

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

УДК 622.023.23

DOI 10.25587/2587-8751-2025-1-5-18

Научная оригинальная статья

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРИТЕРИЕВ РАЗРУШЕНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СТВОЛА СКВАЖИНЫ В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ

А.Е. Колесов

Северо-восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова,
г. Якутск, Российская Федерация
ae.kolesov@s-vfu.ru

Аннотация

Нарушение устойчивости открытого ствола скважины в процессе наклонно-направленного и горизонтального бурения является критической проблемой, способной привести к аварийным ситуациям и значительным экономическим потерям. Одним из ключевых способов предотвращения обрушения стенок скважин является тщательный подбор плотности бурового раствора на основе геомеханического моделирования. Целью данного исследования является сравнительный анализ влияния наиболее используемых критериев разрушения (Кулона-Мора, Друккера-Прагера, Хука-Брауна, Моджи-Кулона и Ладе) на расчет плотности бурового раствора, обеспечивающего устойчивость скважины. В работе проводится одномерное геомеханическое моделирование в программном комплексе «РН-СИГМА 2.0» с использованием каротажных данных (плотность, интервальные времена продольных и поперечных волн) для пяти скважин из открытых источников. Рассчитаны профили геостатического и порового давлений, динамические и статические упругие свойства (модуль Юнга и коэффициент Пуассона), прочностные свойства (пределы прочности на одноосное сжатие и растяжение, угол внутреннего трения), а также горизонтальные напряжения по пороупругой модели. Результаты расчетов показали, что выбор критерия разрушения оказывает существенное влияние на величину плотности бурового раствора, необходимого для предотвращения обрушения стенок скважин. Минимальные значения плотности получены при использовании критерия Ладе, а максимальные – критериев Хука-Брауна и Друккера-Прагера. Классический линейный критерий Кулона-Мора показал средние значения плотности. Эти различия обусловлены разной математической формулировкой критериев и учетом ими различных механизмов разрушения горных пород. Полученные результаты указывают на необходимость тщательного выбора критерия разрушения, соответствующего литологии и механическим свойствам конкретных интервалов горных пород.

Ключевые слова: геомеханика, геомеханическая модель, критерии разрушения, устойчивость ствола, бурение скважин, плотность бурового раствора.

Для цитирования: Колесов А.Е. Исследование влияния критериев разрушения на устойчивость ствола скважины в процессе бурения. *Вестник СВФУ*. 2025;(3): 5-18. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-5-18

STUDY OF THE IMPACT OF FAILURE CRITERIA ON WELLBORE STABILITY DURING DRILLING

Aleksandr E. Kolesov

M. K. Ammosov North-Eastern Federal University,
Yakutsk, Russian Federation
ae.kolesov@s-vfu.ru

Abstract

The instability of an open wellbore during directional and horizontal drilling is a critical issue that can lead to emergencies and significant economic losses. One of the key methods to prevent wellbore collapse is the careful selection of drilling fluid density based on geomechanical modeling. The objective of this study is a comparative analysis of the influence of the most commonly used failure criteria (Coulomb-Mohr, Drucker-Prager, Hoek-Brown, Mohr-Coulomb, and Lade) on the calculation of drilling fluid density required to ensure wellbore stability. The work involves one-dimensional geomechanical modeling using the RN-SIGMA 2.0 software package with logging data (density, interval transit times of longitudinal and transverse waves) from five wells obtained from open sources. We calculated profiles of geostatic and pore pressures, dynamic and static elastic properties (Young's modulus and Poisson's ratio), strength properties (uniaxial compressive and tensile strength limits, internal friction angle), as well as horizontal stresses according to a poroelastic model. The results showed that the choice of failure criterion significantly affects the required drilling fluid density to prevent wellbore collapse. The lowest density values were obtained using the Lade criterion, while the highest values corresponded to the Hoek-Brown and Drucker-Prager criteria. The classical linear Coulomb-Mohr criterion yielded intermediate density values. These differences are due to different mathematical formulations of the criteria and their consideration of various rock failure mechanisms. The findings indicate the necessity of carefully selecting a failure criterion appropriate for the lithology and mechanical properties of specific rock intervals.

Keywords: geomechanics, geomechanical model, failure criteria, wellbore stability, well drilling, drilling mud density

For citation: Kolesov A.E. Study of the impact of failure criteria on wellbore stability during drilling. *Vestnik of North-Eastern Federal University. "Earth Sciences"*. 2025;(3):5–18 (in Russian) DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-5-18

Введение

Развитие технологий наклонно-направленного и горизонтального бурения существенно повысило риски нарушения устойчивости ствола скважин [1-3]. Обрушение стенок, поглощение бурового раствора и другие осложнения связаны с возможными геомеханическими проблемами. Ключевым фактором при прогнозировании устойчивости скважин является выбор критерия разрушения горных пород.

Развитие нефтегазовой и горной промышленности привело к росту интереса к изучению прочности горных пород и появлению множества критериев их разрушения. Исследованию влияния выбора критерия на результаты геомеханического моделирования устойчивости скважины посвящены много работ отечественных и зарубежных авторов [4-9]. В настоящее время, благодаря своей простоте, широко применяется классический линейный критерий Мора-Кулона, но он не учитывает промежуточное главное напряжение и может дать заниженные результаты для некоторых горных пород. Альтернативные критерии лучше учитывают специфику пород, однако их верификация в реальных скважинных условиях остается недостаточной [5].

