


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
Кафедра прикладной и технической физики

РЕКОМЕНДОВАНО К ЗАЩИТЕ В ГЭК  
Заведующий кафедрой  
к.ф.-м.н., доцент

  
16 июня

Р.М. Ганопольский  
2023 г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
магистерская диссертация

**ВЛИЯНИЕ СМЕНЫ НАСЫЩЕНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ НА ПРОЦЕСС  
БУРЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СКВАЖИН СЛАБОКОНСОЛИДИРОВАННЫХ  
КОЛЛЕКТОРОВ**

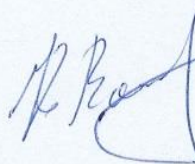
16.04.01 Техническая физика  
Магистерская программа «Физика недр»

Выполнил работу  
студент 2 курса  
очной формы обучения



Садвакасов Талгат  
Кайратович

Руководитель  
к.ф.-м.н., доцент



Кулешов Василий  
Сергеевич

Рецензент  
к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры  
«Разработка и эксплуатация газовых и  
нефтегазоконденсатных  
месторождений», Уфимский  
государственный нефтяной  
технический университет



Моисеев Константин  
Валерьевич

## Оглавление

1. ВВЕДЕНИЕ.....	3
1.1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР .....	7
1.2 АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ.....	16
1.3 РАСЧЕТ ПЕСКОПРОЯВЛЕНИЯ .....	20
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	22
2.1 КРАТКАЯ ЛИТОЛОГО-ФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА.....	27
2.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	27
2.2.1 ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ.....	27
2.2.2 ОДНООСНОЕ РАСТЯЖЕНИЕ.....	28
2.2.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПОРОД ПРИ ОБЪЕМНОМ СЖАТИИ МЕТОДОМ ТОЛСТОСТЕННОГО ЦИЛИНДРА В УСЛОВИЯХ МОДЕЛИРУЮЩИХ ПЛАСТОВЫЕ.....	29
2.2.4 СТРЕСС-ТЕСТЫ.....	33
3. 1-D ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.....	35
3.1 ГРАФ ПОСТРОЕНИЯ 1-D ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ.....	35
3.2 РАСЧЕТ БЕЗОПАСНОЙ ДЕПРЕССИИ.....	46
4. ВЫВОДЫ.....	49
5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	50
6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	51

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что разработка нефтяных и газовых месторождений сопровождается изменением целого ряда природных физических свойств пород-коллекторов. Например, при снижении пластового давления в околоскважинной зоне пласта, так и в продуктивной толще в целом и целом происходят существенные нарушения микроструктуры коллектора - изменение его фильтрационно-емкостных свойств, упругих и прочностных характеристик. При разработке нефтяных месторождений в процессе нагнетания воды возникают разнообразные химические реакции, приводящие к выпадению или растворению солей, выщелачиванию пород-коллекторов, набуханию и диспергированию глинистых минералов в зонах проникновения нагнетаемого флюида. Вода может существенно влиять на механические свойства горных пород, особенно осадочных пород, содержащих глинистые минералы, такие как песчаник и сланец. Снижение прочности и деформируемости горных пород с увеличением содержания воды стало одной из привлекательных проблем для исследователей. Многочисленные экспериментальные исследования показывают, что снижение прочности и модуля упругости горных пород зависит не только от содержания воды, но и от других внутренних и внешних факторов. Внутренние факторы включают в себя пористость, плотность, скорость деформации, поверхностное натяжение и диэлектрическую проницаемость насыщающей жидкости, процент поглощения и давление всасывания, который также играют значительную роль. Ослабляющее воздействие воды на горные породы всегда было главной темой исследований из-за высокой практической ценности. Обзор далее показывает, что содержание воды является наиболее значительным, но не единственным фактором, приводящим к снижению прочности и упругости породы. Влияние содержания воды, как правило, более выражено в осадочных породах, чем в магматических и метаморфических породах.

Одной из главных проблем при этом являются негативные эффекты, проявляющиеся в значительных объемах выноса твердых частиц, снижении

проницаемости с изменением напряженного состояния и образованием кинжальных прорывов. Образование кинжального прорыва в условиях слабосцементированного коллектора, насыщенного высоковязкой нефтью, вероятнее всего, связано с воздействием комплекса факторов, в числе которых изменение упруго-прочностных свойств пород ввиду смены насыщающего флюида и распределение напряжений в межскважинной области.

Одним из продуктивных методов наблюдения за напряженно-деформированным состоянием горных пород является Акустическая эмиссия. Акустическая эмиссия - техническая диагностика, основанная на явлении возникновения и распространения упругих колебаний (акустических волн) в различных процессах, например, при деформации напряжённого материала.

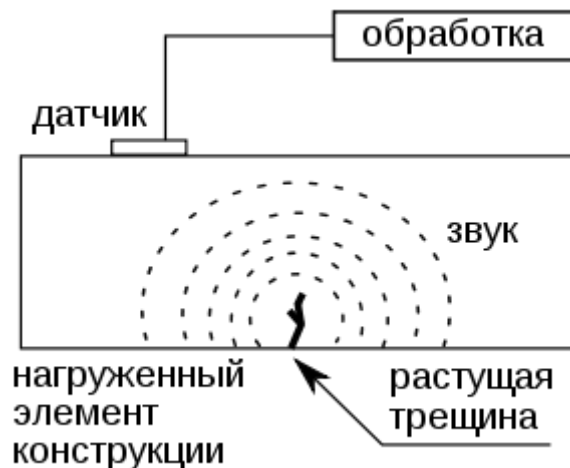


Рис. 1. Принцип диагностики трещин с помощью акустической эмиссии

Растущий интерес к разработке нетрадиционных месторождений углеводородов только повышает важность такого рода исследований. Мониторинг акустической эмиссии образцов под нагрузкой позволяет оценить параметры образовавшихся трещин. Проведение физического моделирования разрушения образца под нагрузкой или при гидроразрыве пласта необходимо не только для получения механических параметров породы, но и для понимания процесса образования и распространения трещин в образце.

В разработке месторождений высоковязкой нефти со слабосцементированными коллекторами, геомеханическое моделирование имеет важное значение для оптимизации процесса добычи и минимизации

негативных эффектов. Среди этих эффектов могут быть образование кинжальных прорывов, осыпание ствола скважины, изменение фильтрационных свойств и другие. В слабосцементированных коллекторах, которые характеризуются пониженными прочностными свойствами, изучение этих процессов особенно важно.

Геомеханическое моделирование позволяет оценить поведение горной породы в процессе добычи и предсказать возможные негативные последствия. Оно помогает определить оптимальные параметры добычи, учитывая свойства горной породы и условия скважин. Это позволяет уменьшить вероятность образования кинжальных прорывов, предотвратить осыпание ствола скважины и снизить риск изменения фильтрационных свойств. Прогнозирование образования зон разрушения пород вследствие ослабления их свойств позволит значительно расширить область применения геомеханики для проектирования разработки объектов, в первую очередь представленных слабосцементированными породами.

Однако, в настоящее время существующие методики и нормативные документы для изучения свойств горных пород не учитывают влияние механических и химических эффектов на изменение фильтрационно-емкостных и физико-механических свойств пород-коллекторов в достаточной мере. Изучение физико-химического взаимодействия сменяющихся жидкостей с породой производится в условиях, которые не учитывают влияние переменных эффективных напряжений, а также без адекватной привязки к механическим свойствам образцов. Изучение деформационных и прочностных свойств пород производится без учета физико-химического взаимодействия фильтрующихся жидкостей с породами.

Поэтому для оценки влияния механико-химических явлений на фильтрационно-емкостные свойства и физико-механические свойства пород-коллекторов в процессе разработки месторождений нефти и газа необходимо проведение их изучения в лабораторных условиях с последующим переходом на

геомеханическое моделирование. Такой подход позволит получить более точные данные и более точно оценить риски

Основная идея работы заключается в комплексном исследовании лабораторных тестов и геомеханического моделирования.

**Цель:** Определение оптимальных параметров эксплуатации скважины при изменении типа насыщающего флюида на основе проведения специализированных лабораторных исследований керна и геомеханического моделирования

**Задачи:**

- изучить влияние типа насыщающего флюида (нефть, модель пластовой воды, полимер-полиакриламид) на упруго-прочностные свойства схожих по литологий и ФЕС горных пород путем проведения лабораторных исследований на керне;
- на основе геомеханического моделирования определить оптимальные режимы эксплуатации скважины при заданных геолого-технических условиях с учетом риска пескопроявления;
- оценить воздействие смены насыщающего флюида на определение предельно допустимой депрессии слабоконсолидированной горной породы.

Описанные задачи по прогнозированию устойчивости ствола скважины и сохранению целостности являются актуальными и важными в настоящее время. Они особенно важны в свете увеличивающегося интереса к добыче углеводородных ресурсов и необходимости обеспечения безопасности при эксплуатации скважин. Кроме того, риск выноса твердой фазы также является актуальной проблемой в процессе эксплуатации скважин, так как это может привести к серьезным последствиям для окружающей среды. Поэтому в настоящее время исследования в области прогнозирования устойчивости ствола скважин, сохранения целостности и управления рисками выноса твердой фазы являются актуальными и получают широкую поддержку научных и технических сообществ.



## 1.1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Изучение деформационных свойств пористых сред - это важное направление в научном исследовании, которое развивалось параллельно с теорией фильтрации в пористых средах. Статья [Brandt Н. А, 1955] отражает основные этапы развития исследований в этом направлении. В прошлом исследователи предлагали различные модели, состоящие из частиц сферической формы, упруго взаимодействующих между собой [Fait J.,1958]. Однако, практическая проверка этих моделей показала, что они оказываются недостаточными для описания всего разнообразия упругих свойств реальных пористых сред. В дальнейшем, наибольшее распространение получило представление о пористой среде как о сплошной среде с непрерывно распределенными свойствами, которое было подтверждено теоретическими и экспериментальными исследованиями.

Хорошо известно, что вода может значительно снизить прочность и жесткость горных материалов, а также увеличить их деформируемость [Wong LNY, Maruvanchery V, Liu G., 2016]. Текущие исследования показывают, что с увеличением содержания воды прочность горных пород на одноосное сжатие, модуль упругости и предел прочности при растяжении в той или иной степени снижаются, что было бы связано со многими горнотехническими катастрофами, например, оползнями [Iverson RM., 2000], карстовым обвалом [Bai H, Ma D, Chen Z., 2016] и деформацией основания плотины [Wu F, Qi S, Lan H., 2005]. В проектах по разработке горных пород этот эффект весьма важен. В последние годы влияние воды на механические свойства горных пород стало предметом исследований из-за важной практической ценности. Испытания горных пород показывают, что влажность оказывает заметное влияние на их прочностные и деформационные характеристики. Чтобы понять влияние водонасыщенности на механическое поведение различных типов горных пород и интерпретировать лежащие в основе механизмы и различия в чувствительности к воде, исследователями было выполнено большое количество работ.

Значительные усилия по исследованию механических свойств горных пород, подверженных воздействию воды, были в основном сосредоточены на прочности при сжатии [Hawkins AB, McConnell BJ., 1992], прочности на растяжение [Erguler ZA, Ulusay R., 2009] и трехосных испытаниях [Han G., 2003]. Хотя количественно предсказать изменение прочности для определенных типов горных пород трудно, существует общепризнанная точка зрения, согласно которой композитные материалы в некоторой степени теряют прочность в присутствии воды. Хаберфилд и Джонстон [Bazvant ZP, Prat PC., 1988] изучили влияние содержания воды на трещиностойкости синтетической породы и обнаружили, что трещиностойкость снижается с увеличением содержания воды.

Хокинс и Макконнелл [Effects of water content on fracture and mechanical behavior of sandstone with a low clay mineral content, 1988] дополнительно исследовали чувствительность прочности и деформируемости 35 типов британского песчаника к переменному содержанию воды. Они заметили, что песчаники имеют отрицательную экспоненциальную зависимость от содержания воды, также обнаружили, что степень чувствительности к содержанию воды в первую очередь определяется минеральным составом, особенно обилием кварцевых и глинистых минералов, и в меньшей степени структурой горных пород. Далее Эргулер и Улусай [Z.A. Erguler, R. Ulusay, 2008] представили результаты влияния содержания воды глиносодержащих пород на механические свойства пород и показали, что с увеличением содержания воды снижение прочности при одноосном сжатии, модуля упругости и предела прочности при растяжении составляет до 90%, 93% и 90% , что указывает на значительно более высокое воздействие, чем те, которые были обнаружены в предыдущих исследованиях. Они также создали эмпирические модели для оценки чувствительности глинистых пород к воде с использованием коэффициентов, относящихся к физическим свойствам пород, таким как пористость, удельный вес сухого вещества и водопоглощение. Цзян и др. [Application of computerized tomographic scanning to the study of water-induced weakening of mudstone, 2014] обнаружили, что прочность аргиллита уменьшается всего с 45 МПа до 5 МПа



после погружения в воду на один месяц в сухом состоянии. Кроме того, они использовали рентгеновскую дифракцию и сканирующую электронную микроскопию для изучения взаимодействия аргиллита и воды в реальном времени. Цзян и др. пришли к выводу, что процессы разрушения аргиллита, вызванные водой, можно разделить на три стадии: сначала вода проникает в образец породы по естественным каналам; затем вода приводит к растворению карбонатного цемента и объемному набуханию глинистых минералов в результате физических и химических реакций.

Еще Дайк и Доберейнер [Dyke, C.G.; Dobereiner, L., 1991] в 1991 году сообщали, что увеличение содержания воды имеет тенденцию снижать прочность породы. Они предположили, что взаимодействие между водой и силикатными минералами преобразует сильные связи кремний–кислород в более слабые водородные связи, снижая прочность богатых кварцем песчаников, также заметили, что прочность и жесткость песчаников связаны с зернистостью. Ван Экхаут [Van Eeckhout E.M., 1976], который исследовал влияние содержания воды на прочность, перечислил пять процессов потери прочности в сланцах, таких как уменьшение энергии разрушения, уменьшение капиллярного давления, повышение порового давления, уменьшение трения и химическое и коррозионное разрушение.

Достаточно информативная инфографика снижения прочности для различных типов пород представлена на (Рисунок 2) [Water-Weakening Effects on the Mechanical Behavior of Different Rock Types: Phenomena and Mechanisms, 2019]. Очевидно, степень ослабления водой прочности породы сильно зависит от типа породы и, вероятно, отражает большие различия в литологии и текстуре, варьируясь от почти незначительного и в кварците до 90% снижения прочности при одноосном сжатии в сланце.

