}{\varepsilon^* + \varepsilon^p} \right)^m, \text{ что эквивалентно } \sigma'_0(\varphi) = \sigma'_0(\varphi^*/\varphi)^m, \text{ где } \varepsilon^* = \varphi^* - \text{ начальная пористость, } \Delta\varphi = \varepsilon^p$$

– объемная деформация, $a = a_0 + r\Delta\sigma_0$, r и m – параметры.

Уравнения пластического потенциала примем в виде [Stefanov et al., 2011]: $g = \tau - \beta\sigma$, где $\beta = d\varepsilon^p/d\gamma^p$ – коэффициент дилатансии,

$$\beta(\sigma, \varepsilon^p) = \beta_0 \left(\frac{\sigma_0(\varepsilon^p) - \sigma}{\sigma_0(\varepsilon^p)} \right)^{n_1} \quad \text{при} \quad \sigma < \sigma_0,$$

$$\beta(\sigma, \varepsilon^p) = - \left(\frac{\sigma - \sigma_0(\varepsilon^p)}{\sigma_1 - \sigma_0(\varepsilon^p)} \right)^{n_2} \quad \text{при} \quad \sigma_0 < \sigma < \sigma_1.$$

Таким образом, приведенная модель поведения среды, помимо упругих модулей, содержит параметры, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Перечень параметров модели с комбинированной предельной поверхностью

Участок предельной поверхности Друккера–Прагера, дилатансия						Эллиптический участок предельной поверхности, компакция					
Y_0	α	h	β	α	n_1	σ_0	σ_1	ε^*	m	r	n_2

Для определения параметров предельной поверхности необходимо пересчитать значения напряжений и деформаций для точек, отмеченных на диаграммах нагружения, которые соответствуют пределам упругости и прочности, либо перестроить графики в координаты первого инварианта напряжений и деформаций, а также второго инварианта девиатора напряжений и деформаций. Для условий, соответствующих рассмотренным экспериментам, выражения для пересчета оказываются предельно простыми:

$$\tau = Q/\sqrt{3} = |\sigma_1 - \sigma_c|/\sqrt{3}, \sigma = \frac{Q}{3} + \sigma_c = |\sigma_1 + 2\sigma_c|/3, ,$$

$$\gamma = 2|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|/\sqrt{3}, \varepsilon = -(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2).$$

Отметив значения пределов упругости и прочности на путях нагружения в пространстве напряжений для проведенных экспериментов, мы построим начальную и конечную предельные поверхности (рис. 4) и определим их параметры. По соответствующим данным необратимой деформации определяются остальные параметры, которые задают соотношения изменений предельной поверхности от начального состояния. Полученные параметры приведены в табл. 2.