В работе [4] проведен обзор 34 критериев, перечислены их преимущества и недостатки, условия применимости, а также даны рекомендации по выбору критерия. Авторы рекомендуют использовать критерий Стасии д'Алиа для сланцевых пород, Друккера-Прагера для глинистых

и пластичных пород, Моджи-Кулона для осадочных и метаморфических пород. В работе [5] проведено статистическое сравнение влияния 13 критериев разрушения на значение плотности бурового раствора, полученных численно с использованием пороупругой модели. Анализ влияния 5 критериев на устойчивость наклонно-направленной скважины проведена в работе [6].

В данной работе проведен сравнительный анализ влияния пяти критериев разрушения (Кулона-Мора, Друккера-Прагера, Хука-Брауна, Моджи-Кулона, Ладе) на значение плотности бурового раствора, обеспечивающей устойчивость ствола, используя специализированный программный комплекс для одномерного геомеханического моделирования «РН-СИГМА 2.0», который широко используется для оценки рисков при планировании бурения и эксплуатации скважин [10, 11].

Материалы и методы исследования

Исходные данные для нашего исследования получены из открытых источников¹. Рассматриваются результаты каротажа для пяти скважин, основные характеристики которых представлены в таблице 1. На рис. 1 показаны траектория скважины 1 и результаты измерения плотности ρ , интервальное время продольной волны Δt_s^2 и поперечной волны Δt_p^2 по глубине этой скважины.

Таблица 1

Основные характеристики исследуемых скважин

Table 1

Basic information about the wells being studied

Номер скважины	Вид	Длина, м	Глубина забоя, м
1	Наклонно-направленный	2473.43	2447.50
2		4126.75	3659.16
3		1988.25	1966.16
4		2727.91	2702.51
5		2980.31	2954.48

Расчет выполняется в несколько последовательных этапов: определение плотности пород, геостатического и порового давления, упругих и прочностных свойств и горизонтальных напряжений [11]. Последним этапом является определение плотностей бурового раствора, приводящих к обрушению, поглощению, выбросу и гидравлическому разрыву. На основе данных плотностей определяется рекомендованная для бурения плотность раствора.

Геостатическое или горное давление σ_v – это давление, образуемое вышележащими горными породами. Его рассчитываем интегрированием плотности горных пород по глубине ρ . В нашем случае, измерения плотности проведены только в определенном интервале, и необходимо восстановить значение плотности горных пород, начиная с дневной поверхности и заканчивая забоем скважины. Для этого существует множество методов, включая методы Гарднера, Миллера и т.д. В нашем исследовании, экстраполировали измеренный интервал плотности до устья и забоя скважины. Поровое или пластовое давление p определяется как гидростатическое, принимая плотность жидкости равной 1030 кг/м³.

Для определения распределения упругих свойств горных пород сначала по результатам акустических исследований рассчитываются динамические модуль Юнга E_{dyn} и коэффициент Пуассона ν_{dyn} по следующим формулам [12]:

¹ <https://github.com/bolgebrygg/Force-2020-Machine-Learning-competition>

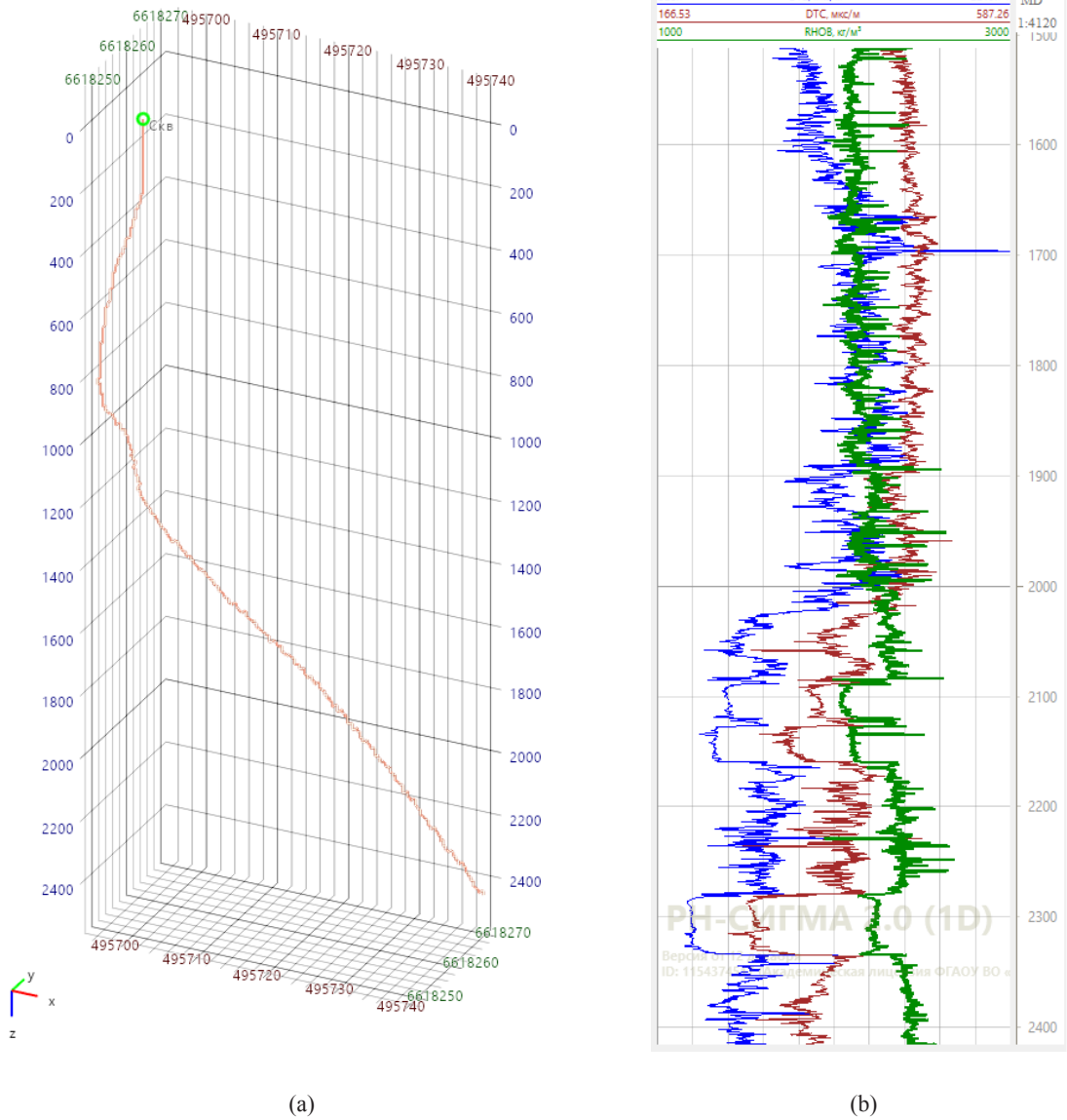


Рис. 1. (а) Траектория скважины; (б) Каротажи: интервальные времена поперечной и продольной волн (синяя и красная линии), плотность (зеленая линия)

Fig. 1. (a) Well trajectory; (b) Logs: shear and compressional wave interval times (blue and red lines), density (green line)

$$E_{dyn} = \frac{\rho (3 \Delta t_s^2 - 4 \Delta t_p^2)}{\Delta t_s^2 (\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2)}, \quad v_{dyn} = \frac{\Delta t_s^2 - 2 \Delta t_p^2}{2(\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2)}.$$

где Δt_s^2 и Δt_p^2 – временные интервалы продольной волны и поперечной волны по глубине этой скважины, соответственно. Из динамических коэффициентов по известным корреляционным зависимостям определяются статические коэффициенты. Для вычисления статического модуля Юнга будем использовать корреляцию Лейси, полученного по результатам трехосных и ультразвуковых исследований около 600 кернов из 60 пластов [13]:

$$E_{st} = 0.018 E_{dyn}^2 + 0.422 E_{dyn},$$

где E_{st} и E_{dyn} имеют размерность мегафунт-сила на квадратный дюйм (Mpsi). Связь между динамическим и статическим коэффициентами Пуассона также сложна, но в общих случаях может быть выражена по линейной зависимости [14]:

$$\nu_{st} = K \nu_{dyn}.$$

Здесь K – константа, которую задаем равной 0.8, так как исследования показали, что для осадочных пород статические коэффициенты Пуассона меньше динамических.

На следующем этапе, рассчитываем прочностные свойства горных пород: пределы прочности на одноосное сжатие и растяжение, угол внутреннего трения. Предел на сжатие C_0 находим, используя корреляцию Лейси [13]:

$$C_0 = 0.2787 E_{st}^2 + 2.458 E_{st},$$

где E_{st} имеет размерность мегафунт-сила на квадратный дюйм (Mpsi), C_0 – килофунт-сила на квадратный дюйм (kpsi). Предел прочности на разрыв T_0 получаем из линейной зависимости:

$$T_0 = k C_0,$$

где k – коэффициент пропорциональности, равный 0.125. Угол внутреннего трения ψ определяется из соотношения:

$$T_0 = C_0 \frac{1 - \sin \psi}{1 + \sin \psi}.$$

К выделенным единицам измерения давления следует добавить пояснение о переводе этих единиц в единицы СИ, в частности, в ГПа и МПа.

Далее, рассчитываем минимальные σ_h и максимальные σ_H горизонтальные напряжения согласно пороупругой модели [15, 16]:

$$\begin{aligned} \sigma_h &= \frac{\nu_{st}}{1 - \nu_{st}} (\sigma_V - \alpha p) + \alpha p + \frac{E_{st}}{1 - \nu_{st}^2} \varepsilon_h + \frac{\nu_{st} E_{st}}{1 - \nu_{st}^2} \varepsilon_H, \\ \sigma_H &= \frac{\nu_{st}}{1 - \nu_{st}} (\sigma_V - \alpha p) + \alpha p + \frac{E_{st}}{1 - \nu_{st}^2} \varepsilon_H + \frac{\nu_{st} E_{st}}{1 - \nu_{st}^2} \varepsilon_h, \end{aligned}$$

где α – коэффициент пороупругости Био, ε_h , ε_H – минимальная и максимальная горизонтальные деформации, p – поровое давление. Так как данные по деформации отсутствуют, будем использовать нулевые значения ε_h и ε_H , поэтому значения минимальных и максимальных напряжений будут одинаковыми. Также, для наших расчетов будем использовать коэффициент пороупругости равный $\alpha = 0.9$.

На последнем этапе определяем давления, создаваемые буровым раствором на стенку скважины, необходимые для предотвращения обрушения стенки, поглощения раствора, выброса оборудования и гидравлического разрыва пласта. На их основе вычисляются соответствующие плотности бурового раствора. Наибольший интерес представляет плотность обрушения, то есть минимальная плотность бурового раствора, при которой возможно обрушение стенок скважины. Плотность обрушения напрямую зависит от выбранного критерия разрушения, который определяет минимальное напряжение, необходимое для удержания стенок скважины в устойчивом положении. В нашей работе рассматриваются следующие критерии:

- Критерий Кулона-Мора:

$$\sigma_1 = C_0 + q \sigma_3, \quad q = \frac{C_0}{T_0},$$

- Критерий Друккера-Прагера:

$$\sqrt{J_2} = A + B I_1,$$

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2], \quad I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3,$$

$$A = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{C_0 T_0}{C_0 + T_0} \right), \quad B = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{C_0 - T_0}{C_0 + T_0} \right),$$

- Критерий Хука-Брауна:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m C_0 \sigma_3 + C_0}, \quad m = \frac{C_0^2 - T_0^2}{C_0 T_0},$$