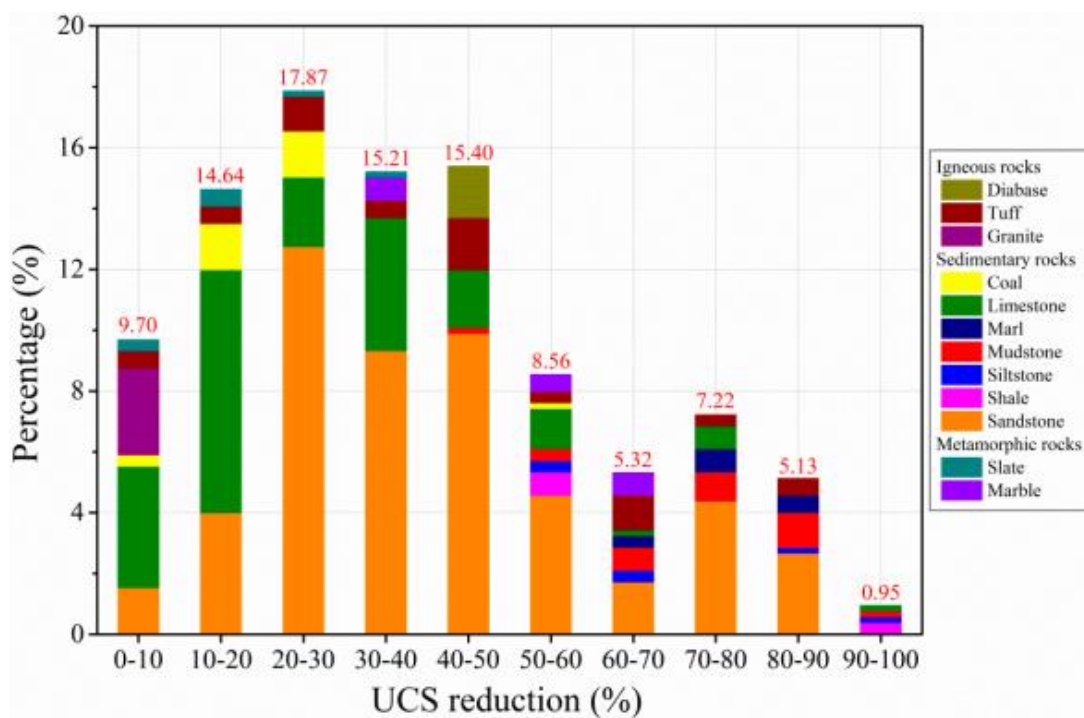


Рис. 2. Процентное распределение снижения прочности на одноосное сжатие (UCS), вызванного водой

Хоукинс и Макконнелл [Hawkins, A.V.; McConnell, V.J., 1992] в своих опытах удостоверились, что вода ослабляет механические параметры трех испытанных пород, такие как прочность на одноосное сжатие (UCS), модуль упругости и критическая деформация. Ими была проведена серия испытаний на одноосное сжатие для трех видов горных пород (песчаника, гранита и мрамора) в высушенном в печи и насыщенном водой состоянии. Песчаник подвергается наибольшему ослаблению, механические свойства гранита демонстрируют относительно незначительное снижение, в то время как мрамор меньше всего подвержен водонасыщению. Ими указано, что совокупные эффекты гидролиза кварца, набухания глинистых минералов, растворения кальцита и уменьшения трения ответственны за заметное падение прочности горных пород. Многие исследователи, такие как Дьюб [Dube AK, Singh B, 1972], сообщили, что снижение прочности из-за присутствия воды пропорционально пористости породы. Лин и др. [Lin ML, Jeng FS, Tsai LS, Huang TH, 2005] на сланцах (а также меле и песчаниках) озвучили, что ряд циклов смачивания растворил некоторые минералы, такие как кальцит и хлорит, в матрице породы, что, в свою очередь, увеличило пористость и, следовательно, снизило прочность. В исследовании 116

американских гранитных пород Кесслер и др. [Kessler D, Insley H, Sligh W, 1940] заметили, что прочность на сжатие влажных образцов была в среднем примерно на 12 % ниже, чем у сухих образцов. Исследование других типов горных пород, включая базальт, гранит и гнейс, проведенное Руисом [Ruiz M.D., 1940], выявило аналогичную потерю прочности породы при насыщении. По сравнению с осадочными породами снижение прочности из-за воды менее выражено в большинстве магматических и метаморфических пород [Hadizadeh J, Law R.D., 1991]. В [Petrophysical and mechanical properties of the Struganik limestone, 1991] изучал влияние воды на известняк. Согласно его исследованию, потеря силы была из-за снижения прочности сцепления, которая, в свою очередь, зависела от свободной поверхностной энергии. Вутукури [Vutukuri V.S., 1974] исследовали влияние воды, а также других жидкостей на прочность известняка на разрыв, которая, как и было обнаружено, экспоненциально уменьшается с увеличением диэлектрической проницаемости и поверхностного натяжения насыщающих жидкостей. Васархели [Va'sa'rhelyi B., 2005] установил линейную зависимость между прочностью на растяжение в сухом состоянии и прочностью на растяжение в насыщенном состоянии миоценового известняка. Он также заметил, что прочность на растяжение и плотность миоценового известняка были экспоненциально связаны.

Поддио и др. [Podio A.L., Gregory A.R., Gray K.E., 1968] провели некоторые исследования динамических упругих свойств сланца Грин-Ривер в сухих и водонасыщенных условиях с использованием ультразвуковых методов. Они обнаружили, что насыщение водой увеличивало модуль сжатия и уменьшало модуль сдвига. [On the Tensile Strength of Granite at High Strain Rates considering the Influence from Preexisting Cracks, 2016] изучали соотношения напряжений и деформаций высушенных в печи и водонасыщенных гранитов с использованием в эксперименте разделенным давлением пришел к выводу, что динамическая прочность гранита на растяжение чувствительна к скорости деформации как в сухих, так и во влажных условиях, особенно для водонасыщенных гранитов, которые более чувствительны к скорости деформации, чем у сухих образцы.

Аналогичные результаты получили более современные исследования [Grgic D, Giot R, Homand F, Giraud A, 2005], что при смене естественного насыщения на воду прочностные свойства слабоконсолидированных отложений были значительно (до 10 раз) ослаблены. Аналогичным образом смена флюида насыщения повлияла на величину модуля Юнга. Ван и др. [Estimation of Influence of Geomechanical Effects on Change of Formation Reservoir Properties In Conditions of Slightly Cemented Reservoir, 2010] изучали динамическую прочность песчаника с помощью теста SHPB в условиях сушки и насыщения водой. Они обнаружили, что чувствительность динамической прочности на сжатие водонасыщенного песчаника к скорости деформации больше, чем у высушенного на воздухе песчаника.

Обобщены основные типы взаимосвязей, установленных между различными параметрами, из чего были сделаны следующие выводы:

- Наблюдается отрицательная экспоненциальная и/или отрицательная энергетическая зависимость между прочностью/модулем упругости породы и содержанием воды (степень насыщения, содержание влаги, водопоглощение);
- Наблюдается экспоненциальная и/или степенная зависимость между прочностью и плотностью породы. По мере увеличения плотности породы увеличивается и прочностью;
- Наблюдается отрицательное соотношение сил между UCS и пористость. Это подтверждает причину низкого значения прочности, полученные для пористых пород;
- Наблюдается экспоненциальная зависимость между UCS и поверхностным натяжением и диэлектрической проницаемостью насыщающая жидкость;
- Наблюдается степенная и/или линейная зависимость между прочностью породы и скоростью деформации. Некоторые исследователи заметили, что смачивание образца приводит к изменению режима деформации. Например, прочные разновидности песчаников демонстрируют разрушение при

осевом расколе в сухом состоянии, которое переходит в разрушение при сдвиге или комбинацию разрушения при сдвиге и осевого раскола при насыщении;

- В насыщенных песчаниках снижается прочность из-за уменьшения удельной поверхностной энергии, коэффициента трения.

В процессе добычи нефти и газа происходит вынос твердых частиц и пескопроявление, которые являются результатом различных физических процессов в породном массиве, вызванных действием буровых работ и эксплуатации скважин. Исследования в данной области показывают, что увеличение обводненности имеет прямую связь с началом или усилением выноса твердых частиц (например, прорыв фронта нагнетания, подтягивание воды из подошвы и образование конусовидной зоны). Основными механизмами, которые вызывают отделение мелких фракций от основной массы пород при вытеснении не смачивающим флюидом водой для гидрофильных пород, являются некоторые были кратко упомянуты выше :

- При соединении с водой в породе происходят химические процессы и реакции, такие как растворение карбонатов (цемента), гидролиз кварца и разбухание глин. Влияние этих процессов на прочность породы зависит от содержания глинистого материала, а также от степени цементации. Особенно значительное влияние на прочность породы оказывают смектиты;

- Капиллярное давление является важным фактором, влияющим на сцепление частиц пород на микроуровне. С увеличением водонасыщенности пород капиллярное давление, которое удерживает частицы в состоянии сцепления, снижается. Это приводит к уменьшению прочности капиллярных связей и, следовательно, к снижению прочности породы;

- При увеличении уровня насыщенности водой, фазовые проницаемости пород снижаются, что приводит к увеличению локального градиента давлений при фильтрации и дестабилизации порового пространства.

В результате описанных процессов на макроуровне происходит снижение прочности пород и изменение их упругих свойств, таких как модуль Юнга и

коэффициент Пуассона, когда породы насыщаются водой. Данные изменения подтверждаются результатами керновых исследований. Освобождение твердой фазы, происходящее в результате дезинтеграции, обычно ведет к изменению фильтрационно-емкостных свойств пород, увеличению пористости и проницаемости в околоскважинном пространстве, а также снижению значения скин-фактора.

Изучение пескопроявления в нефтегазовых скважинах является актуальной темой для нефтегазовой индустрии, поскольку это может приводить к снижению производительности скважин и повышению затрат на обслуживание и ремонт скважин. Особенно это актуально для слабосцементированных коллекторов, которые более подвержены пескопроявлению. В статье [Sand Control Techniques in Oil and Gas Industry: Review and Comparative Study] авторы обзорно рассматривают различные методы контроля пескопроявления в нефтегазовых скважинах, включая химические и механические методы, а также методы использования различных материалов. Авторы отмечают, что химические методы, такие как применение гелей или полимеров, могут быть эффективными, но они часто требуют значительных затрат и не всегда гарантируют полное управление пескопроявлением. Механические методы, такие как применение гравитационных фильтров или пескозащитных труб, также могут быть эффективными, но они также могут приводить к снижению производительности скважин.

В последние годы геомеханическое моделирование становится все более популярным инструментом для прогнозирования возможных проблем, связанных с пескопроявлением. Рассмотрим несколько статей, посвященных данной теме.

В статье [Geomechanical Modeling for Sand Production Prediction, 2014] авторы обзорно рассматривают различные подходы к геомеханическому моделированию для прогнозирования пескопроявления в скважинах. Они отмечают, что геомеханическое моделирование позволяет учитывать влияние различных факторов на пескопроявление, таких как свойства грунта,

напряженное состояние в скважине и условия добычи. Авторы приводят примеры применения геомеханического моделирования для прогнозирования пескопроявления и отмечают, что этот подход может быть полезным для улучшения эффективности добычи и снижения затрат на обслуживание скважин.

В статье [Sand Production Prediction in Oil and Gas Wells Using Geomechanical Modeling and Machine Learning Techniques, 2017] авторы используют геомеханическое моделирование и методы машинного обучения для прогнозирования пескопроявления в нефтегазовых скважинах.

Авторы [Обоснование режимов эксплуатации скважин сеноманской газовой залежи Харампурского месторождения по результатам геомеханического моделирования, 2021] разработали алгоритм, который позволяет прогнозировать возможность преждевременного обводнения, пескопроявления скважин из-за ослабления прочностных свойств и последующего изменения проницаемости. Этот алгоритм способствует улучшению точности гидродинамической модели.

На этапах бурения и заканчивания главными задачами являются прогнозирование устойчивости ствола скважины в процессе строительства и сохранения целостности в процессе ее эксплуатации. Главная причина неустойчивости ствола скважины связана с неправильно выбранной плотностью бурового раствора и профилем скважины. Слишком малая плотностью бурового раствора может привести к сдвиговому разрушению, слишком большая – к разрушению при растяжении вокруг ствола скважины. Эксперименты, проведенные Карманским [Карманский А.Т., 2010], были направлены на изучение влияния реологии буровых растворов на упрочнение пород. В результате экспериментов было показано, что использование растворов на углеводородной основе приводит к значительному упрочнению пород. Однако, следует отметить, что такие эксперименты не были систематизированы, и количественные характеристики полученных результатов сложно выделить.



## 1.2 АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ

Под воздействием внешней нагрузки микротрещины и другие деформации в горных породах постепенно расширяются, что приводит к макродеформации. Во время этого процесса происходит акустическая эмиссия. Сигналы акустической эмиссии содержат обширную информацию о разрушении горных пород. Энергетические характеристики акустической эмиссии соотносятся с режимом слияния трещин, который может эффективно характеризовать образование и развитие трещин и разрушение породы [W. Jiong, Z. Wancheng, and G. Kai, 2020].

Метод анализа сигналов акустической эмиссии в основном включает способы анализа параметров временных рядов и способы анализа формы волны. Метод анализа параметров является наиболее широко используемым методом для инвертирования напряженного состояния массива горных пород путем подсчета, энергии и других изменяющихся во времени параметров. Анализ формы сигнала в основном использует быстрое преобразование Фурье (БПФ), преобразует сигналы из временной области в частотную и выявляет характеристики эволюции трещиноватости горных пород через распределение в частотной области [Přikryl, R.; Lokajčec, T.; Li, C.; Rudajev, V, 2003]. В качестве метода неразрушающего контроля ультразвуковой контроль может быть использован для установки оптимальной частоты источника ультразвука и амплитуды импульса источника, на которую меньше влияет шум окружающей среды, по сравнению с единственной функцией, заключающейся в том, что акустическая эмиссия может принимать только упругие волны [Оглезнева Л.А., Калиниченко А.Н.]. С помощью динамических законов изменения во времени параметров мультифрактального спектра макро-микромеханизма разрушения горных пород может быть глубоко изучен, и дополнительные параметры могут быть предоставлены для мониторинга стабильности массива горных пород в инженерной практике [Comparative study on fracture characteristics of coal and rock samples based on acoustic emission technology, 2020]. В настоящее время

исследования разрушения горных пород, основанные на ультразвуковых волнах, в основном сосредоточены на анализе характеристик акустического спектра горных пород с одним направлением и одной формой волны, но не содержат анализа характеристик акустического спектра горных пород с несколькими направлениями и формами волны, чтобы выбрать оптимальные характеристики акустического спектра для определения степени повреждения. повреждение скалы. Основываясь на самостоятельно разработанной технологии малогабаритного ультразвукового мониторинга с сухой связью, [W. Jiong, Z. Wancheng, and G. Kai, 2020] были исследованы акустические спектральные характеристики всего процесса эволюции повреждений горных пород в нескольких направлениях и многоволновой форме. Типичная система акустического мониторинга и механического нагружения показана на рисунок 3.

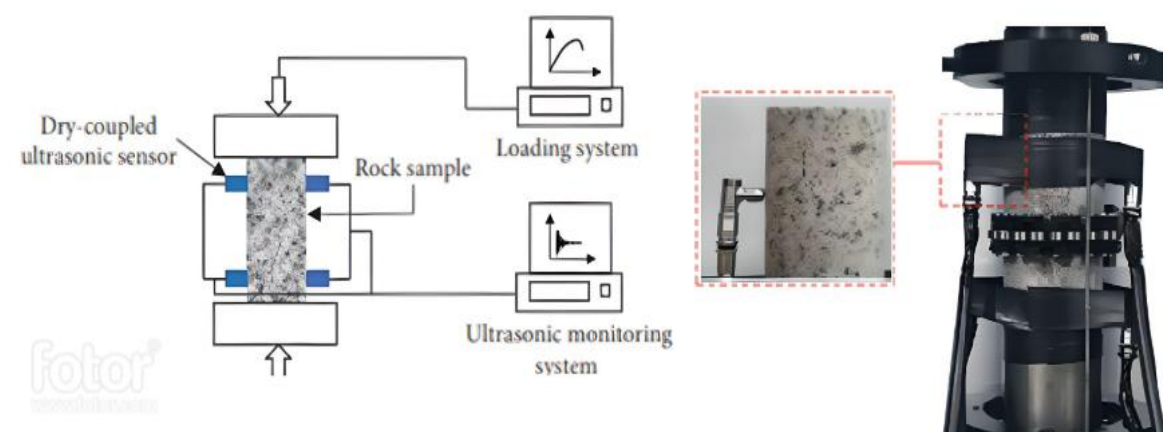


Рис. 3. Схема системы механической нагрузки и ультразвукового контроля

В [Z. Dongxu, 2017] результаты показывают, что вода снижает прочность и повышает пластичность. Насыщенные образцы выделяют меньше упругой энергии и более слабые сигналы акустической эмиссии в течение всего процесса разрушения. По сравнению с сухими образцами частоты акустической эмиссии насыщенных образцов на ранней стадии нагружения распределены в более низкой частотной области. Кроме того, насыщенные образцы испускают менее сложные сигналы акустической эмиссии, в которых преобладают мелкомасштабные сигналы с более слабыми мультифрактальными характеристиками. Отталкиваясь от некоторых перечисленных статей. После

анализа было указано, что это может быть связано с тем, что вода делает породу склонной к межзеренному разрушению, а не к трансзернистому разрушению. Водная смазка также может уменьшить амплитуду сигналов в диапазоне средних частот, создаваемых трением на поверхности разрушения. Он так же получил аналогичные результаты с помощью другого подхода о всестороннем представлении влияния содержания воды на квазистатическое разрушение песчаника с акустической эмиссией характеристики породы с различным содержанием воды. Совокупное количество акустической эмиссии влажных образцов в испытаниях образцы песчаника подвергались более пластичному разрушению и выделяли меньше упругой энергии из-за эффекта размягчения воды. Эволюционные характеристики микросейсмических сигналов дают некоторые возможные критерии для определения состояния влажности горных пород. Подобно сигналам акустической эмиссии, микросейсмические сигналы можно отслеживать в лабораторных исследованиях, чтобы помочь проанализировать механизм разрушения горных пород.