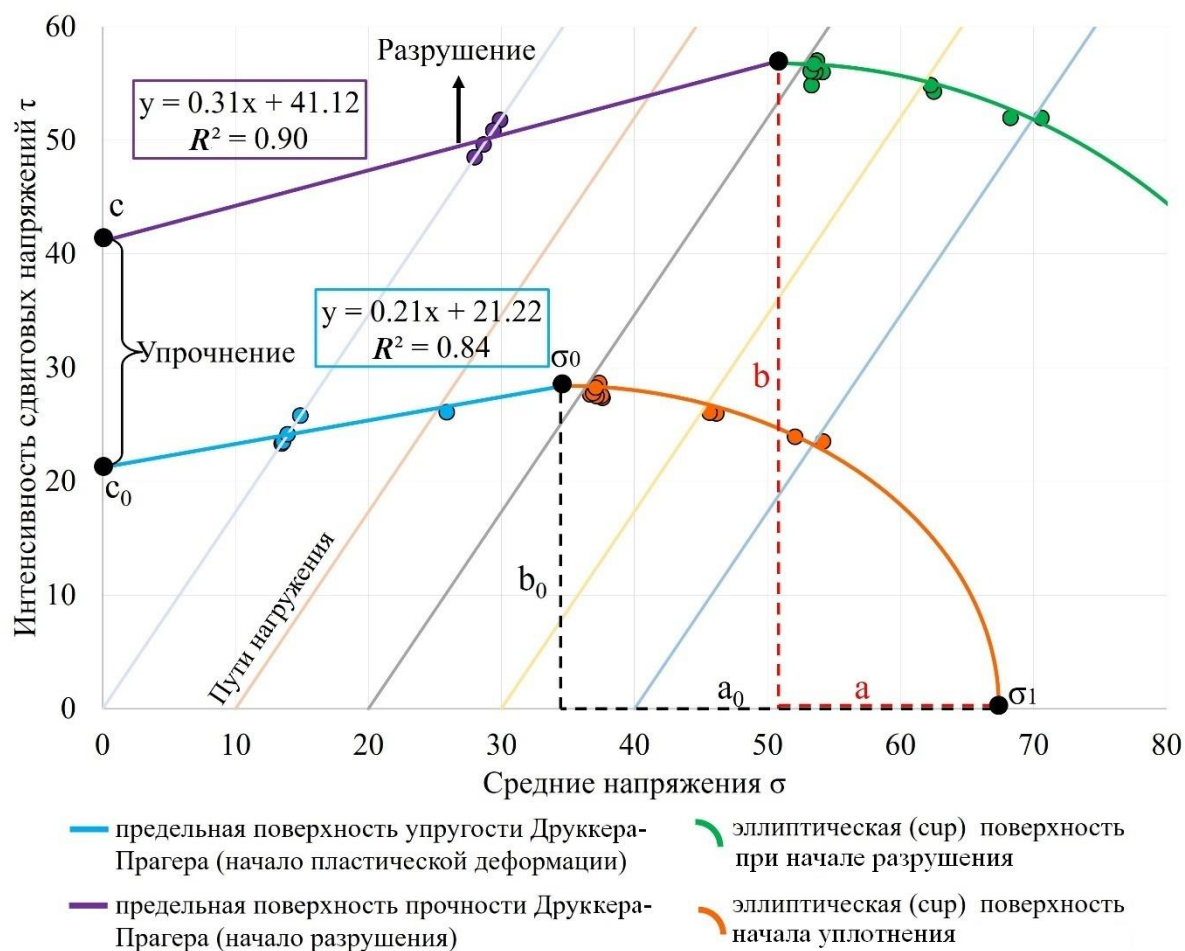


Рис. 4. Пути нагружения и предельная поверхность

Таблица 2

Параметры модели с комбинированной предельной поверхностью, полученные по экспериментальным данным

ρ_0	2.47 г/см ³	Плотность образца до проведения эксперимента
K_0	2.6 ГПа	Начальный объемный модуль (при обжиге 0)
G_0	2.3 ГПа	Начальный модуль сдвига (при обжиге 0)
Y_0	21.2 МПа	Когезия поверхности упругости Друккера–Прагера
α	0.32	Коэффициент внутреннего трения поверхности прочности Друккера–Прагера
β	0.3	Коэффициент дилатансии
h	1.0	Параметр упрочнения

γ^*	0.01	Интенсивность сдвиговой пластической деформации, соответствующая пиковым напряжениям (пределу прочности)
σ_0	34 МПа	Давление, при котором начинается уплотнение (переход к эллиптической предельной поверхности)
σ_1	68 МПа	Давление, при котором начинается уплотнение при всестороннем сжатии
ε^*	0.03	Начальная пористость
m	6	Показатель степени в уравнении, описывающем изменение σ_0 (смещение эллиптической поверхности)
n_1	0	Показатель степени в уравнении для изменения коэффициента дилатансии
n_2	1.6	Показатель степени в уравнении для изменения коэффициента дилатансии в области компакций
r	1.2	Коэффициент связи между σ_1 и σ_0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные исследования образцов пород баженовской свиты показал ряд особенностей их поведения под нагрузкой. В первую очередь это развитие деформации в режимах дилатансии и компакций. Причем не смотря на низкую пористость, переход в режим уплотнения происходит при давлениях 34 МПа, что достигается при давлениях бокового обжатия порядка 15 МПа. Соответственно, при боковом обжатии 20 МПа деформация образца происходит с необратимым сокращением объема. Такие значения смены режима деформирования, например, для песчаника соответствуют пористости более 20 %. При этом процесс деформации в обоих режимах сопровождается значительным упрочнением, когезия возрастает в два раза.

Отмечена существенная нелинейность диаграмм нагружения на начальных участках нагружения. В зависимости от давления обжима (на интервале от 0 до 40 МПа) упругие модули возрастают приблизительно в 1.5 раза.

На основе анализа экспериментальных данных, полученных в рамках стандартных испытаний при разных значениях бокового обжатия, определены параметры математической модели с комбинированной предельной поверхностью, которая позволяет описывать процесс деформации с учетом дилатансии и компакций.

Работа выполнена при поддержке проекта Программы Фонда научных исследований № FWZZ-2022-0021 «Региональные особенности структуры земной коры и верхов мантии платформенных и складчатых областей Сибири, их напряженно-деформированное состояние по данным сейсмологии, гравиметрии и геомеханики».

ЛИТЕРАТУРА

Баяк И.О., Березина И.А., Краснова М.А., Патонин А.В., Пономарев А.В., Тихоцкий С.А., Фокин И.В., Цельмович И.В., Калмыков Г.А. Экспериментально-теоретический подход для прогноза и анализа анизотропных упругих свойств углеводородосодержащего сланца Баженовской свиты при пластовых

условиях // Актуальные направления геологического изучения и освоения недр Западной Сибири. – Тюмень ФГУП «ЗапСибНИИГГ», 2015. – С. 47–59.