- Критерий Моджи-Кулона:

$$\tau_{oct} = a + b \sigma_m,$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad \sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2},$$

$$a = \frac{2\sqrt{2}}{3} \left(\frac{C_0 T_0}{C_0 + T_0} \right), \quad b = \frac{2\sqrt{2}}{3} \left(\frac{C_0 - T_0}{C_0 + T_0} \right),$$

- Критерий Ладе:

$$\frac{(3S + \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^3}{(\sigma_1 + S)(\sigma_2 + S)(\sigma_3 + S)} = \eta + 27,$$

$$S = \frac{C_0}{2} \left(\frac{1 - \sin \varphi}{\tan \varphi \cos \varphi} \right), \quad \eta = \frac{4 \tan^2 \varphi (9 - 7 \sin \varphi)}{1 - \sin \varphi}.$$

В данных формулах, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – максимальное, среднее и минимальное главные напряжения, соответственно, I_2 – второй инвариант девиатора напряжений, I_1 – первый инвариант тензора напряжений, τ_{oct} – октаэдрическое касательное напряжение, σ_m – нормальное напряжение на плоскость.

Результаты

Расчеты были проведены для данных скважин, представленных в таблице 1. Далее, приведем результаты расчета только для скважины 1. На рис. 2а показаны распределения по профилю скважины плотности, горного и порового давлений. Видим, что плотность задана в интервале примерно от 1200 до 2450 метров и была экстраполирована до устья и забоя. На забое скважины горное и поровое давления равны 50 и 35 МПа, соответственно.

Расчитанные динамические и статические модули Юнга и коэффициенты Пуассона представлены на рис. 2б и 2с, соответственно. На рис. 3а показаны рассчитанные значения прочностных свойств: предел прочности на одноосное сжатие, предел прочности на растяжение, угол внутреннего трения; горизонтальное напряжение); на рис. 3б – горизонтальное напряжение.

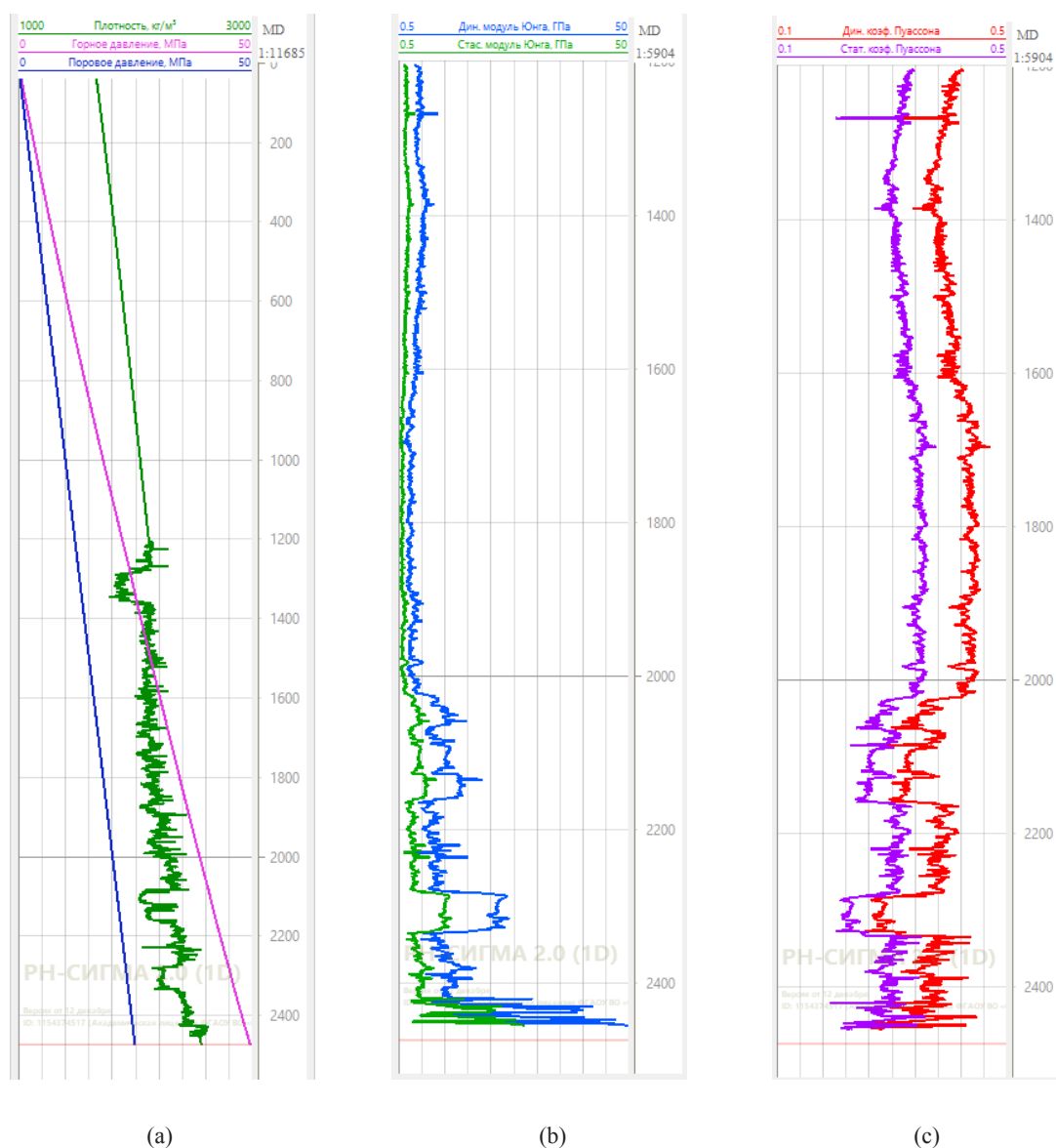


Рис. 2. Результаты расчета: (а) плотность (зеленая линия), горное давление (розовая линия), поровое давление (темно-синяя линия); (б) динамический и статический модули Юнга (синяя и зеленая линии, соответственно); (с) динамический и статический коэффициенты Пуассона (красная и фиолетовая линии, соответственно)