Мультифрактальные параметры могут предоставить более подробную информацию о предвестниках разрушения горных пород. Это имеет большое значение для стабильности водоносного трещиноватого массива горных пород и его мониторинга, а также способствует безопасной эксплуатации инженерных сооружений.

Предложенный метод мониторинга [Structural Health Monitoring on Ships Using Acoustic Emission Testing, 2014] АЕТ был оценен и оказался многообещающим инструментом для обнаружения роста трещин и коррозионной активности. Предполагают, что метод акустической эмиссии АЕТ потенциально может быть применена для мониторинга состояния конструкций, находящихся в эксплуатации, что приводит как к повышению безопасности, так и к экономическим выгодам, получаемым от более эффективных обследований, инспекций и технического обслуживания. Кроме того сочетание соответствующих преимуществ сигналов АЭ и микросейсмической эмиссии и их использование может способствовать более

полному пониманию их внутренних механизмов разрушения и, следовательно, помочь обеспечить более точные прогнозы разрушения горных пород.

В настоящее время исследования разрушения горных пород, основанные на ультразвуковых волнах, в основном сосредоточены на анализе характеристик акустического спектра горных пород с одним направлением и одной формой волны, но не содержат анализа характеристик акустического спектра горных пород с несколькими направлениями и формами волны, чтобы выбрать оптимальные характеристики акустического спектра для определения степени повреждения.

Гидроразрыв пласта при бурении скважины не является столь редким событием. [Acoustic emission characteristics in hydraulic fracturing of stratified rocks, 2020] сосредоточились на анализе акустической эмиссии при гидроразрыве пласта и обнаружили явление многочастотного отклика акустической эмиссии, и предложили индекс многочастотного отклика для указания места образования макрогидравлической трещины в слоистых породах. В дополнение [S. Stanchits, and G. Dresen, 2010] показали, что микроструктурный анализ образцов с трещинами показывает отличное соответствие между расположением гипоцентров акустической эмиссии и разломами или положениями полос уплотнения, подтверждая, что расширенный анализ акустической эмиссии является мощным инструментом для процесса исследования разрушения горных пород. [Рамазанов Р.М. 2022] Рамазанов описал перспективный способ определения эффективного объема дренирования скважины при проведении гидроразрыва пласта, а именно мониторинг акустической эмиссии и ультразвукового пропускания образцов под нагрузкой позволяет оценить параметры образовавшихся трещин и разделить на сухие и влажные, где сухие трещины образованы на некотором удалении от основной трещины ГРП и не дают притока.

Итого отмечено, что анализ современных геодинамических процессов показал, что, несмотря на большое количество проведенных ранее исследований, остается слабо изученным влияние различных факторов (скорости

деформирования, интенсивности изменения напряженного состояния, влагонасыщенности) на формирование изменения свойств пород при испытаниях. Исследования проводились по разным методикам, что не позволяет провести обобщение имеющихся экспериментальных данных. Результаты экспериментальных исследований получены при узком диапазоне скоростей деформирования и видах напряженного состояния. Вопросу выяснения физической природы снижения прочности пород при влагонасыщении и смене насыщающего флюида посвящено незначительное количество работ и, в основном, эти работы касаются только глинистых пород. Для полного учета фактора времени в технических расчетах необходимо иметь данные о поведении горных пород в широком диапазоне скоростей деформирования и условий нагружения.

### 1.3 РАСЧЕТ ПЕСКОПРОЯВЛЕНИЯ

Модели, обсуждаемые в статьях [New model of predicting the rate of sand production, 2002] и [The relative importance of drawdown and depletion in sanding wells: models compared with data from the staffjord field MM, 2006], связаны с образованием песка в скважинах. Образование песка может происходить, когда песчаные зерна из пласта выносятся вместе с углеводородами, что может вызвать повреждение оборудования скважины и снижение производительности. Модели направлены на прогнозирование образования песка и определение относительной важности факторов, которые способствуют этому процессу.

Nettema et al. сосредотачиваются на относительной важности двух факторов: понижение давления и истощение. Авторы используют одномерную численную модель для изучения влияния понижения давления и истощения на образование песка в газовых скважинах. Модель позволяет им сравнивать относительную важность двух факторов и исследовать, как они взаимодействуют.

Weingarten и Perkins, с другой стороны, представляют методологию для прогнозирования образования песка в газовых скважинах на основе базы данных

кейс-стадий из Мексиканского залива. Они используют статистический анализ для выявления ключевых параметров, которые влияют на образование песка, и для разработки прогностической модели. Авторы также обсуждают ограничения модели и предлагают направления для будущих исследований.



Рис. 4. Карта прогноза выноса твердой фазы в зависимости от «забойное давление-пластовое давление» для модели Вейнгартена и Перкинса

В целом, модели, представленные в этих статьях, направлены на улучшение понимания процесса образования песка в скважинах и на предоставление инструментов для прогнозирования и управления этим процессом.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Геомеханическое моделирование является важным инструментом в изучении поведения горных пород и решении многих задач в области геологии и нефтегазовой промышленности. Основным источником данных для геомеханического моделирования являются результаты лабораторных тестов на образцах горных пород, полученных в лаборатории. Однако, с помощью специализированных геомеханических исследований на образцах керна можно получить точные данные, такие как определение коэффициента пороупругости (константы Био), оценка изменения прочностных свойств при смене насыщающего флюида, определение предельно допустимой депрессии для предотвращения пескопроявлений. Современные геомеханические исследования на образцах керна позволяют получать более точные данные и учитывать различные факторы, которые могут повлиять на поведение горных пород, что в свою очередь способствует более точному и эффективному решению задач в области геомеханики.

Для тестирования слабokonсолидированного керна нужно уделить особое внимание его подготовке и сохранности до проведения экспериментов. Необходимо избежать нарушения естественных структурных связей породы, чтобы не повлиять на результаты исследований.

При выбуривании образцов из слабokonсолидированных горных пород существует вероятность частичного или полного разрушения. Поэтому изготовление таких образцов проводится с применением технологии глубокой заморозки керна. Так же для более точных результатов механических тестов рекомендуется проводить предварительную компьютерную томографию керна перед выбуриванием образцов. Результаты томографии помогут определить места взятия образцов, а именно этот процесс позволяет избежать выбор образцов с внутренними трещинами и неоднородностями, которые могут повлиять на результаты лабораторных исследований.



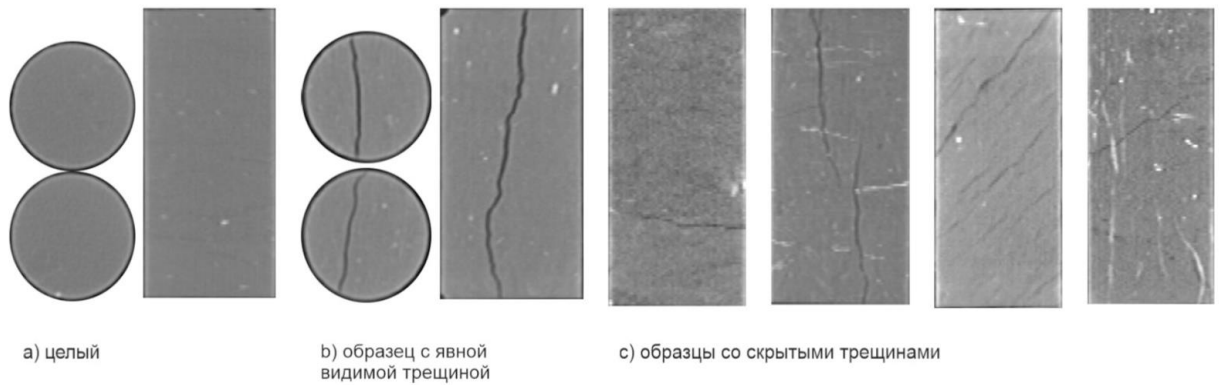


Рис. 5. Пример компьютерной томографии керна

В комплексе исследований горных пород часто применяется тестирование на различные виды механического напряжения. Одним из таких тестов является тест на одноосное сжатие горной породы.

Тест на одноосное сжатие горной породы - это один из основных методов механического тестирования горных пород. Этот тест заключается в том, что образец породы помещается между двумя плоскостями, одна из которых статична, а другая движется в направлении образца. При этом на образец действует сжимающая нагрузка вдоль одной оси. Результаты этого теста используются для определения механических свойств горных пород.



Рис. 6. Схематическая иллюстрация определения прочности керна при одноосном сжатии

Тест на одноосное сжатие является одним из наиболее распространенных и широко используемых методов механического тестирования горных пород. Обычно тест на одноосное сжатие проводят параллельно с другими методами, такими как тест на полем цилиндре, чтобы получить более полное представление о механических свойствах горных пород.

Основная цель тестов на полем цилиндре заключается в оценке предельно-допустимой депрессии для прогноза предотвращения проявления песка в нефтегазовой скважине. Изменение депрессии в слабоцементированных коллекторах может приводить к разрушению зоны призабойной зоны пласта и выносу песка на поверхность. Это может привести к тем или иным отказам оборудования скважины.



Рис. 7. Установка «SHIMADZU AG-300 kN» оборудована кернодержателем с гидравлическим механизмом создания обжимного давления, таким образом создание осевой нагрузки меньше обжимного давления невозможно

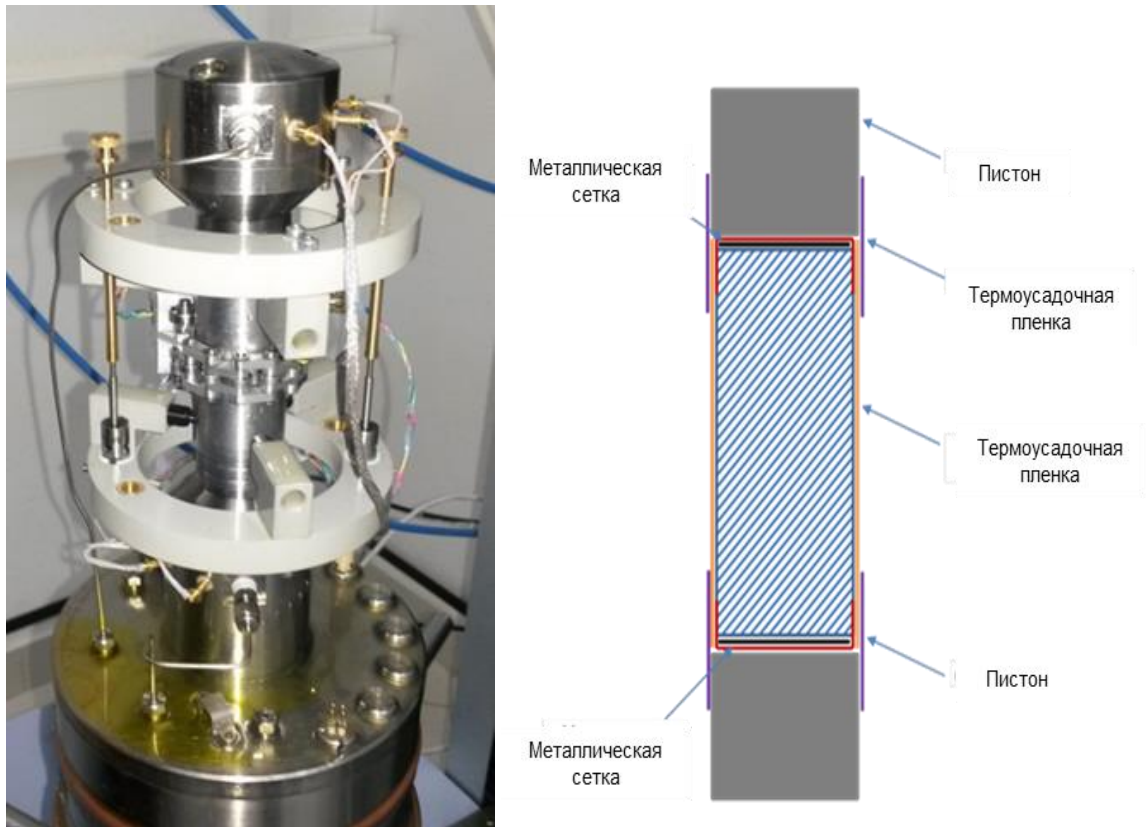


Рис. 8. Кернодержатель. С целью корректного монтажа датчиков деформации рекомендуется использовать образцы с соотношением длины к диаметру 2:1

В процессе изготовления образца цилиндрической формы диаметром 30 мм и высотой 60 мм для теста на полем цилиндре необходимо создать отверстие в центре образца диаметром 10 мм. В процессе эксперимента на образец устанавливаются датчики осевых и радиальных деформаций. Образец помещается в кернодержатель и подвергается пластовым условиям, включая температуру, поровое давление и обжимное давление. Поровый флюид фильтруется через образец в 7 объемов образца, что позволяет насытить его флюидом и вытеснить воздух. Затем образец подвергается испытанию на обжимное давление, которое увеличивается до момента схлопывания отверстия в образце, которое фиксируется датчиками деформаций и изменения порового давления. Результаты испытаний отображаются на диаграмме, на которой показывается объемная деформация, поровое давление и объем вышедшего флюида в процессе испытаний. На этой диаграмме отмечаются две точки: начало пластических деформаций и момент разрушения образца. Интервал между начальным давлением и началом пластических деформаций считается

безопасной депрессией, а интервал между точкой разрушения и начальной нагрузкой - предельной.



Рис. 9. Образец керна после теста на полом цилиндре

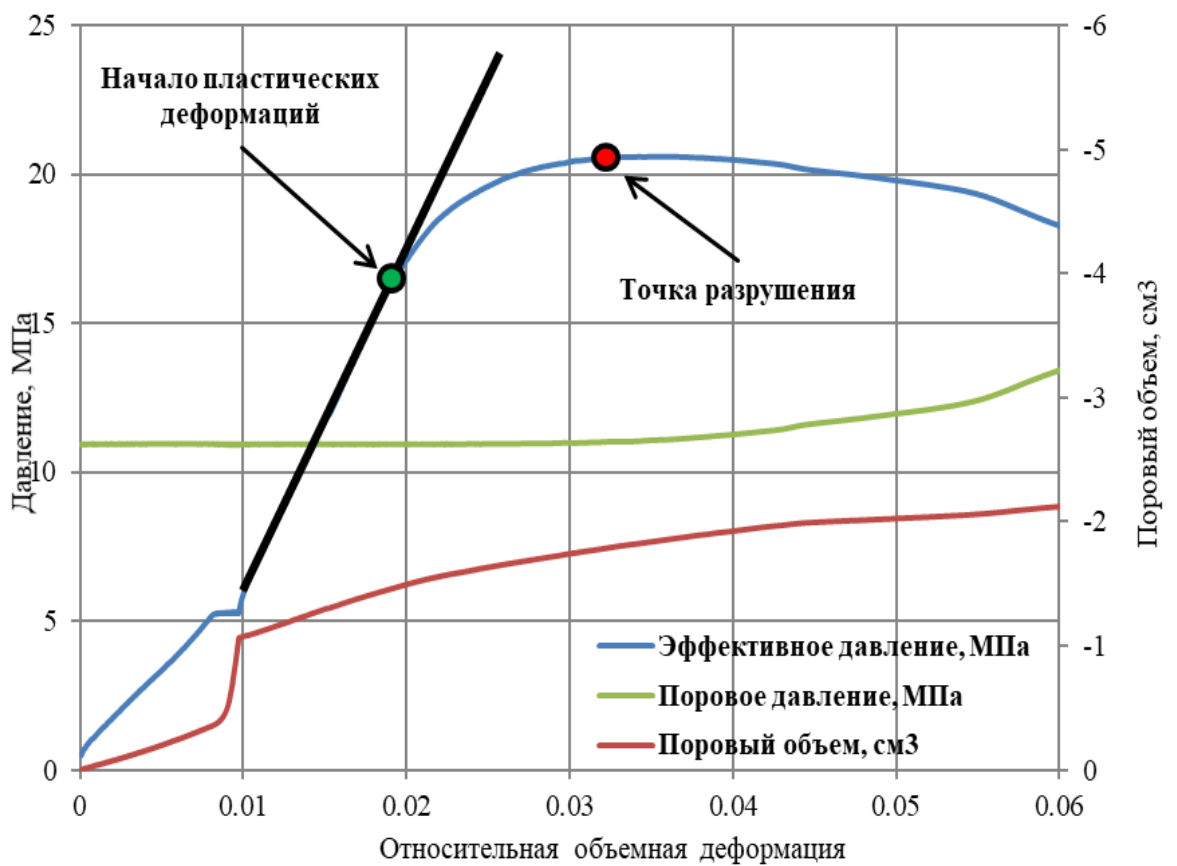


Рис. 10. Характерное поведение кривой давления при проведении лабораторного теста на толстостенном цилиндре

Для сравнения прочностных свойств образцы были объединены в группы, каждая из которых содержала от 2 до 3 образцов-дублеров, отобранных с одной и той же глубины и имеющих сходные фильтрационно-емкостные свойства. Каждая группа образцов была насыщена одним и тем же веществом - нефтью, полимером или водой. Это позволило проводить более точные и надежные сравнительные анализы между группами и определить особенности прочностных свойств каждой из них. В качестве полимера использовался полимер на основе полиакриламида, воды использовалась модель пластовой воды.

