

*Казанцева Агата Михайловна, аспирант,
Тюменский Индустриальный Университет,
г. Тюмень.*

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЧНОСТИ ПРИ СЖАТИИ ДЛЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В БУРЕНИИ

Аннотация. В статье рассмотрены современные подходы к выбору критериев прочности горных пород при решении задач бурения скважин. Проведен сравнительный анализ классических (Мора-Кулона) и современных (Хоека-Брауна) критериев прочности применительно к терригенным и карбонатным породам-коллекторам. Выявлены основные факторы, определяющие выбор критерия: литологический состав, структура порового пространства, трещиноватость и анизотропия свойств. На основе анализа литературных данных показано, что для терригенных пород предпочтительным является критерий Мора-Кулона с учетом нелинейных эффектов, в то время как для карбонатных коллекторов необходима дополнительная калибровка критериев с учетом вторичных пустот.

Ключевые слова: теории прочности, критерий Мора-Кулона, критерий Хоека-Брауна, сжатие горных пород, терригенные породы, карбонатные породы, бурение скважин, устойчивость стенок скважины.

Abstract. The article examines modern approaches to selecting rock strength criteria in solving well drilling problems. A comparative analysis of classical (Mohr-Coulomb) and modern (Hoek-Brown) strength criteria is carried out with respect to terrigenous and carbonate reservoir rocks. The main factors determining the choice of criteria are identified: lithological composition, pore space structure, fracturing, and anisotropy of properties. Based on an analysis of literature data, it is shown that for

terrigenous rocks, the Mohr-Coulomb criterion is preferable, taking into account nonlinear effects, while for carbonate reservoirs, additional calibration of criteria considering secondary voids is necessary.

Keywords: *strength theories, Mohr-Coulomb criterion, Hoek-Brown criterion, rock compression, terrigenous rocks, carbonate rocks, drilling wells, wellbore stability.*

Введение

Обеспечение устойчивости ствола скважины при бурении является одной из ключевых задач геомеханического моделирования. Напряженно-деформированное состояние (НДС) горных пород в окрестности скважины характеризуется сложным распределением главных напряжений, требующим применения адекватных критериев прочности. Выбор критерия прочности определяет точность прогноза интервала безопасных плотностей бурового раствора и оценку риска возникновения вывалов, обвалов или поглощений.

Различия в литолого-петрофизических характеристиках терригенных и карбонатных пород обуславливают необходимость дифференцированного подхода к выбору критерия прочности [1]. Терригенные коллекторы характеризуются поровым типом пустотного пространства, тогда как для карбонатных пород характерно наличие вторичных пустот — трещин и каверн, что существенно влияет на их деформационно-прочностные свойства.

Обзор основных теорий прочности для горных пород.

Критерий Мора-Кулона является наиболее распространенным в практике геомеханического моделирования благодаря своей простоте и удовлетворительной точности для широкого класса горных пород. В общем виде критерий записывается следующим образом (1):

$$\tau + \sigma * \operatorname{tg}\varphi = c \quad (1)$$

где τ — касательное напряжение в плоскости разрушения; σ — нормальное напряжение; φ — угол внутреннего трения породы; c — сцепление породы.

Критерий Мора-Кулона хорошо зарекомендовал себя для оценки кратковременной прочности терригенных пород. Как отмечают Алиев и Шипилова, этот критерий дает приемлемую точность при определении предельных напряжений и направлений разрушения [2]. Однако его линейный характер не всегда адекватно описывает поведение пород при высоких давлениях обжима, когда наблюдается нелинейное увеличение прочности.

Эмпирический критерий Хоека-Брауна был разработан специально для скальных пород и учитывает нелинейный характер увеличения прочности с ростом ограничивающего давления (2):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} * (m_i * \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s)^{0.5} \quad (2)$$

где σ_{ci} — прочность породы на одноосное сжатие; m_i и s — эмпирические параметры, зависящие от типа породы и степени ее нарушенности.