Fig. 2. Calculation results: (a) density (green line), rock pressure (pink line), pore pressure (dark blue line); (b) dynamic and static Young's moduli (blue and green lines, respectively); (c) dynamic and static Poisson's ratios (red and purple lines, respectively)

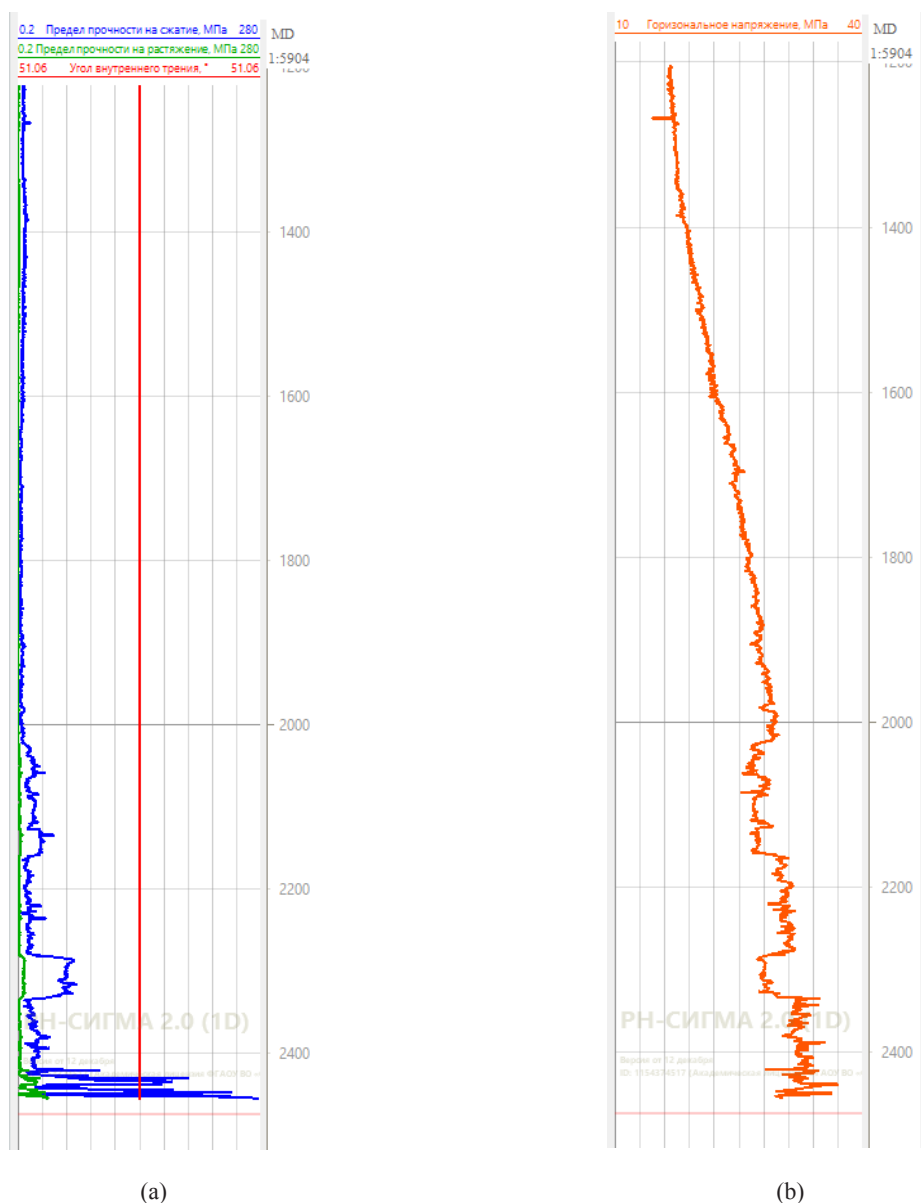


Рис. 3. Результаты расчета: (а) предел прочности на одноосное сжатие (синяя линия), предел прочности на растяжение (зеленая линия), угол внутреннего трения (красная линия); (б) горизонтальное напряжение

Fig. 3. Calculation results: (a) ultimate uniaxial compressive strength (blue line), ultimate tensile strength (green line), angle of internal friction (red line); (b) horizontal stress

На рис. 4 представлены результирующие плотности обрушения, поглощения, гидроразрыва и выброса. Здесь, плотность обрушения рассчитана по критерию Кулона-Мора.