## 2.1 КРАТКАЯ ЛИТОЛОГО-ФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

В геологическом отношении Тагульское месторождение расположено в Большехетской впадине и относится к Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. Данное месторождение обладает уникальными особенностями, среди которых можно выделить слабоконсолидированные коллекторы, содержащие высоковязкую нефть.

Общий состав керна Долганской свиты, включая целевой пласт Дл-3, состоит из песчаников с широким диапазоном зернистости от тонкозернистых до мелко-среднезернистых, с наличием прослоев алевролитов крупно- и мелкозернистых пород на некоторых участках разреза скважины. Песчаники местами тонко переслаиваются с алевролитами. Карбонизация пород не наблюдается, а мощность прослоев ограничена их толщиной в 10 см. В целом, за исключением карбонатизированных разностей, изученные породы слабо сцементированы.

## 2.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.2.1 ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ

Для определения пределов прочности при одноосном сжатии были использованы образцы средне-мелкозернистых и тонко-мелкозернистых песчаников с карбонатным цементом и мелко-крупнозернистых алевролитов.

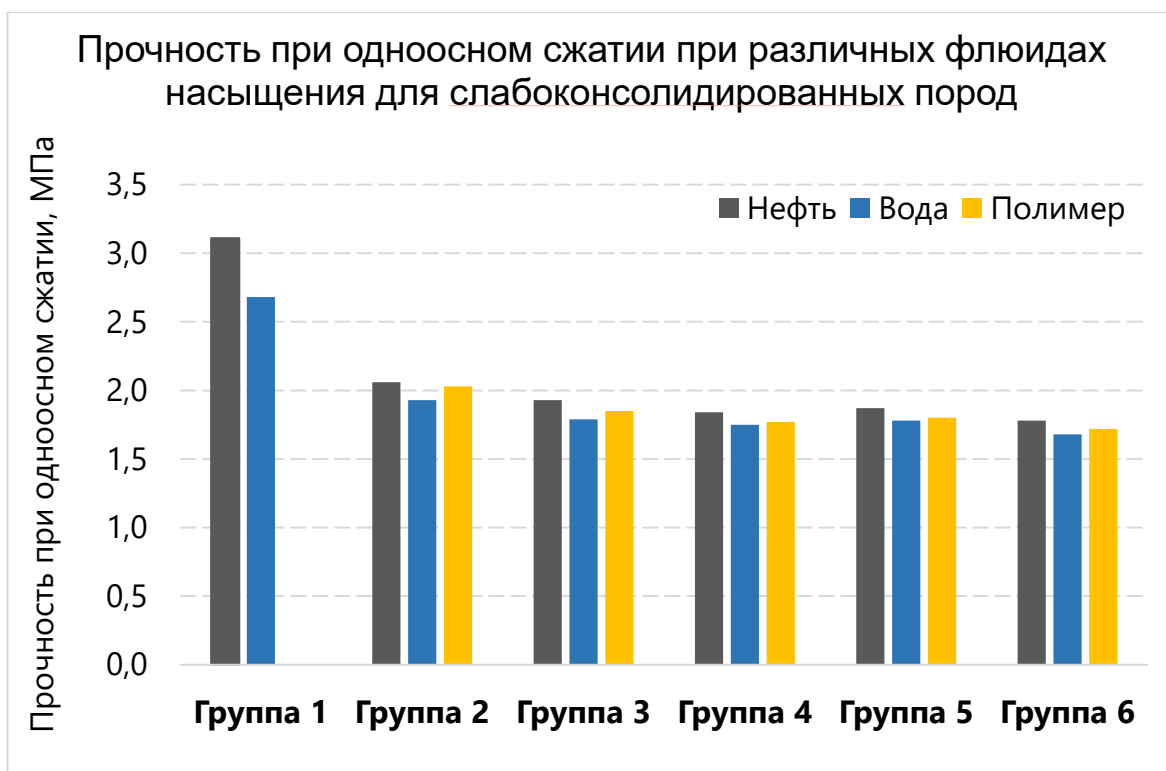


График 1. Прочность при одноосном сжатии при различных флюидах насыщения для слабоконсолидированных пород

Из представленного на графике 1 исследования видно, что прочность слабоконсолидированных горных пород при одноосном сжатии оказывает слабое влияние флюид насыщения. При насыщении водой, прочность уменьшается в среднем на 9%, а при насыщении полимерами - на 3%. Однако максимальные пределы прочности отмечаются у образцов песчаника с карбонатным цементом при донасыщении различными флюидами.

### 2.2.2 ОДНООСНОЕ РАСТЯЖЕНИЕ

На основе коллекции из 9 образцов, включая 4 образца донасыщенных нефтью, 3 образца донасыщенных моделью пластовой воды и 2 образца донасыщенных полимером, было выполнено определение предела прочности при одноосном растяжении. Литологически образцы были представлены тонкозернистыми алевритовыми песчаниками и средне-мелкозернистыми песчаниками.



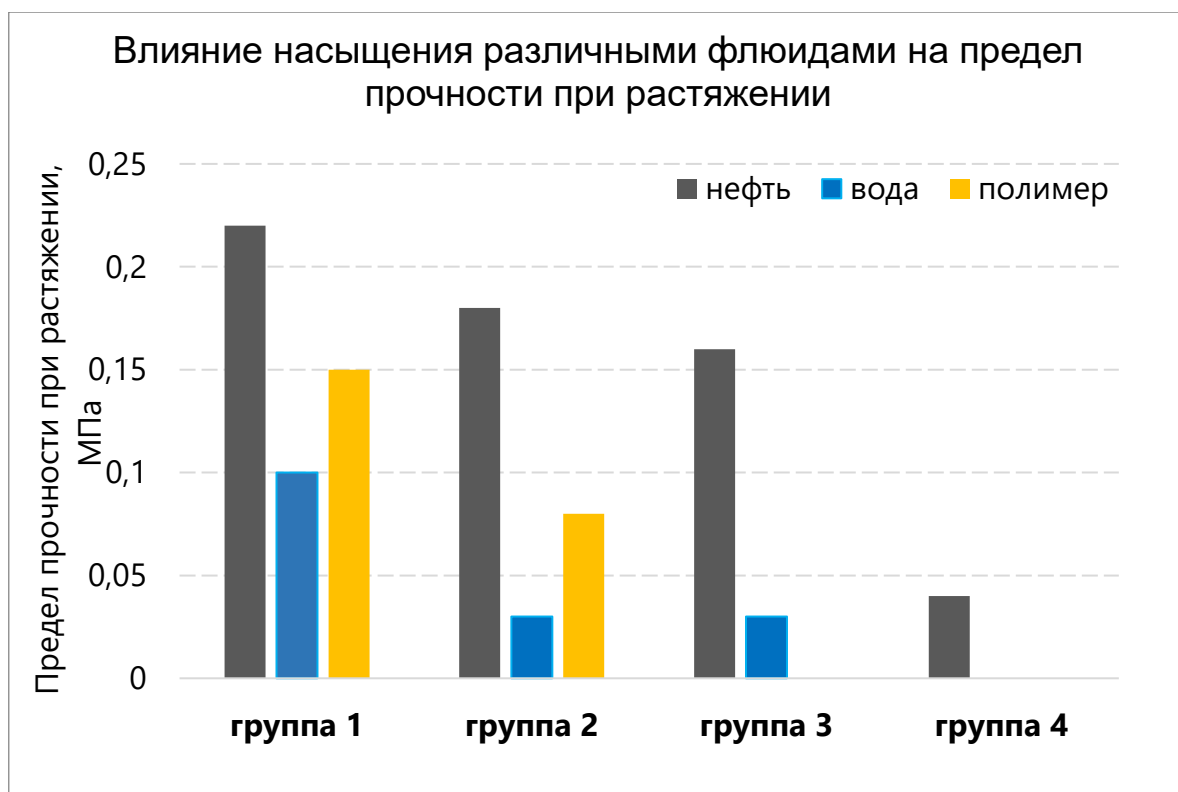


График 2. Влияние насыщения различными флюидами на предел прочности при растяжении

График 2 показал, что образцы керн, донасыщенные водой, имеют наименьшие значения предела прочности. Для группы образцов 1 и 2 предел прочности при донасыщении образцов был ниже, чем на 54-84 % по сравнению с образцами, донасыщенными нефтью, и на 33-61 % по сравнению с образцами, донасыщенными полимером. Для группы образцов 3 пределы прочности были близки.

### 2.2.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПОРОД ПРИ ОБЪЕМНОМ СЖАТИИ МЕТОДОМ ТОЛСТОСТЕННОГО ЦИЛИНДРА В УСЛОВИЯХ МОДЕЛИРУЮЩИХ ПЛАСТОВЫЕ

Ниже представлены результаты исследования деформационно-прочностных свойств пород при объемном сжатии с использованием метода толстостенного цилиндра в условиях, имитирующих пластовые. Исследование проводилось на коллекции из 20 образцов, включая 9 образцов, на которых определялось влияние насыщения нефтью, 6 образцов, на которых определялось влияние насыщения водой, и 5 образцов, на которых определялось влияние



насыщения полимером. Литологические образцы были представлены различными типами песчаников, включая среднемелкозернистые алевристические и алевритовые песчаники, тонко-мелкозернистые алевристические и алевритовые песчаники, тонкозернистые песчаники и тонко-мелкозернистые песчаники с карбонатным цементом.

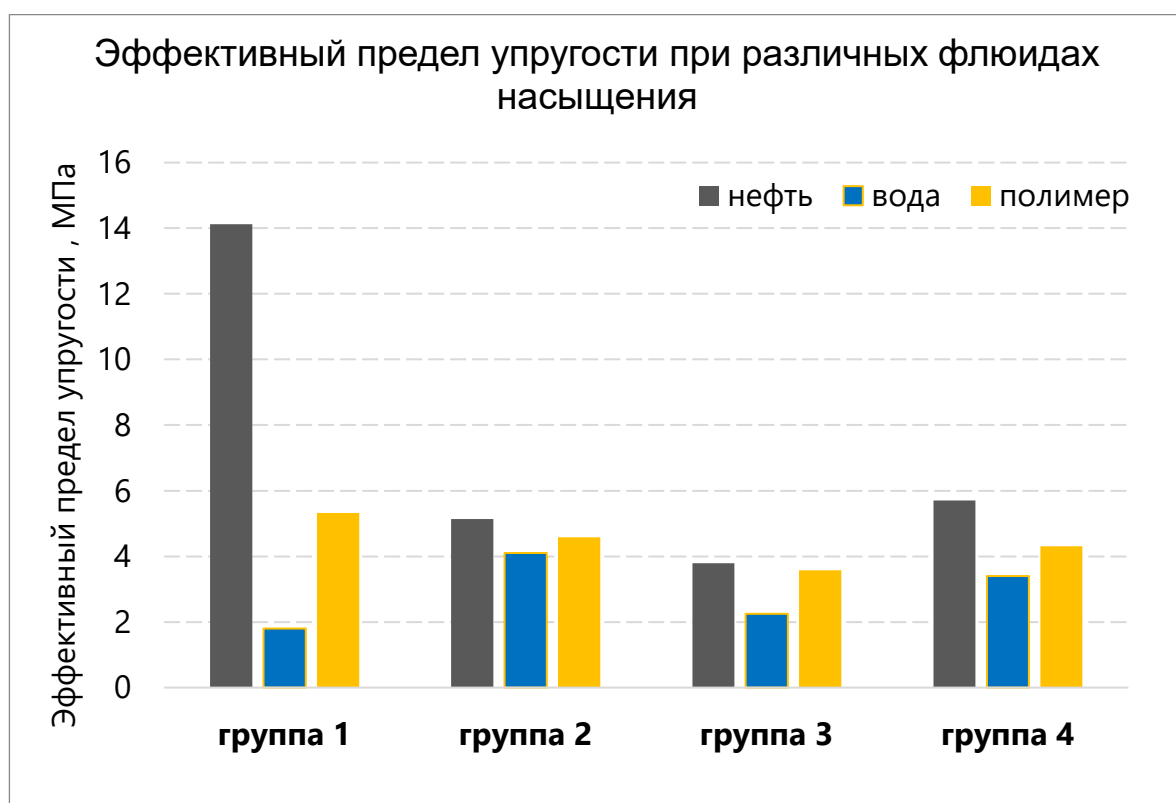


График 3. Эффективный предел упругости при различных флюидах насыщения

Коллекция образцов была разделена на четыре группы, две из которых представляли тонко-мелкозернистые алевристические песчаники, а две - среднемелкозернистые песчаники. График, приведенный на рисунке 3, показал, что эффективный предел упругости образцов до насыщения моделями простой воды характеризуется минимальными значениями. Предел упругости для тонко-мелкозернистых песчаников был наиболее низким при насыщении образцов водой (на 12-69 % ниже, чем при насыщении полимером, и на 22-33 % ниже, чем при насыщении нефтью). Предел упругости для среднемелкозернистых песчаников был также наиболее низким при насыщении образцов водой (на 20-

29 % ниже, чем при насыщении полимером, и на 33-41 % ниже, чем при насыщении нефтью).

В целом, эффективный предел упругости всей коллекции образцов при насыщении нефтью составил в среднем 6,16 МПа, при насыщении полимером - 4,45 МПа, а при насыщении водой - 3,6 МПа.

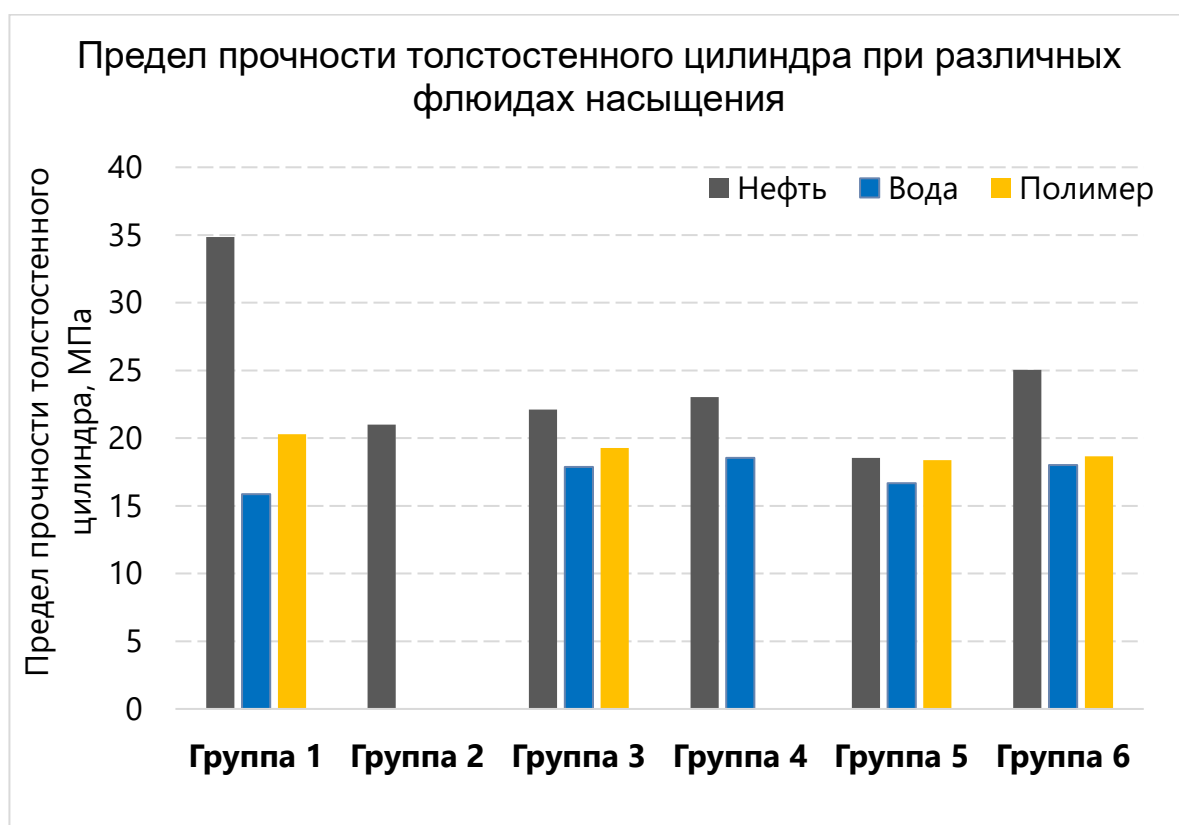


График 4. Предел прочности толстостенного цилиндра при различных флюидах насыщения

Аналогичная динамика наблюдается по результатам анализа прочности толстостенных цилиндров – для насыщенной нефтью горных пород чем больше предел упругости/прочности горных пород, тем большее влияние оказывает полимер/вода график 4. Для предела упругости изменение при насыщении водой составило 6-46% (среднее – 18%), полимером – 1-32% (среднее – 11%), для предела прочности – 10-55% (среднее – 26%) при насыщении водой, 1-42% (среднее – 20%) при насыщении полимером.