Друккер Д., Прагер В. Механика грунтов и пластический анализ или предельное проектирование // Механика. Новое в зарубежной науке. Вып. 2. Определяющие законы механики грунтов. – М.: Мир, 1975. – С. 166–177.

Конторович А.Э., Конторович В.А., Рыжкова С.В., Шурыгин Б.Н., Вакуленко Л.Г., Гайдебурова Е.А., Данилова В.П., Казаненков В.А., Ким Н.С., Костырева Е.А., Москвин В.И., Ян П.А. Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в юрском периоде // Геология и геофизика. – 2013. – № 54 (8). – С. 972–1012.

Конторович А.Э., Бурштейн Л.М., Никитенко Б.Л., Рыжкова С.В., Борисов Е.В., Ершов С.В., Костырева Е.А., Конторович В.А., Нехаев А.Ю., Пономарева Е.В., Фомин М.А., Ян П.А. Маргинальный фильтр волжско-раннеберриасского морского бассейна и его влияние на распределение осадков // Литология и полезные ископаемые. – 2019. – № 3. – С. 199–210, doi: 10.31857/S0024-497X20193199-210.

Маркин М.А., Гула А.К., Юсупов Я.И. Комплексный геомеханический подход для выбора интервалов проведения ГРП на примере баженовской свиты в пределах Краснотеннинского свода // Бурение и нефть. – 2016. – № 9. – С. 50–55.

Николаевский В.Н. Определяющие уравнения пластического деформирования сыпучей среды // Прикладная математика и механика. – 1971. – № 35 (6). – С. 1017–1029.

Стафеев А.Н., Ступакова А.В., Сулова А.А., Гилаев Р.М. Обстановки осадконакопления и палеогеографическая зональность баженовского горизонта (титон-нижний берриас) Западной Сибири // Георесурсы. – 2017. – Спецвыпуск. Ч. 2. – С. 134–143, doi: 10.18599/grs.19.14.

Стефанов Ю.П. Локализация деформаций и нарушений в геоматериалах. Численное моделирование // Физическая мезомеханика. – 2002. – № 5 (5). – С. 107–118.

Стефанов Ю.П. Некоторые нелинейные эффекты поведения горных пород // Физическая мезомеханика. – 2016. – № 19 (6). – С. 54–61.

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 керна в ЦПГИ ИФЗ РАН // Наука и технологические разработки. – 2017. – № 96 (2). – С. 17–32, doi: 10.21455/std2017.2-2.

Шубин А.А., Кудымов А.Ю., Яценко В.М. Методические аспекты изучения механических свойств пород баженовской свиты // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 3. – С. 43–46, doi: 10.24887/0028-2448-2020-3-43-46.

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.

Bieniawski Z.T. Mechanism of brittle fracture of rock: Part II – experimental studies // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts. – 1967. – Vol. 4. – P. 407–423, doi: 10.1016/0148-9062(67)90031-9.

Colmenares L.B., Zoback M.D. A statistical evaluation of intact rock failure criteria constrained by polyaxial test data for five different rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2002. – Vol. 39. – P. 695–729, doi: 10.1016/S1365-1609(02)00048-5.

Garavand A., Stefanov Yu.P., Rebetsky Y.L., Bakeev R.A., Myasnikov A.V. Numerical modeling of plastic deformation and failure around a wellbore in compaction and dilation modes // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2020. – Vol. 44. – P. 823–850, doi: 10.1002/nag.3041.

Grueschow E., Rudnicki J.W. Elliptic yield cap constitutive modeling for high porosity sandstone // *International Journal of Solids and Structures*. – 2005. – Vol. 42. – P. 4574–4587, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2005.02.001.

Stefanov Yu.P., Chertov M.A., Aidagulov G.R., Myasnikov A.V. Dynamics of inelastic deformation of porous rocks and formation of localized compaction zones studied by numerical modeling // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. – 2011. – Vol. 59. – P. 2323–2340, doi: 10.1016/j.jmps.2011.08.002.

REFERENCES

Bayuk I.O., Berezina I.A., Krasnova M.A., Patonin A.V., Ponomarev A.V., Tikhotsky S.A., Fokin I.V., Tselmovich V.A., Kalmykov G.A. Experimental and theoretical approach for the prediction and analysis of anisotropic elastic properties of hydrocarbon-containing shale of the Bazhenov formation under reservoir conditions // *Actual directions of geological study and development of the subsoil of Western Siberia*. – ZapSibNIIGG, Tyumen, 2015. – P. 47–59.

Bieniawski Z.T. Mechanism of brittle fracture of rock: Part II – experimental studies // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*. – 1967. – Vol. 4. – P. 407–423, doi: 10.1016/0148-9062(67)90031-9.