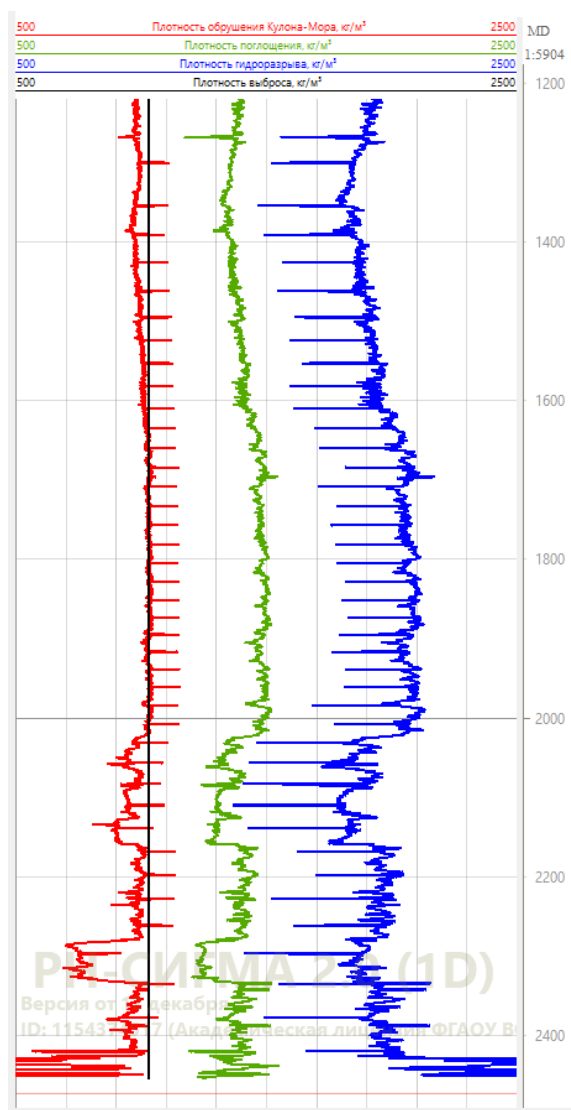


Рис. 4. Результаты расчета: плотность обрушения Кулона-Мора (красная линия), плотность поглощения (зеленая линия), плотность гидроразрыва (синяя линия), плотность выброса (черная линия)

Fig. 4. Calculation results: Mohr-Coulomb collapse density (red line), absorption density (green line), hydraulic fracture density (blue line), ejection density (black line)

На рис. 5 показаны плотности обрушения, полученные при использовании критериев разрушения Кулона-Мора, Друккера-Прагера, Хука-Брауна, Моджи-Кулона и Ладе. Данные критерии реализованы в программном комплексе «РН-СИГМА 2.0».

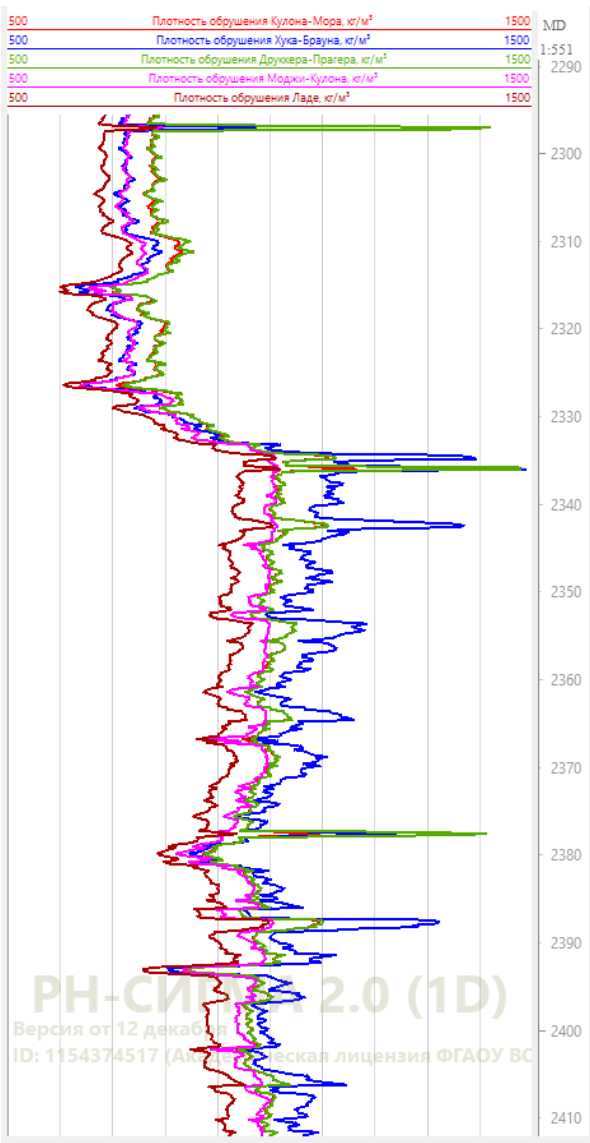


Рис. 5. Результаты расчета: плотности обрушения, полученные по критериям Кулона-Мора (красная линия), Друкера-Прагера (зеленая линия), Хука-Брауна (синяя линия), Моджи-Кулона (розовая линия), Ладе (коричневая линия)

Fig. 5. Calculation results: collapse densities obtained using the Coulomb-Mohr (red line), Drucker-Prager (green line), Hoek-Brown (blue line), Mogi-Coulomb (pink line), and Lade (brown line) criteria

В таблице 2 приведены максимальные, средние арифметические значения и среднеквадратические отклонения плотности обрушения для скважины 1 в зависимости от выбранного критерия разрушения. Значения средних арифметических плотностей для 5 исследуемых скважин представлены в таблице 3.

Таблица 2

Плотности обрушения при разных критериях разрушения

Table 2

Collapse densities for different failure criteria

Критерии разрушения	Плотность обрушения, кг/м³		
	Максимальное значение	Среднее арифметическое	Среднеквадратическое отклонение
Кулона-Мора	1192.5	1011.2	126.6
Друккера-Прагера	1635.4	1016.9	132.8
Хука-Брауна	1738.0	1149.0	205.4
Моджи-Кулона	1040.0	972.7	126.6
Ладе	1053.0	930.4	125.3

Таблица 3

Средние арифметические плотности обрушения для разных скважин

Table 3

Arithmetic mean densities collapse densities for different wells

Критерии разрушения	Средняя арифметическая плотность обрушения, кг/м³				
	Скважина 1	Скважина 2	Скважина 3	Скважина 4	Скважина 5
Кулона-Мора	1011.2	969.5	697.7	858.9	765.1
Друккера-Прагера	1016.9	1257.0	702.5	864.2	779.3
Хука-Брауна	1149.0	1052.2	661.4	918.6	772.2
Моджи-Кулона	972.7	864.2	668.1	833.1	710.2
Ладе	930.4	854.6	605.4	792.2	684.1

Обсуждение

Результаты расчётов показывают, что выбор критерия разрушения существенно влияет на минимально допустимое значение плотности бурового раствора, необходимое для предотвращения обрушения ствола скважин в процессе бурения. На рисунке 6 приведена гистограмма сравнения рассчитанных плотностей по данным таблицы 3. Видно, что критерии Хука-Брауна и Друккера-Прагера дают наибольшие значения плотности.