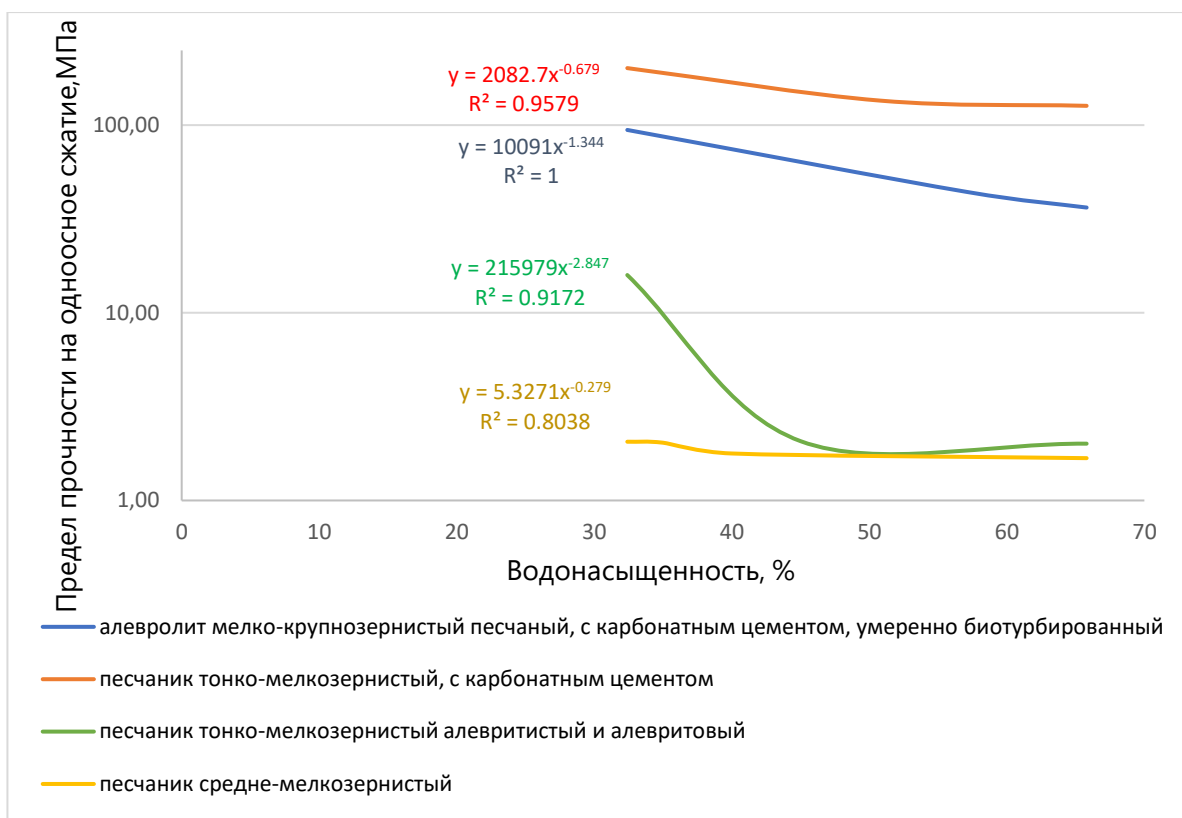


Рис. 11. Зависимость прочности при одноосном сжатии от водонасыщенности

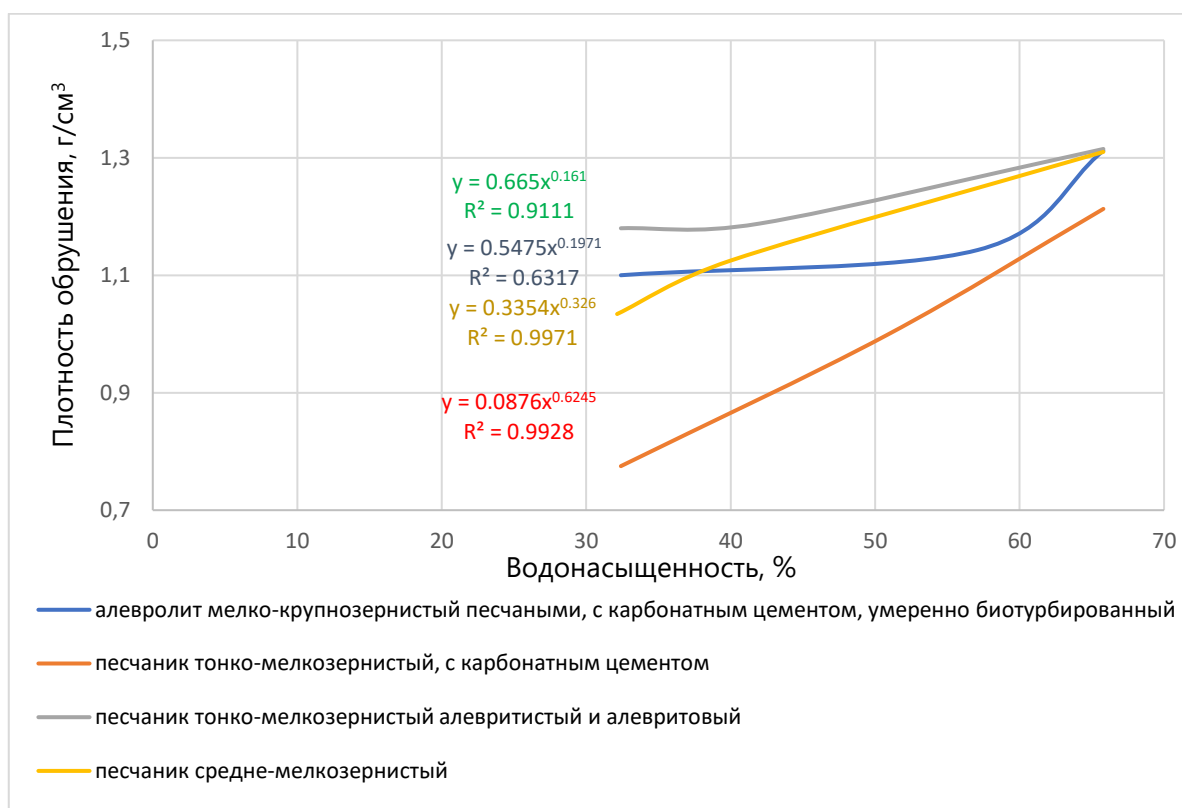


Рис. 11. Зависимость плотности обрушения от водонасыщенности

С ростом водонасыщенности горной породы наблюдается снижение предела прочности, что имеет прямое влияние на градиент обрушения. С увеличением водонасыщенности градиент обрушения возрастает, что означает усиление вероятности обрушения или разрушения горной породы. В контексте инженерных исследований и проектирования, для удобства и сопоставимости результатов, градиент обрушения был переведен в единицы измерения плотности. По мере увеличения водонасыщенности горной породы, следует ожидать прогнозируемого ухудшения ее прочностных свойств.

#### 2.2.4 СТРЕСС-ТЕСТЫ

Целью проведения стресс-тестов (мини-ГРП) являлось измерение давления гидроразрыва, а также давление распространения и закрытия трещины. На рисунке 5 приведен характерный график давления межпакерном пространстве при проведении стресс-теста.

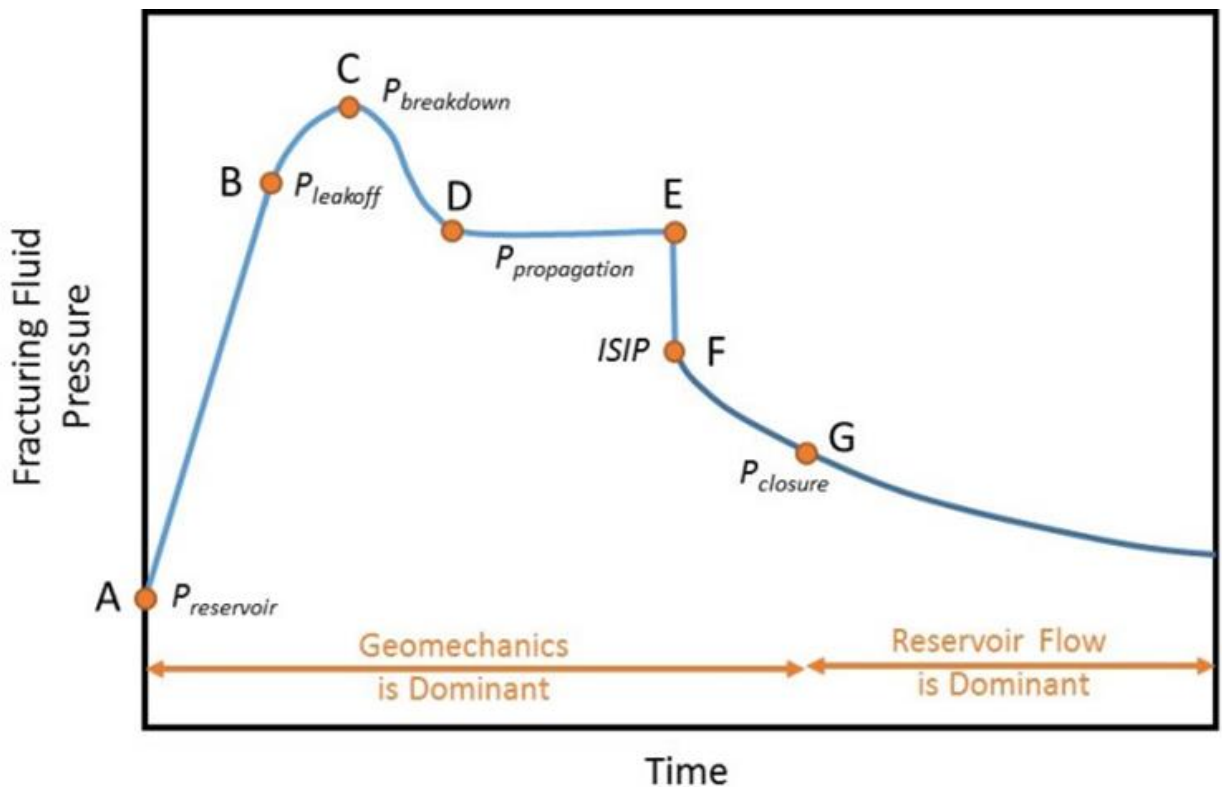


Рис. 11. Характерный график изменения давления при проведении стресс-теста

При этом рисунок один отражает следующий порядок проведения стресстестов:

- гидравлический и инициирование микротрещины в изолированном пакерами интервале путем закачки жидкости из скважины в пласт;
- распространение трещины путем продолжения закачки после инициирования трещины;
- закрытие трещины путем естественного стравливания давления;
- повторное открытие распространения трещины и стравливания давления несколькими циклами.

Подобный характер график изменения давления в той или иной степени наблюдался в ходе всех испытаний где удалось получить гидроразрыв пласта в процессе обработки полученных данных были построены проанализированы различные графики давления в интервалах проведения стресс-тестов проведена количественная оценка давления гидроразрыва а также давлении распространение и закрытие трещин.

Настройка параметров максимального и минимального напряжения в геомеханическом моделировании важна, так как они влияют на реалистичность моделирования и точность результатов. Неправильно настроенные параметры максимального и минимального напряжения могут привести к неточным или нереалистичным результатам моделирования, что может повлиять на принятие решений в инженерных проектах. Поэтому данные стресс-тестов являются важным инструментом для корректной настройки параметров максимального и минимального напряжения в геомеханических моделях, чтобы обеспечить более точные и надежные результаты.

### 3. 1-D ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Геомеханическое 1-D моделирование - это метод, используемый в горнодобывающей и нефтегазовой промышленности, который позволяет оценивать механическое поведение горных пород в ответ на воздействие давления и температуры в заданном направлении. Этот метод используется для предсказания деформаций, напряжений и потенциальных зон обрушений горных пород в месторождении. 1-D моделирование представляет собой упрощенную модель, которая представляет геологическое тело в виде одномерной последовательности горных слоев. Данный подход позволяет быстро и точно определить характеристики горных пород, такие как прочность, упругость и вязкость, и предсказать их поведение при воздействии давления и температуры. Таким образом, геомеханическое 1-D моделирование позволяет оптимизировать процессы бурения, добычи и строительства, уменьшая возможные риски связанные с деформацией и обрушением горных пород.

Важной задачей при разработке месторождений является прогнозирование и контроль пескопроявления. Для снижения рисков возникновения пескопроявления необходимо оценивать безопасную депрессию, то есть минимальное забойное давление, которое не вызовет разрушения горной породы в призабойной зоне пласта и не приведет к перемещению механических примесей в ствол скважины. Эта задача имеет ключевое значение в процессе разработки месторождений и требует постоянного контроля со стороны специалистов.

#### 3.1 ГРАФ ПОСТРОЕНИЯ 1-D ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

1. Определение механических фаций по данным результатов интерпретации геофизических исследований скважин, акустического широкополосного каротажа, керна. В качестве механических фаций для построения 1D модели использованы группы «коллектор», «неколлектор» целевого пласта Дл-3 в соответствии с данными РИГИС. Такой подход позволит

наиболее полно использовать результаты данного этапа при построении возможных 3D/4D геомеханических моделей на следующих этапах работы.

2. Расчет горного давления выполняется по кривой плотности пород с использованием данных гамма-гамма плотностного каротажа и экстраполяции. В случае отсутствия данных плотности от дневной поверхности используется синтезированная кривая гамма-гамма плотностного каротажа. Метод экстраполяции является одним из наиболее используемых методов восстановления плотности. В конкретном случае восстановление плотности производилось путем сшивки кривой плотности с кривой высотного сейсмопрофилирования соседней скважины одного объекта разработки.

$$\sigma_v(Z_{TVD}) = \int_0^{Z_{TVD}} \rho(z) g dz, \quad (1)$$

где  $\rho$ -плотность породы от устья скважины, кг/м<sup>3</sup>,

$g$  -ускорение свободного падения, м<sup>2</sup>/с,

$Z_{TVD}$  – истинная глубина, м.

3. Расчет порового давления выполняется по формуле расчета гидростатического давления:

$$p = \rho_{fl} g Z_{TVD}, \quad (2)$$

где  $\rho_{fl}$ -плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>,

$g$ -ускорение свободного падения, м<sup>2</sup>/с,

$Z_{TVD}$  – истинная глубина, м.