Colmenares L.B., Zoback M.D. A statistical evaluation of intact rock failure criteria constrained by polyaxial test data for five different rocks // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2002. – Vol. 39. – P. 695–729, doi: 10.1016/S1365-1609(02)00048-5.

Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design // *Quarterly of Applied Mathematics* – 1952 – Vol. 10 (2) – P. 157–165, doi: 10.1090/qam/48291.

Garavand A., Stefanov Yu.P., Rebetsky Y.L., Bakeev R.A., Myasnikov A.V. Numerical modeling of plastic deformation and failure around a wellbore in compaction and dilation modes // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. – 2020. – Vol. 44. – P. 823–850, doi: 10.1002/nag.3041.

Grueschow E., Rudnicki J.W. Elliptic yield cap constitutive modeling for high porosity sandstone // *International Journal of Solids and Structures*. – 2005. – Vol. 42. – P. 4574–4587, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2005.02.001.

Kontorovich A.E., Kontorovich V.A., Ryzhkova S.V., Shurygin B.N., Vakulenko L.G., Gaideburova E.A., Danilova V.P., Kazanenkov V.A., Kim N.S., Kostyreva E.A., Moskvina V.I., Yan P.A. Jurassic paleogeography of the West Siberian sedimentary basin // *Russian Geology and Geophysics*. – 2013. – Vol. 54 (8). – P. 747–779, doi: 10.1016/j.rgg.2013.07.002.

Kontorovich A.E., Burstein L.M., Nikitenko B.L., Ryzhkova S.V., Borisov E.V., Ershov S.V., Kostyreva E.A., Kontorovich V.A., Nekhaev A.Y., Ponomareva E.V., Fomin M.A., Yan P.A. Volgian–early Berriasian marginal filter in the West Siberian marine basin and its influence on sediment distribution // *Lithology and Minerals*. – 2019. – Vol. 3. – P. 199–210.

Markin M., Gula A., Yusupov J. Complex geomechanical approach to select intervals of fracturing on the example of the Bazhenov Formation within Krasnoleninsky arch // *Burenie i Neft*. – 2016. – No. 9. – P. 50–55.

Nikolaevskii V.N. Governing equations of plastic deformation of a granular medium // *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. – 1971. – Vol. 35 (6). – P. 1017–1029, doi: 10.1016/0021-8928(71)90106-7.

Shubin A.A., Kudymov A.Yu., Yatsenko V.M. Methodological aspects of studying the mechanical properties of rocks of Bazhenov formation // *Oil Industry*. – 2020. – Vol. 3. – P. 43–46, doi: 10.24887/0028-2448-2020-3-43-46.

Shustov D.V. Bazhen Formation shale rock physical and mechanical properties anisotropy // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh zavedenii. Gornyi Zhurnal*. – 2019. – Vol. 4. – P. 55–60.

Stafeev A.N., Stoupakova A.V., Suslova A.A., Gilaev R.M. Conditions of sedimentation and paleogeographic zoning of the Bazhenov horizon (Tithon–Lower Berrias) in West Siberia // *Georesources*. – 2017. – Special Issue. Part 2. – P. 134–143.

Stefanov Yu.P. Deformation localization and fracture of geomaterials: numerical simulation // *Physical Mesomechanics*. – 2002. – Vol. 5. – P. 103–114.

Stefanov Yu.P. Some nonlinear rock behavior effects // *Physical Mesomechanics*. – 2018. – Vol. 21. – P. 234–241, doi: 10.1134/S1029959918030074.

Stefanov Yu.P., Chertov M.A., Aidagulov G.R., Myasnikov A.V. Dynamics of inelastic deformation of porous rocks and formation of localized compaction zones studied by numerical modeling // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. – 2011. – Vol. 59. – P. 2323–2340, doi: 10.1016/j.jmps.2011.08.002.

Tikhotsky S.A., Fokin I.V., Bayuk I.O., Beloborodov D.E., Berezina I.A., Gafurova D.R., Dubinya N.V., Krasnova M.A., Korost D.V., Makarova A.A., Patonin A.V., Ponomarev A.V., Khamidullin R.A., Tselmovich V.A. Comprehensive laboratory core analysis at CPGR IPE RAS // *Seismic Instruments*. – 2018. – Vol. 54. – P. 586–597, doi: 10.3103/S0747923918050146.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

СТЕФАНОВ Юрий Павлович – доктор физико-математических наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории геофизических исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: поведение горных пород за пределом упругости, локализация деформации и разрушения, численное моделирование.

ЖАРАСБАЕВА Дарья Константиновна – лаборант лаборатории геофизических исследований и региональной сейсмичности Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: строение и свойства горных пород, экспериментальные исследования, численное моделирование.