Критерий Хука-Брауна учитывает нелинейность деформирования и микротрещиноватость пород, что для слабых или трещиноватых пород (глин или сланцев) приводит к необходимости увеличения напряжения для предотвращения разрушения и, соответственно, к более высокой плотности бурового раствора для поддержания ствола скважины. В то же время критерий Друккера-Прагера, в отличие от Кулона-Мора, учитывает среднее напряжение, что также повышает нагрузку, необходимую для предотвращения разрушения.

Для всех скважин наименьшие значения плотности получены при использовании критерия Ладе, поскольку его математическая формулировка учитывает среднее напряжение, стабилизирующее породу вдоль ствола скважины, что позволяет снизить плотность раствора, необходимую для предотвращения разрушения.

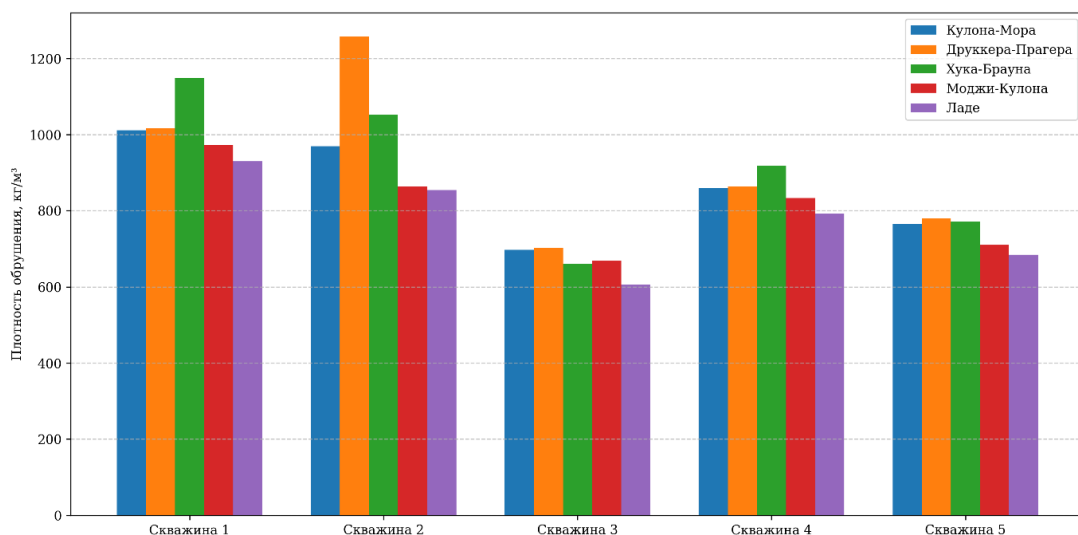


Рис. 6. Сравнение плотностей обрушения для разных критериев разрушения по скважинам

Fig. 6. Comparison of collapse densities for different failure criteria by wells

Закключение

Проведенное исследование показало, что выбор критерия разрушения при геомеханическом моделировании оказывает значительное влияние на границы плотности бурового раствора, необходимого для обеспечения устойчивости ствола скважины. Разница между максимальным и минимальным значениями плотности может достигать 40% (скважина 2). Это может создать риски необоснованного удорожания бурения или аварий из-за обрушения ствола. Выбор критерия разрушения должен базироваться на литологии интервала бурения. Также, необходимо провести литологическое зонирование и применять различные критерии разрушения для разных типов горных пород.

Литература

1. Потапов Р.А., Жирнов Р.А., Изосимов Д.И. и др. Анализ осложнений при строительстве наклонно-направленных эксплуатационных скважин на месторождении Восточной Сибири. *Научно-технический сборник Вести газовой науки*. 2018; 1(33):26-32.
2. Парфиров В.А., Закиров Н.Н., Ваганов Ю.В. и др. Проблемы строительства скважин в Восточной Сибири и пути их решения. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2019;1(133):52-57. DOI: 10.31660/0445-0108-2019-1-52-57.
3. Парфиров В.А., Палеев С.А., Ваганов Ю.В. Анализ строительства нефтяных скважин в осложненных условиях на месторождениях Восточной Сибири. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2016; 6(120):97-100. DOI: 10.31660/0445-0108-2016-6-97-100.
4. Архипов А.И., Ястребов П.В. Классификация геомеханических критериев разрушения горных пород и перспективы оперативного геомеханического сопровождения строительства скважин. *Вестник Ассоциации буровых подрядчиков*. 2020;(2):34-39.
5. Zhang L, Cao P, Radha KC. Evaluation of rock strength criteria for wellbore stability analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2010;47(8):1304-16. doi:10.1016/j.ijrmms.2010.09.001.
6. Colmenares LB, Zoback MD. 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;39(6):695-729.
7. Rahimi R, Nygaard R. What difference does selection of failure criteria make in wellbore stability analysis? In: *Proceedings of the 48th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*; 2014: 2114-27.