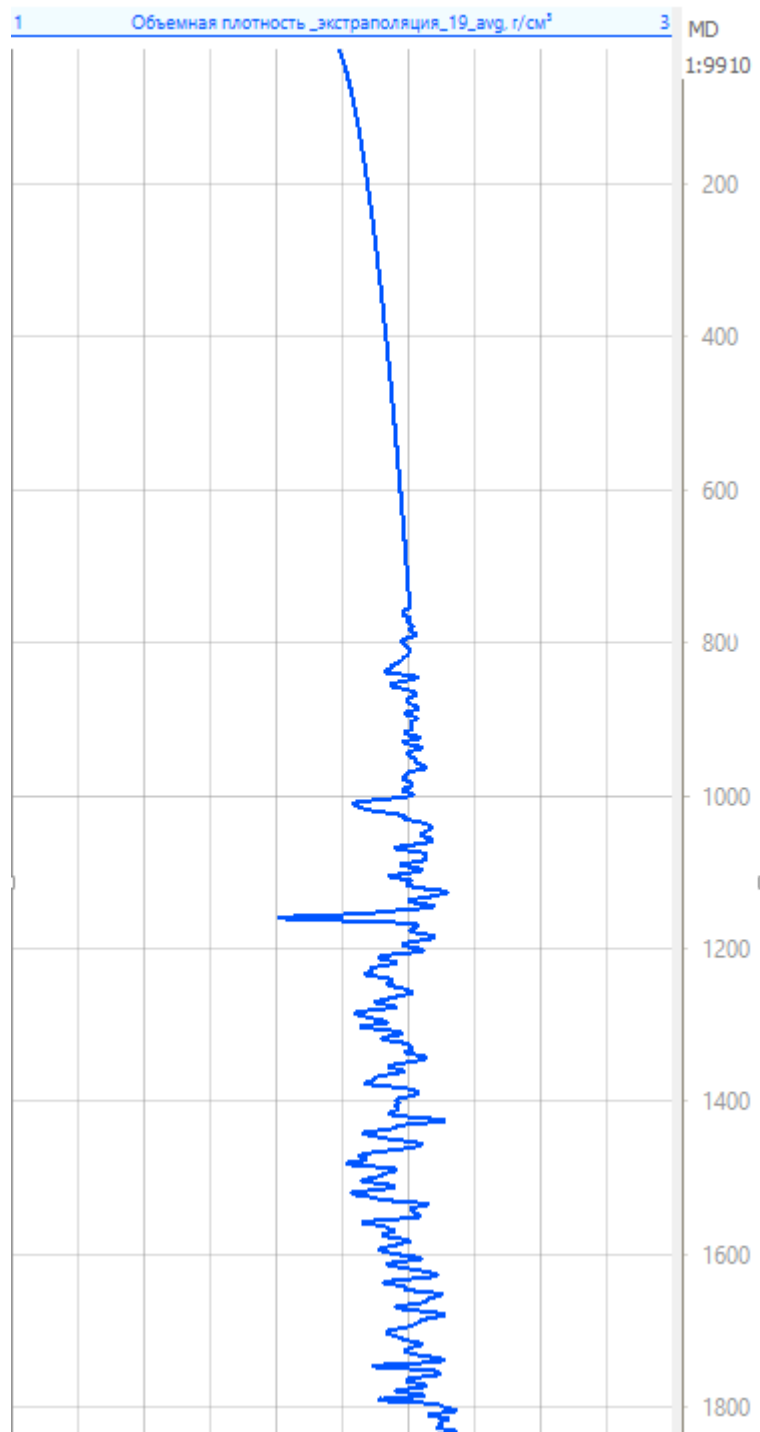


Рис. 12. Кривая объемной плотности горных пород

4. Расчет динамических упругих свойств. К ним относятся динамический модуль Юнга и коэффициент Пуассона. Такие модули характеризуют свойства пород, которые определяют её реакцию на кратковременные импульсные нагрузки, такие, как прохождение акустических

волн. Выполнен расчет непрерывных профилей динамических упругих свойств на основе данных акустического широкополосного и плотностного каротажа.

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

$$\nu_{dyn} = \frac{1}{2(\Delta t_s^2 - 2\Delta t_p^2)}, \quad (4)$$

где  $E_{dyn}$  – модуль Юнга, Па,

$\nu_{dyn}$  – коэффициент Пуассона,

$\Delta t_p$  – интервальное время пробега продольной волны, с/м,

$\Delta t_s$  – интервальное время пробега поперечной волны, с/м,

$\rho$  – объемная плотность пород, кг/м<sup>3</sup>.

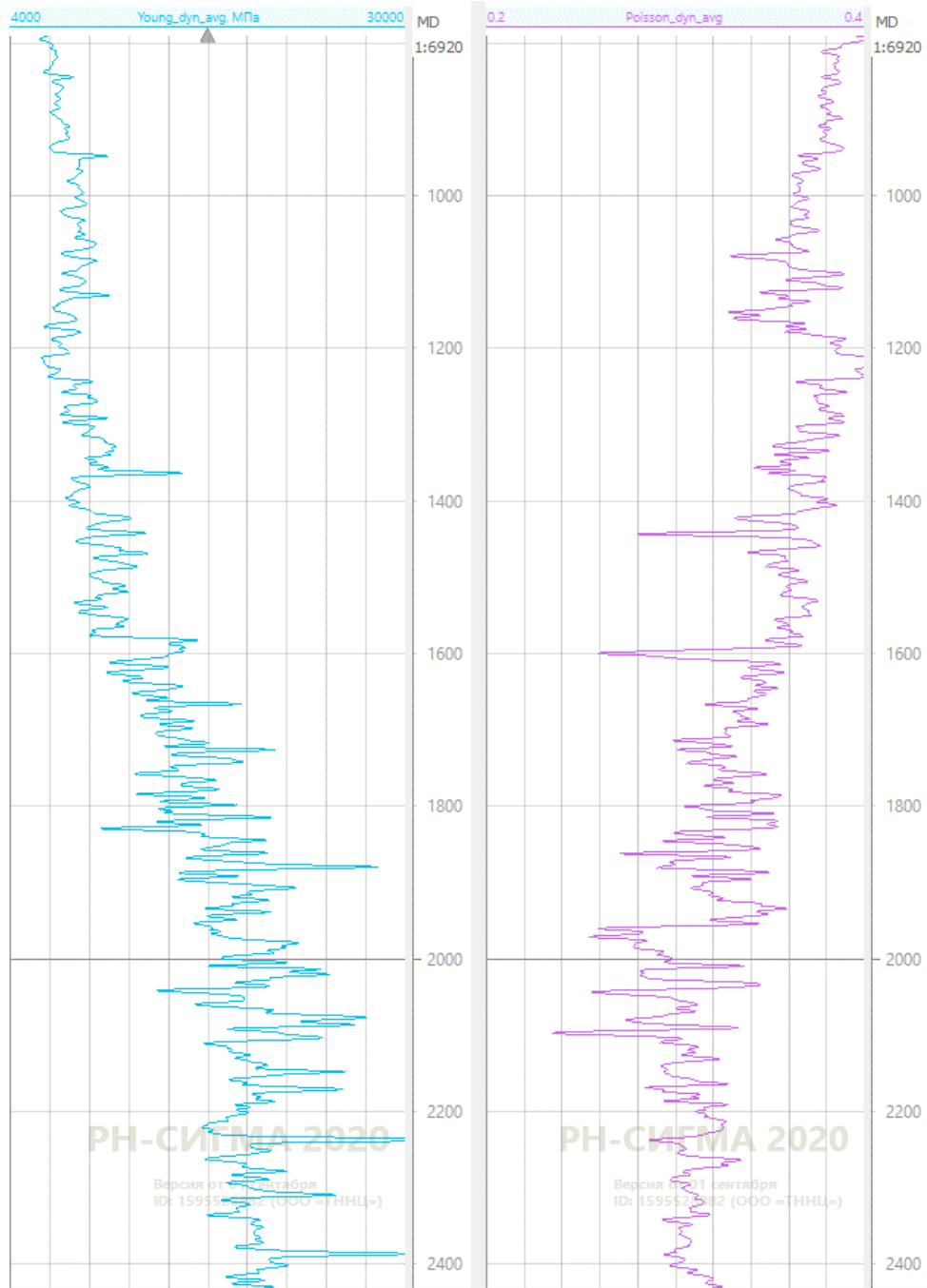


Рис. 13. Кривые динамических упругих модулей. Слева- модуль Юнга. Справа- коэффициент Пуассона

5. Статистические упругие свойства. Как сказано выше, динамические свойства описывают реакцию породы на слабые кратковременные воздействия, такие, как распространение акустической волны. При геомеханическом моделировании используются статистические свойства, которые описывают реакцию породы на более сильные продолжительные воздействия. Для большинства горных пород существует взаимосвязь между динамическими и статическими свойствами, определяемая по результатам лабораторных

исследований керна. Задание значений статистического модуля Юнга производится путем введения корреляции между значениями, полученными в лабораторных испытаниях, и динамическим модулем Юнга. Статистический коэффициент Пуассона приравнивается динамическому коэффициенту Пуассона. Полученная корреляции применена в рамках определенного стратиграфического интервала.

$$E_{stat} = 0.0421E_{dyn}^{1.7185}, \quad (5)$$

где  $E_{stat}$  – статистический модуль Юнга, Па,

$E_{dyn}$  – динамический модуль Юнга, Па.

6. Расчет прочностных свойств. предел прочности на одноосное сжатие, растяжение, угол внутреннего трения.

$$TSTR = 0.2237E_{stat} - 0.1663, \quad (6)$$

$$TWC = 0.2235E_{ucs} + 1.358, \quad (7)$$

$$E_{ucs} = 2.7235E_{stat} - 0.8204, \quad (8)$$

где  $TSTR$  – прочность на растяжение, Па,

$TWC$  – прочность толстостенного цилиндра, Па,

$E_{ucs}$  – прочность при одноосном сжатии, Па.

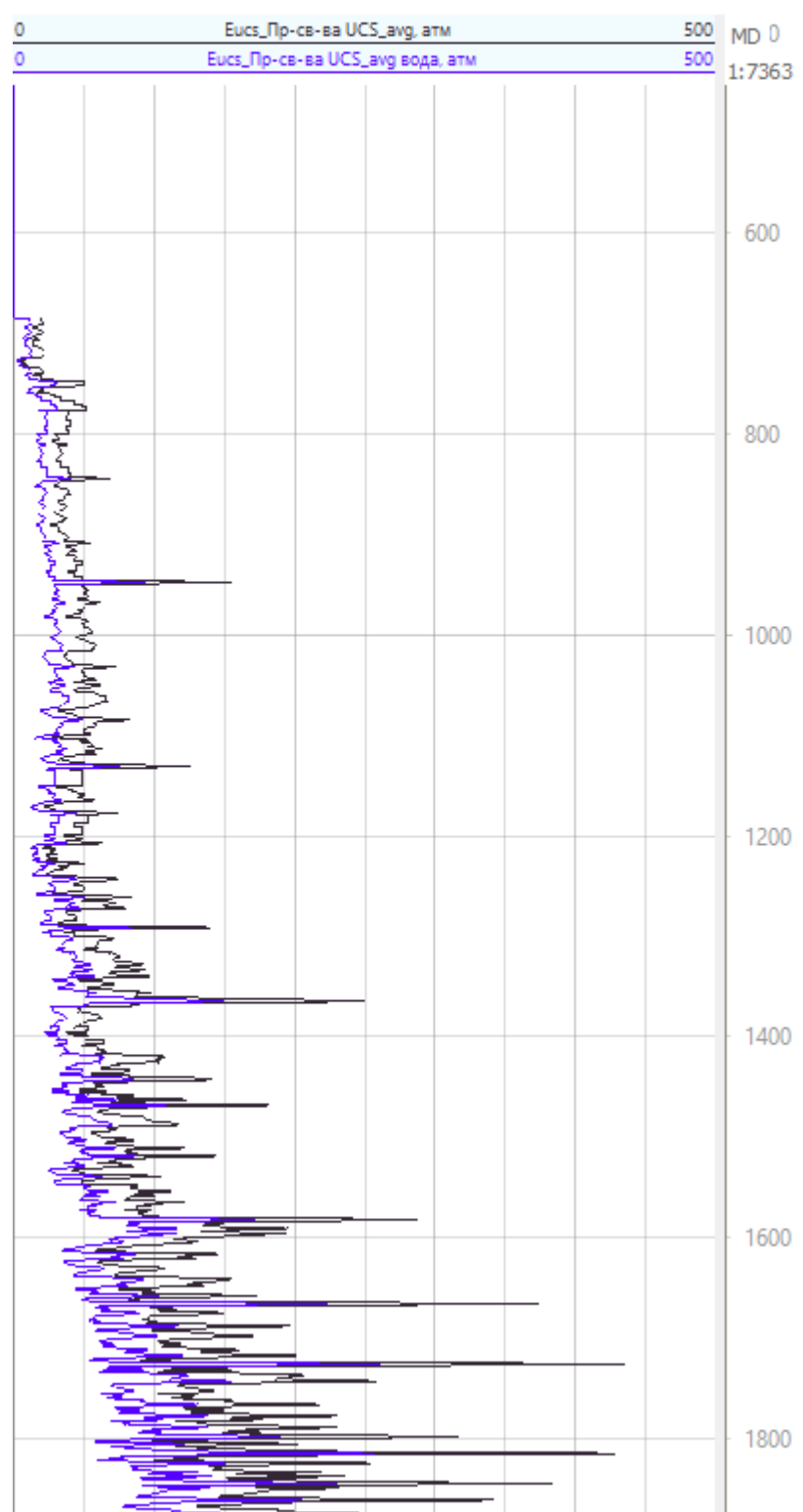


Рис. 14. Кривая прочности при одноосном сжатии. Синяя кривая соответствует значениям прочности при насыщении горной породы водой. Черная кривая соответствует значениям прочности при насыщении горной породы нефтью

7. Расчет горизонтальных напряжений. Определение направления горизонтальных напряжений является одной из ключевых задач в нефтяной индустрии. Разделение горизонтального напряжения на два ортогонально

направленных вектора - минимальное и максимальное горизонтальное напряжение - имеет большое значение. Корректное определение направления этих напряжений непосредственно влияет на эффективность разработки месторождения, начиная от выбора оптимальной сетки скважин и их расположения в пространстве, и заканчивая правильным проведением геолого-технических мероприятий.

Калибровка профиля, рассчитанных напряжений, на данные MDT стресс-тестов и мини-ГРП (пороупругая модель). Производилось вычисление кривой минимального горизонтального напряжения до того момента, когда скорректированные значения минимального горизонтального напряжения совпали со значениями давления закрытия трещин. Необходимо учесть, что данная процедура обязательна. Был принят средний коэффициент Био равный 0,6.

Расчет максимального напряжения и определение его ориентации:

$$\sigma_h = \frac{v_{stat}}{1 - v_{stat}} (\sigma_v - \alpha p) + \alpha p + \frac{E_{stat}}{1 - v_{sta}^2} \varepsilon_h + \frac{v_{stat} E_{stat}}{1 - v_{stat}^2} \varepsilon_H, \quad (9)$$

$$\sigma_H = \frac{v_{stat}}{1 - v_{stat}} (\sigma_v - \alpha p) + \alpha p + \frac{E_{stat}}{1 - v_{stat}^2} \varepsilon_H + \frac{v_{stat} E_{stat}}{1 - v_{stat}^2} \varepsilon_h, \quad (10)$$

где  $\sigma_h$  – минимальное горизонтальное напряжение, Па,

$\sigma_H$  – максимальное горизонтальное напряжение, Па,

$\sigma_v$  – горное давление, Па,

$p$  – поровое давление, Па,

$E_{stat}$  – статистический модуль Юнга, Па,

$v_{stat}$  – статистический коэффициент Пуассона,

$\alpha$  – коэффициент пороупругости,

$\varepsilon_h$  — минимальная горизонтальная деформация,

$\varepsilon_H$  — максимальная горизонтальная деформация.