Как показано в работе Гирфанова и соавторов, критерий Хоека-Брауна имеет преимущество в описании нелинейного увеличения прочности с увеличением давления обжима и более адекватно отображает свойства пород по сравнению с линейным критерием Мора-Кулона [3].

Значительная часть горных пород, особенно тонкослоистые терригенные отложения и сланцы, обладает анизотропией прочностных свойств. Как отмечают Дубиня и соавторы, в настоящее время не существует общепринятых стандартов для лабораторного определения прочностных свойств анизотропных пород [4].

При решении задачи оценки устойчивости ствола скважины в таких условиях необходимо учитывать ориентацию плоскостей напластования относительно оси скважины. Наиболее корректным является проведение истинно трехосных испытаний, имитирующих локальное напряженное состояние в околоскважинной зоне.

В процессе эксплуатации скважины породы стенок подвергаются длительному нагружению, что требует учета реологических эффектов. Шипилова и Шафиева рассматривают возможность применения критерия

Кулона-Мора для расчетов длительной устойчивости, отмечая, что при длительном нагружении угол внутреннего трения практически не изменяется, а сцепление уменьшается.

Особенности применения теорий прочности для терригенных пород.

Терригенные породы (песчаники, алевролиты, аргиллиты) характеризуются поровым типом пустотного пространства. Их прочностные свойства определяются минеральным составом, степенью цементации, пористостью и характером цементирующего материала.

Для терригенных отложений пашийского горизонта Ромашкинского месторождения, исследованных Гирфановым и соавторами, были определены пределы прочности при одноосном сжатии, растяжении и объемном сжатии. Установлено, что для этих пород характерно нелинейное увеличение прочности с ростом ограничивающего давления, что делает предпочтительным использование критерия Хоека-Брауна.

Терригенные разрезы часто характеризуются переслаиванием пород с различными прочностными свойствами. При бурении наклонно-направленных и горизонтальных скважин анизотропия прочностных свойств становится критическим фактором.

Дубиня и соавторы отмечают, что в окрестности скважины вследствие концентрации напряжений в большинстве случаев реализуется режим, при котором максимальным главным напряжением является одно из горизонтальных, а вертикальное — промежуточным по величине [4]. В этих условиях разрушение породы определяется соотношением между горизонтальными напряжениями.

На основе анализа литературных данных для терригенных пород рекомендуются следующие подходы:

1. Для изотропных песчаников — критерий Хоека-Брауна как наиболее точно описывающий нелинейное упрочнение.

2. Для слоистых разрезов — использование анизотропных модификаций критерия Мора-Кулона с определением прочностных параметров в различных направлениях.

3. Для глинистых пород — обязательный учет водонасыщения и набухания при выборе параметров прочности.

Особенности применения теорий прочности для карбонатных пород.

Карбонатные породы (известняки, доломиты, мела) характеризуются сложной структурой пустотного пространства, включающей как первичные поры, так и вторичные трещины и каверны. Это обуславливает значительный разброс прочностных характеристик даже в пределах одного литотипа.

В работе Зиганшина и соавторов представлены результаты комплексного анализа геомеханических свойств карбонатных пород, включая установление корреляционных зависимостей между плотностью, скоростью продольной волны и прочностью на одноосное сжатие [5]. Полученные регрессионные модели могут быть использованы для прогнозирования прочностных свойств при отсутствии прямых измерений.

Исследования Сукнёва показывают, что условия водонасыщения оказывают существенное влияние на прочность карбонатных пород при сжатии [6]. В экспериментах на образцах доломита и известняка установлено немонотонное изменение прочности в зависимости от времени выдержки во влажном состоянии.

Автором предложена модель «сухого ядра», объясняющая наблюдаемые эффекты неравномерным распределением влаги в образце. Согласно этой модели, в материале могут быть реализованы различные сценарии разрушения, что отражается на зависимости прочности от времени выдержки. Этот фактор необходимо учитывать при интерпретации результатов лабораторных испытаний керна карбонатных пород.