8. Shi Y, Ma T, Zhang D, Chen Y, Liu Y, Deng C. Analytical model of wellbore stability analysis of inclined well based on the advantageous synergy among the five strength criteria. *Geofluids*. 2023; doi:10.1155/2023/2201870.
9. Mahetaji M, Brahma J. A critical review of rock failure Criteria: A scope of Machine learning approach. *Engineering Failure Analysis*. 2024;159:107998. DOI:10.1016/j.engfailanal.2024.107998.
10. Латыпов И.Д., Валеева Э.З., Ардисламова Д.Р. и др. Опыт применения геомеханического моделирования при бурении скважин в зоне с активной тектонической обстановкой. *Нефтяное хозяйство*. 2022;(12):90-95. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-12-90-95.
11. Фадеева В.А., Самойлов М.И., Павлов В.А. и др. Использование предварительной 1D геомеханической модели для планирования исследований керна. *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. 2020;7:29-35. DOI:10.30713/2413-5011-2020-7(343)-29-35.
12. Fjær E. Relations between static and dynamic moduli of sedimentary rocks. *Geophysical Prospecting*. 2019;67:128-139. DOI:10.1111/1365-2478.12711
13. Lacy LL. Dynamic rock mechanics testing for optimized fracture designs. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas*. 1997. DOI: 10.2118/38716-MS
14. Shen S, Gao Y, Jia L. A comparison of the relationship between dynamic and static rock mechanical parameters. *Applied Sciences*. 2024;14(11):4487. DOI:10.3390/app14114487
15. Zoback MD. Reservoir geomechanics. New York: Cambridge University Press; 2007. DOI:10.1017/CBO9780511586477
16. Колесов А.Е. Численное решение задач пороупругости при разработке нефтяных месторождений. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова*. 2015;3(47):63-74.

References

1. Potapov RA, Zhirnov RA, Izosimov DI, et al. Analysis of complications during construction of directional production wells at the Eastern Siberian field. *Vesti gazovoy nauki*. 2018;1(33):26–32 (in Russian).
2. Parfiriev VA, Zakirov NN, Vaganov YuV et al. Well construction problems in Eastern Siberia and ways to solve them. *Oil and gas studies*. 2019;1(133):52–57 (in Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2019-1-52-57.
3. Parfiriev VA, Paleev SA, Vaganov YuV. Analysis of oil well construction in complicated conditions at the fields of Eastern Siberia. *Oil and gas studies*. 2016; 6(120):97–100 (in Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2016-6-97-100.
4. Arkhipov AI, Yastrebov PV. Classification of geomechanical criteria for rock destruction and prospects for operational geomechanical support of well construction. *Bulletin of the Association of Drilling Contractors*. 2020;(2):34–39 (in Russian).
5. Zhang L, Cao P, Radha KC. Evaluation of rock strength criteria for wellbore stability analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2010;47(8):1304–16. DOI:10.1016/j.ijrmms.2010.09.001.
6. Colmenares LB, Zoback MD. 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;39(6):695–729.
7. Rahimi R, Nygaard R. What difference does selection of failure criteria make in wellbore stability analysis? In: *Proceedings of the 48th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*; 2014: 2114–27.
8. Shi Y, Ma T, Zhang D, Chen Y, Liu Y, Deng C. Analytical model of wellbore stability analysis of inclined well based on the advantageous synergy among the five strength criteria. *Geofluids*. 2023; doi:10.1155/2023/2201870.
9. Mahetaji M, Brahma J. A critical review of rock failure Criteria: A scope of Machine learning approach. *Engineering Failure Analysis*. 2024;159:107998. DOI:10.1016/j.engfailanal.2024.107998.
10. Latypov ID, Valeeva EZ, Ardislamova DR, et al. Experience in the application of geomechanical modeling when drilling wells in a zone with an active tectonic setting. *Oil industry*. 2022;(12):90–95 (in Russian). DOI: 10.24887/0028-2448-2022-12-90-95.
11. Fadeeva VA, Samoilov MI, Pavlov VA, et al. Use of preliminary 1D geomechanical model for planning core studies. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*. 2020;7:29–35 (in Russian). DOI:10.30713/2413-5011-2020-7(343)-29-35.
12. Fjær E. Relations between static and dynamic moduli of sedimentary rocks. *Geophysical Prospecting*. 2019;67:128-139. DOI:10.1111/1365-2478.12711
13. Lacy LL. Dynamic rock mechanics testing for optimized fracture designs. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas*. 1997. DOI: 10.2118/38716-MS

14. Shen S, Gao Y, Jia L. A comparison of the relationship between dynamic and static rock mechanical parameters. *Applied Sciences*. 2024;14(11):4487. DOI:10.3390/app14114487
15. Zoback MD. Reservoir geomechanics. New York: Cambridge University Press; 2007. DOI:10.1017/CBO9780511586477
16. Kolesov AE. Numerical solution of poroelasticity problems associated with the development of oil fields. *Vestnik of North-Eastern Federal University*. 2015;3(47):63–74 (in Russian).

Об авторе

КОЛЕСОВ Александр Егорович – к.ф.-м.н., доц. каф. «Недропользование» геологоразведочный факультет «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова», ORCID: 0000-0001-9969-1195, ResearcherID: P-9732-2015, Scopus Author ID: 56049440100, SPIN: 3060-3992

E-mail: ae.kolesov@s-vfu.ru

About the author

Aleksandr E. KOLESOV – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of the Subsoil Use, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, ORCID: 0000-0001-9969-1195, ResearcherID: P-9732-2015, Scopus Author ID: 56049440100, SPIN: 3060-3992

E-mail: ae.kolesov@s-vfu.ru

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 12.08.2025

Принята к публикации / Accepted 28.08.2025