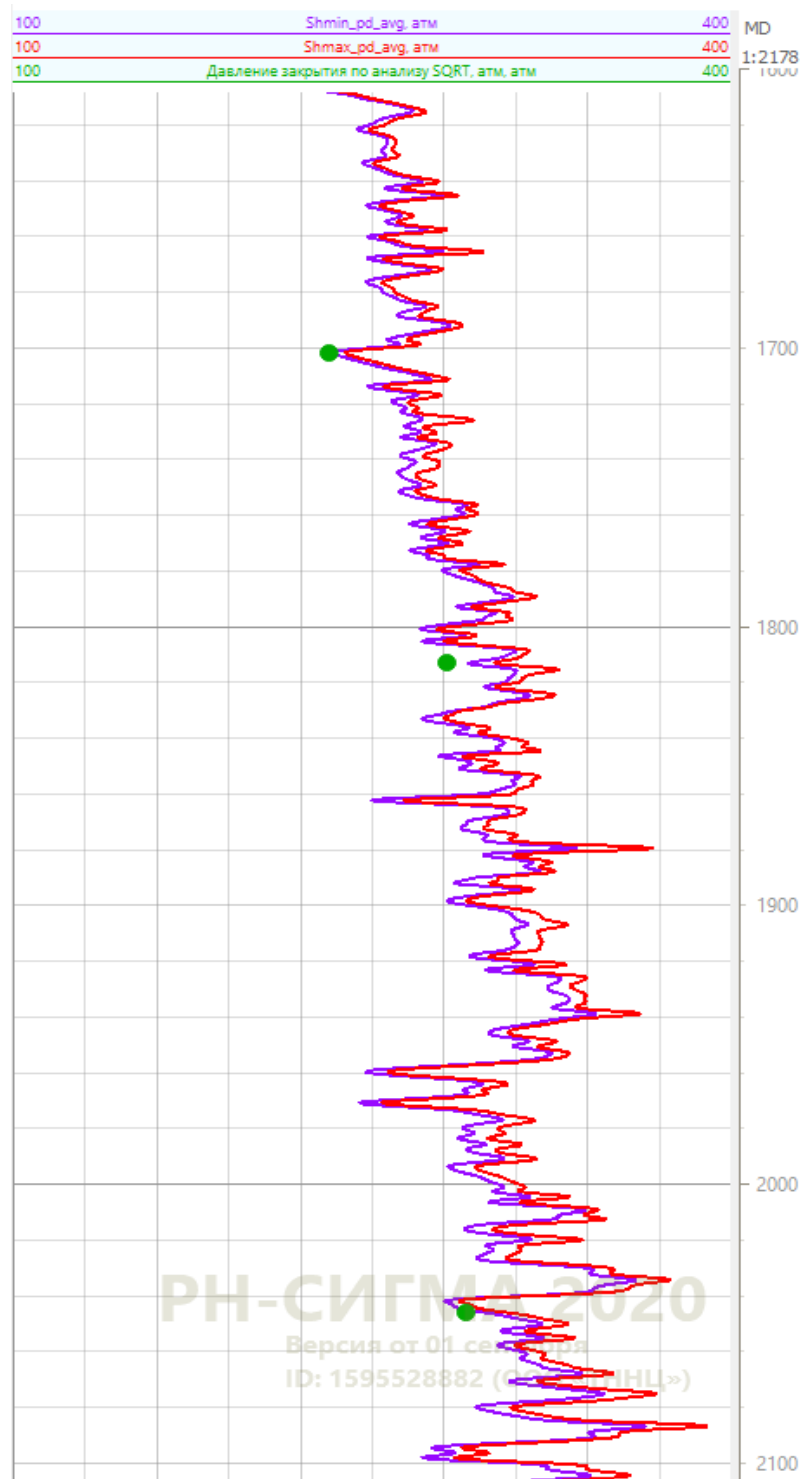


Рис. 15. Кривые горизонтального напряжения. Фиолетовая кривая соответствует минимальному горизонтальному напряжению. Красная кривая соответствует максимальному горизонтальному напряжению. Зеленые точки – давление закрытия трещины

8. Расчет устойчивости стенок скважины (используется критерий разрушения Кулона-Мора/Ладе). Анализ замеров многорычажных каверномеров

показал наличие большого числа размывов и вывалов. Текущие деформации не могут быть откалиброваны на расчетный градиент обрушения.

Результат расчета устойчивости ствола скважины представляет собой сводный планшет градиентов пластового давления, градиентов обрушения, давления закрытия трещин и гидроразрыва пласта, (Рисунок 12). Расчет устойчивости ствола скважины выполнен по критерию устойчивости Ладэ.

Расчет устойчивости стенок скважины направлен на достижение двух основных целей: определение безопасных пределов циркуляции бурового раствора и оценку рисков, связанных с устойчивостью стенок. Это также позволяет определить оптимальный азимут и угол наклона скважины.

При проведении расчета учитываются факторы, такие как геологические условия, свойства породы, гидродинамические нагрузки и механические характеристики скважины. Результаты расчета позволяют определить предельные значения давления бурового раствора, чтобы избежать проблем с устойчивостью стенок и возможных аварийных ситуаций. Также проводится оценка рисков и принимаются меры по обеспечению безопасности и оптимальности скважины, включая выбор наиболее подходящего азимута и угла наклона.

Целью всех этих мероприятий является обеспечение надежной и безопасной эксплуатации скважины в соответствии с требованиями и стандартами индустрии нефтяной промышленности.

Критерий Ладэ:

$$\frac{(3S + \sum 1 + \sum 2 + \sum 3)^3}{(\sum 1 + S)(\sum 2 + S)(\sum 3 + S)} = \mu + 27, \quad (11)$$

$$S = \frac{C_0}{2} \frac{1 - \sin \varphi}{\tan \varphi \cos \varphi},$$

$$\mu = 4 \tan^2 \frac{\varphi(9 - 7 \sin \varphi)}{1 - \sin \varphi},$$



где  $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3$  - главные напряжения, Па,  
 $C_0$  - предел прочности на одноосное сжатие, Па,  
 $\varphi$  - угол внутреннего трения.

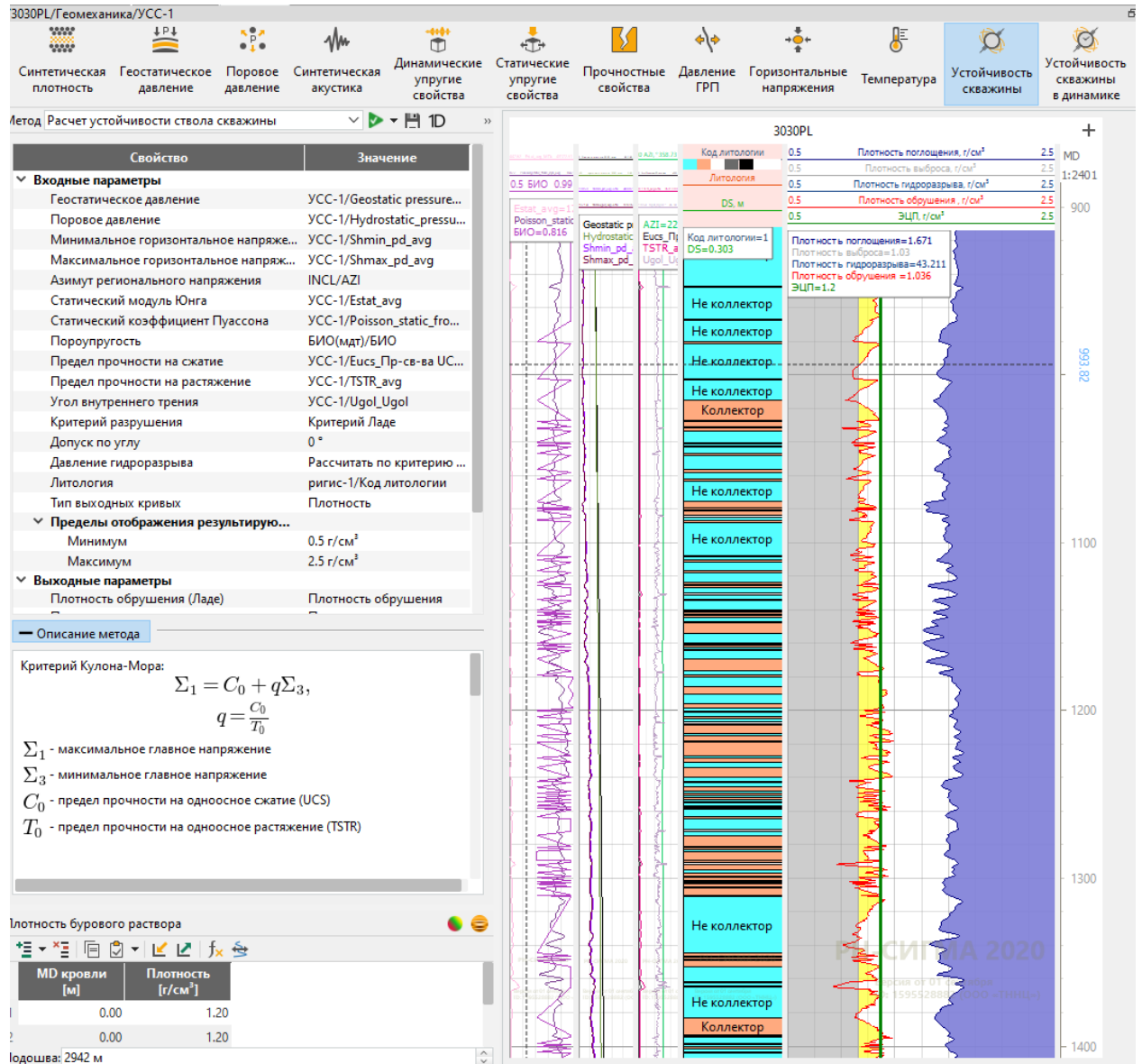


Рис. 16. Расчет устойчивости стенок скважин

Отмечается низкий уровень неопределенностей при построение геомеханической модели. Наблюдаются нижеследующие неопределенности. Некорректное выделение механических фаций из-за погрешности определения фильтрационно-емкостных свойств. Расхождение скоростей продольных и поперечных волн по данным акустического широкополосного каротажа

вследствие некачественной записи и/или высокой неоднородности разреза. Отсутствие данных об упруго-прочностных свойствах перемычек. Запись плотностного каротажа с глубины ~700 м. Вариации пластового давления в скважинах и по площади месторождения в связи с разработкой. Изменчивость напряжений из-за геологической неоднородности и/или изменчивостью пластового давления. Прямые и косвенные данные для калибровки отсутствуют. Согласование критерия разрушения стенок скважины с данными каверномера.

### 3.2 РАСЧЕТ БЕЗОПАСНОЙ ДЕПРЕССИИ

В дальнейшем возникла задача оценки рисков возможного проявления песка при эксплуатации. Для расчета безопасной депрессии давления была использована модель Вейнгартена и Перкинса.

Модель Вейнгартена и Перкинса

$$\Delta P = \sqrt{(n + UCS)^2 + P_p^2} - (n * UCS), \quad (11)$$

где UCS- предел прочности при одноосном сжатии, Па,

$P_p$ - поровое/пластовое давление, Па,

$n$ - безразмерный фактор формы,  $n=1$  для цилиндрической формы,  $n=2$  для сферической формы.

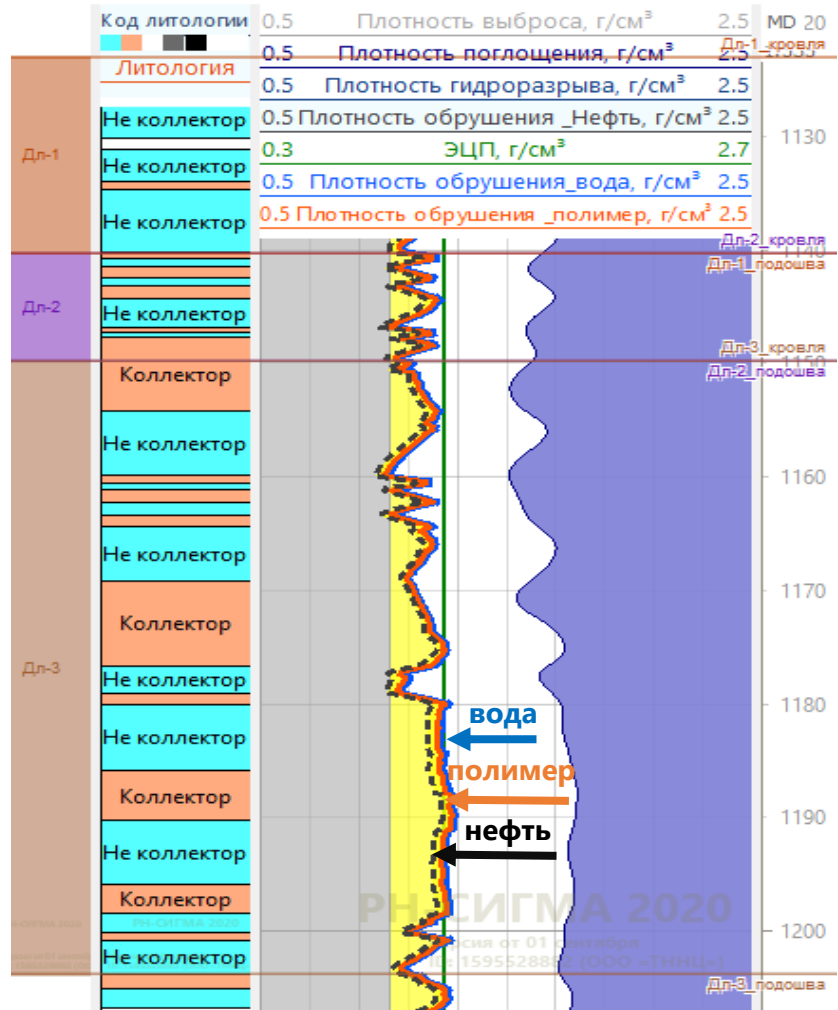


Рис. 17. Изменение прочностных характеристик горных пород под влиянием типа насыщающего флюида

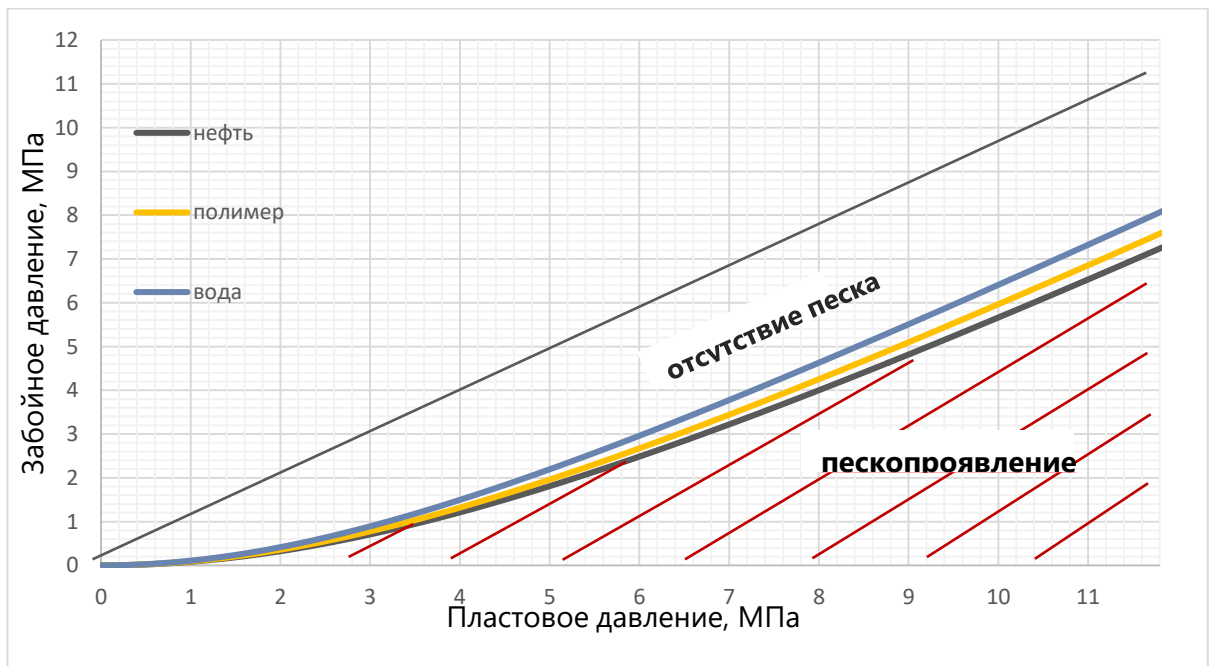


График 5. Графическое отображение окна безопасной депрессии

В кровельной части пласта безопасная депрессия при начальном поровом давлении составляет от 3,75 до 4,45 МПа, в центральной – до 3-3,75 МПа, а в нижней – до 2-3,5 МПа. При поровом давлении от 6,51 до 7,75 МПа происходит нарушение одного из трех рассматриваемых критериев разрушения, что повышает риски выноса механических примесей.

При начальном поровом давлении с учетом влияния насыщающего флюида и ослабления прочностных свойств безопасная депрессия составляет до 3,49-3,97 МПа. При поровом давлении от 7,01 до 8,09 МПа наблюдается переходная зона с увеличением риска выноса механических примесей.

#### 4. ВЫВОДЫ

1. Полученные результаты тестирования керна свидетельствуют о влиянии типов насыщающих флюидов на упруго-прочностные характеристики горных пород. Максимальное снижение прочностных характеристик происходит при насыщении образцов моделью пластовой воды, минимальное – нефтью. Наибольшее снижение эффективного предела упругости полых цилиндров отражается в насыщенных моделью пластовой воды.

2. В результате 1D геомеханического моделирования установлено, что для начальных пластовых условий безопасное окно депрессия изменяется от 2 до 4.45 МПа.