На основе обобщения данных по карбонатным породам установлены следующие зависимости:

1. Линейная корреляция между плотностью породы и скоростью продольной волны.

2. Степенная зависимость между скоростью продольной волны и прочностью на одноосное сжатие.

3. Корреляция между прочностью на сжатие и трещиностойкостью породы.

Эти зависимости позволяют проводить экспресс-оценку прочностных свойств карбонатных пород по данным геофизических исследований скважин (ГИС), что особенно ценно при отсутствии представительного кернового материала.

Для практической реализации рекомендуется следующая последовательность действий:

1. Отбор и подготовка образцов с учетом ориентации относительно слоистости.

2. Проведение испытаний на одноосное и трехосное сжатие при различных уровнях обжимающего давления.

3. Построение паспорта прочности.

4. Выбор критерия и определение его параметров методом регрессионного анализа.

5. Валидация модели по независимым экспериментальным данным.

Заключение

Проведенный анализ позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Выбор критерия прочности горных пород при сжатии является фактором, определяющим точность геомеханического моделирования в процессах бурения скважин.

2. Для терригенных пород, характеризующихся поровым типом коллектора, предпочтительным является критерий Хоека-Брауна, учитывающий нелинейное увеличение прочности с ростом ограничивающего давления.

3. Для карбонатных пород, характеризующихся сложной структурой пустотного пространства и трещиноватостью, необходима калибровка критерия Хоека-Брауна с использованием данных лабораторных испытаний керна и ГИС.

4. При наличии анизотропии прочностных свойств (тонкослоистые терригенные разрезы) требуется применение специальных методик испытаний и анизотропных критериев прочности.

5. Водонасыщение оказывает существенное влияние на прочность карбонатных пород, что необходимо учитывать при интерпретации результатов лабораторных испытаний и расчете устойчивости.

6. Для оценки длительной устойчивости стенок скважины критерий Мора-Кулона может быть адаптирован путем введения зависимости сцепления от времени.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку унифицированных методик определения параметров прочности горных пород для различных литолого-петрофизических типов коллекторов, а также на создание критериев, учитывающих как нелинейность, так и анизотропию свойств.

Литература

1. Московский И.Г. К вопросу о математическом моделировании напряженно-деформированного состояния горных пород в оценке устойчивости стенок скважины // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. — 2017. — № 3.

2. Шпилова О.А., Шафиева С.В. Критериальный подход к расчетам длительной устойчивости стенок скважины // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. — 2018. — № 1. — С. 79-84. DOI: 10.31660/0445-0108-2018-1-79-84.

3. Гирфанов И.И., Ремеев М.М., Сотников О.С. и др. Выбор оптимального критерия прочности для терригенных отложений пашийского горизонта Ташлиярской площади Ромашкинского месторождения // Георесурсы. — 2019. — Т. 21. — № 4. — С. 114-118. DOI: 10.18599/grs.2019.4.114-118

4. Дубиня Н.В., Тихоцкий С.А., Фокин И.В. Определение прочностных свойств анизотропных горных пород при решении задачи оценки устойчивости

ствола скважины и рекомендуемой плотности бурового раствора // Бурение и Нефть. — 2020. — № 11. — С. 36-41.

5. Зиганшин Э.Р., Дубиня Н.В., Кольчугин А.Н. и др. Обобщенная геомеханическая характеристика карбонатных пород нефтяного месторождения (Республика Татарстан) // Геофизика. — 2025. — № 4. — С. 78-87.

6. Сукнёв С.В. Влияние условий водонасыщения на прочность карбонатных пород при сжатии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. — 2025. — Т. 30. — № 2. — С. 220-230. DOI: 10.31242/2618-9712-2025-30-2-220-230