3. Показано, что при увеличении водонасыщенности значение предельно допустимой депрессии снижается с сопутствующим увеличением рисков выноса механических примесей.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тип насыщающего флюида влияет на упруго-прочностные свойства горной породы. Максимальную прочность имеют естественно-насыщенные нефтью образцы керна, тогда как образцы, моделью пластовой воды, имеют наименьшую прочность. Наличие воды в горной породе может значительно ослабить механические свойства, что может повлечь существенные осложнения. Результаты лабораторных тестов помогли создать геомеханическую модель целевой скважины.

Модель предполагает поддержание предельно допустимой депрессии на уровне до 4.45 МПа, что может свести к минимуму риск пескопроявления. Это подчеркивает важность понимания упруго-прочностных свойств горных пород, насыщенных различными флюидами, так как вынос песка вызывает серьезные эксплуатационные проблемы.

Дальнейшие исследования в этой области могут привести к лучшему пониманию и совершенствованию методов управления геологическими ресурсами и минимизации рисков.

## 6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brandt H. A study of the speed of sound in porous granular media // J. Appl. Mech., 1955. V. 22. No. 4. P. 479- 486. URL: <https://asmedigitalcollection.asme.org/appliedmechanics/article-abstract/22/4/479/1110454/A-Study-of-the-Speed-of-Sound-in-Porous-Granular?redirectedFrom=fulltext>
2. Fait J. Compressibility of sandstones at low to moderate pressures // BAAPG, V. 42. No. 8.// Semantic Scholar URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Compressibility-of-Sandstones-at-Low-to-Moderate-Fatt/241e668a5162099409049f25b3350ef7afe56441>
3. Wong LNY, Maruvanchery V, Liu G. Water effects on rock strength and stiffness degradation. Acta Geotech 2016; 11:713–37. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11440-015-0407-7>
4. Iverson RM. Landslide triggering by rain infiltration. Water Resour Res 2000;36:1897 URL: <http://dx.doi.org/10.1029/2000WR900090>.
5. Bai H, Ma D, Chen Z. Mechanical behavior of groundwater seepage in karst collapse pillars. Eng Geol 2013;164:101–6. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.07.003>.
6. Wu F, Qi S, Lan H. Mechanism of uplift deformation of the dam foundation of Jiangya water power station, Hunan Province, P.R. China. Hydrogeol J 2005. Springer link. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10040-004-0374-9>
7. Hawkins AB, McConnell BJ. Sensitivity of sandstone strength and deformability to changes in moisture content. Q J Eng Geol Hydrogeol 1992;25:115–30. sci-hub. URL: <https://sci-hub.hkvisa.net/10.1144/gsl.qjeg.1992.025.02.05>
8. Erguler ZA, Ulusay R. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks. Int J Rock Mech Min Sci 2009;46:355–70. Sciencedirect. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1365160908001172>

9. Han G. Rock stability under different fluid flow conditions. Doctoral dissertation. University of Waterloo; 2003. Uwspace. URL: <https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/827/ghan2003.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
10. Bazvant ZP, Prat PC. Effect of temperature and humidity on fracture energy of concrete. *ACI Mater J* 1988;262–71. [21] Haberfield CM, Johnston IW. Determination of the fracture toughness of a saturated soft rock. *Can Geotech J* 1990;27:276–84. URL: <http://www.civil.northwestern.edu/people/bazant/PDFs/Papers/233.pdf>
11. Zilong Zhoua , Xin Caia , Dan Maa,\* , Wenzhuo Caob , Lu Chena,c , Jing Zhou. Effects of water content on fracture and mechanical behavior of sandstone with a low clay mineral content. URL: <http://www.civil.northwestern.edu/people/bazant/PDFs/Papers/233.pdf>
12. Hawkins, A.B.; McConnell, B.J. Sensitivity of sandstone strength and deformability to changes in moisture content. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 1992, 25, 115–130. [CrossRef]. URL: <https://sci-hub.hkvisa.net/10.1144/gsl.qjeg.1992.025.02.05>
13. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks. Z.A. Erguler a , R. Ulusay b. ScienceDirect. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.07.002>
14. Jiang, Q.; Cui, J.; Feng, X.; Jiang, Y. Application of computerized tomographic scanning to the study of water-induced weakening of mudstone. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2014, 73, 1293–1301. [CrossRef]. SpringerLink. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10064-014-0597-5>
15. Dyke, C.G.; Dobereiner, L. Evaluating the strength and deformability of sandstones. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 1991, 24, 123–134. [CrossRef]. Sci-hub. URL: <https://sci-hub.hkvisa.net/10.1144/gsl.qjeg.1991.024.01.13>
16. Va'n Eeckhout EM. The mechanisms of strength reduction due to moisture in coal mine shales. *Int J Rock Mech Min Sci* 1976;13:61–7. ScienceDirect. URL: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(76\)90705-1](https://doi.org/10.1016/0148-9062(76)90705-1)



17. Water-Weakening Effects on the Mechanical Behavior of Different Rock Types: Phenomena and Mechanisms. 2019. Xin Cai 1 , Zilong Zhou 1,2,\* , Kewei Liu 1,\* , Xueming Du 1,3,\* and Haizhi Zang 4. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/20/4450>
18. Dube AK, Singh B (1972) Effect of humidity on tensile strength of sandstone. *J Mines Metals Fuels* 20(1):8–10. URL: <https://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/bitstream/2115/66650/1/ARMA2017.17-217.pdf>
19. Lin ML, Jeng FS, Tsai LS, Huang TH (2005) Wetting weakening of tertiary sandstones—microscopic mechanism. *Environ Geol* 48(2):265–275. Link.springer. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00254-005-1318-y>
20. Kessler D, Insley H, Sligh W (1940) Physical, mineralogical and durability studies on the building and monumental granites of the United States. *J Res Natl Bur Stand* 24:161–206. URL: [https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/25/jresv25n2p161\\_A1b.pdf](https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/25/jresv25n2p161_A1b.pdf)
21. Ruiz MD (1966) Some technological of twenty-six characteristics Brazilian rock types. In: Proceedings of the 1st congress of the International Society of Rock Mechanics. Lisbon. Onepetro. URL: <https://onepetro.org/isrmcongress/proceedings-abstract/CONGRESS66/All-CONGRESS66/ISRM-1CONGRESS-1966-023/165993>
22. Hadizadeh J, Law RD (1991) Water-weakening of sandstone and quartzite deformed at various stress and strain rates. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 28(5):431–439. Sciencedirect. URL: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(91\)90081-V](https://doi.org/10.1016/0148-9062(91)90081-V)
23. Gajic' V, Matovic' V, Vasic' N, Srec'kovic'-Batoc'anin D (2011) Petrophysical and mechanical properties of the Struganik limestone (Vardar Zone, western Serbia). *Geolos'ki anali Balkanskoga poluostrva* 72:87–100. Researchgate. URL: [https://www.researchgate.net/publication/274828864\\_Petrophysical\\_and\\_mechanical\\_properties\\_of\\_the\\_Struganik\\_limestone\\_Vardar\\_zone\\_Western\\_Serbia/](https://www.researchgate.net/publication/274828864_Petrophysical_and_mechanical_properties_of_the_Struganik_limestone_Vardar_zone_Western_Serbia/).

24. Vutukuri VS (1974) The effect of liquids on the tensile strength of limestone. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 11(1):27–29. Sciencedirect. URL: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(74\)92202-5](https://doi.org/10.1016/0148-9062(74)92202-5)

25. Va'sa'rhelyi B (2005) Statistical analysis of the influence of water content on the strength of the miocene limestone. *Rock Mech Rock Eng* 38(1):69–76. Researchgate. URL: [https://www.researchgate.net/publication/226483711\\_Statistical\\_Analysis\\_of\\_the\\_Influence\\_of\\_Water\\_Content\\_on\\_the\\_Strength\\_of\\_the\\_Miocene\\_Limestone](https://www.researchgate.net/publication/226483711_Statistical_Analysis_of_the_Influence_of_Water_Content_on_the_Strength_of_the_Miocene_Limestone)

26. Podio AL, Gregory AR, Gray KE (1968) Dynamic properties of dry- and water-saturated Green River shale under stress. *Soc Pet Eng J* 8(4):1389–1404. Onepetro. URL: <https://onepetro.org/spejournal/article/8/04/389/163225/Dynamic-Properties-of-Dry-and-Water-Saturated>

27. On the Tensile Strength of Granite at High Strain Rates considering the Influence from Preexisting Cracks. Mahdi Saadati,<sup>1,2</sup> Pascal Forquin,<sup>3</sup> Kenneth Weddfelt,<sup>2</sup> and Per-Lennart Larsson. Department of Solid Mechanics, KTH Royal Institute of Technology, 10044 Stockholm, Sweden<sup>2</sup>Atlas Copco, 70225 Örebro, Sweden<sup>3</sup>SR Laboratory, Grenoble-Alpes University, 38041 Grenoble, France. 2016 URL:

[https://www.researchgate.net/publication/305340047\\_On\\_the\\_Tensile\\_Strength\\_of\\_Granite\\_at\\_High\\_Strain\\_Rates\\_considering\\_the\\_Influence\\_from\\_Preexisting\\_Cracks](https://www.researchgate.net/publication/305340047_On_the_Tensile_Strength_of_Granite_at_High_Strain_Rates_considering_the_Influence_from_Preexisting_Cracks)

28. Grgic D, Giot R, Homand F, Giraud A (2005) Effect of suction on the mechanical behaviour of iron ore rock. *Int J Numer Anal Methods Geomech* 29(8):789–827. Researchgate. URL:

[https://www.researchgate.net/publication/229863007\\_Effect\\_of\\_suction\\_on\\_the\\_mechanical\\_behaviour\\_of\\_iron\\_ore\\_rock](https://www.researchgate.net/publication/229863007_Effect_of_suction_on_the_mechanical_behaviour_of_iron_ore_rock).

29. Estimation of Influence of Geomechanical Effects on Change of Formation Reservoir Properties In Conditions of Slightly Cemented Reservoir. Wang B, Li X, Yin T, Ma C, Yin Z, Li Z (2010) Spilt Hopkinson pressure bar (SHPB) experiments on dynamic strength of watersaturated sandstone. *Chin J Rock Mech Eng*

29(5):7. ScienceDirect. URL:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775514001048>.

30. Vaziri H., Barree B., Xiao Yu., Palmer Ian, Kutas M. What is the magic of water in producing sand? Texas, San Antonio, 2002, September, Paper presented at the SPE annual technical conference and exhibition, SPE-77683-MS. (In Eng). OnePetro. URL: <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/02ATCE/All-02ATCE/SPE-77683-MS/136052>.

31. Selection of Sand Control Completion Techniques Using Machine Learning. H. Laoufi; Z. Megherbi; N. Zeraibi; A. Merzoug; A. Ladmia. OnePetro. URL: <https://onepetro.org/armaigs/proceedings-abstract/IGS22/All-IGS22/ARMA-IGS-2022-118/515054>

32. Geomechanical Modeling for Sand Production Prediction. Hossein Rahmati,1Mahshid Jafarpour,1Saman Azadbakht,1Alireza Nouri,1Hans Vaziri,2Dave Chan,1and Yuxing Xiao. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Edmonton, AB, Canada T6G 2W22BP America Inc., Houston, TX 77079, USA. Researchgate. 2014. URL: [https://www.researchgate.net/publication/289664735\\_Analytical\\_prediction\\_model\\_of\\_sand\\_production\\_integrating\\_geomechanics\\_for\\_open\\_hole\\_and\\_cased\\_-\\_Perforated\\_wells](https://www.researchgate.net/publication/289664735_Analytical_prediction_model_of_sand_production_integrating_geomechanics_for_open_hole_and_cased_-_Perforated_wells)

33. Prediction of Sand Production from Oil2017 and Gas Reservoirs in the Niger Delta Using Support Vector Machines SVMs: A Binary Classification Approach. July 2017. Oladipo Olatunji. Michael Oluwadamilola Obolo.

34. Павлов В.А., Павлюков Н.А., Субботин М.Д., Коваленко А.П., Янтудин А.Н., Абдуллин В.С., Шехонин Р.С., Головизнин А.Ю. Обоснование режимов эксплуатации скважин сеноманской газовой залежи Харампурского месторождения по результатам геомеханического моделирования // Экспозиция Нефть Газ. 2021. № 2. С. 41–46. DOI: 10.24412/2076-6785-2021-2-41-46

35. Карманский А.Т. Экспериментальное обоснование прочности и разрушения насыщенных осадочных горных пород. Докт. техн. наук. СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2010. 275 с. 3. Dissercat. URL:

<https://www.dissercat.com/content/eksperimentalnoe-obosnovanie-prochnosti-i-razrusheniya-nasyshchennykh-osadochnykh-gornykh-po>.

36. W. Jiong, Z. Wancheng, and G. Kai, “An acoustic emission data-driven model to simulate rock failure process,” *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 53, no. 4, pp. 1605–1621, 2020. Sci-hub. URL: <https://sci-hub.hkvisa.net/10.1007/s00603-019-01994-3>

37. P`rikryl, R.; Lokají`cek, T.; Li, C.; Rudajev, V. Acoustic Emission Characteristics and Failure of Uniaxially Stressed Granitic Rocks: The Effect of Rock Fabric. *Rock Mech. Rock Eng.* 2003, 36, 255–270. [CrossRef]. LinkSpringer. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00603-003-0051-7>

38. Оглезнева Л.А., А.Н. Калиниченко АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ Часть II. // ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» URL: <https://portal.tpu.ru/SHARED/1/LEX-K/lessons/Vibro/Tab3/%D0%90%D0%BA%D1%83%D1%81%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5%20%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D1%8B%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BB%D1%8F.pdf>

39. Zhibo Zhang, Xianan Liu, Yinghua Zhang, Xuanye Qin, Majid Khan. Comparative study on fracture characteristics of coal and rock samples based on acoustic emission technology // [sciencedirect]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167844220304274>

40. W. Jiong, Z. Wancheng, and G. Kai, “An acoustic emission data-driven model to simulate rock failure process,” *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 53, no. 4, pp. 1605–1621, 2020. LinkSpringer. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00603-019-01994-3>

41. Z. Dongxu, “Application of ultrasonic testing in rock test,” *World Nonferrous Metals*, vol. 24, no. 4, pp. 233-234, 2017. ResearchGate. URL:

[https://www.researchgate.net/publication/297325809\\_Evaluation\\_of\\_Ultrasonic\\_Testing\\_in\\_Rock\\_Material\\_Characterization](https://www.researchgate.net/publication/297325809_Evaluation_of_Ultrasonic_Testing_in_Rock_Material_Characterization)

42. Structural Health Monitoring on Ships. Using Acoustic Emission Testing. Aikuo Lee, G. Wang, Sam Ternowchek, S. Botten. Semantic Scholar. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Structural-Health-Monitoring-on-Ships-Using-Testing-Lee-Wang/8f5883a8e61e758c81b06ce3bf6a73160ffc3d4a>

43. Acoustic emission characteristics in hydraulic fracturing of stratified rocks: A laboratory study. Zhizhong Jiang a,b , Quanguai Li a,b,c , \*, Qianting Hua,b , Yunpei Liang a,b , Yangcheng Xu a,b , Le Liu a,b , Xiaobing Wu a,b , Xuelong Li a,b,c , Xiaoguang Wang a,b , Liangping Hu a,b , Faping Ling a,b. Powder Technology. 30 June 2020, Pages 267-276. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.05.050>

44. Advanced acoustic emission analysis of brittle and porous rock fracturing S. Stanchits, and G. Dresen. GFZ German Research Centre for Geosciences, Telegrafenberg D423, 14473 Potsdam, Germany. Epj-conferences. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20100622010>

45. Рамазанов P.M. Spectral analysis of acoustic emission and ultrasonic transmission data during rock fracture. ПГУ. URL: <https://www.rsl.ru/>

46. New model or predicting the rate of sand production. S. M. Willson; Z. A. Moschovidis; J. R. Cameron; I. D. Palmer. Paper presented at the SPE/ISRM Rock Mechanics Conference, Irving, Texas, October 2002. Paper Number: SPE-78168-MS. [doi.org/10.2118/78168-MS](https://doi.org/10.2118/78168-MS)

47. The relative importance of drawdown and depletion in sanding wells: models compared with data from the statfjord field MM. Hetteema, Marc; Andrews, Jamie; Papamichos, Euripides; Blaasmo, Marit (2006). [Society of Petroleum Engineers International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control - (2006.02.15-2006.02.17)] Proceedings of International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control - The Relative Importance of Drawdown and Depletion in Sanding Wells: Predictive Models Compared With Data From the Statfjord Field.—. [doi:10.2523/97794-ms](https://doi.org/10.2523/97794-ms)