

В диссертационный совет по защите докторских  
и кандидатских диссертаций Д 24.1.098.01  
на базе Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки «Института проблем механики  
им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук»

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
Баркова Святослава Олеговича «Геомеханическое моделирование механических  
и фильтрационных процессов в низкопроницаемых нефтегазовых пластах  
в условиях сложного нагружения»,  
представленную к защите на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

На отзыв представлены:

- диссертационная работа на 150 страницах машинописного текста, содержащая 42 рисунка и 4 таблицы, список литературы из 186 наименований;
- автореферат диссертации на 23 страницах со списком из 9 публикаций автора по теме диссертационной работы (4 статьи из этого списка опубликованы в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ, 5 статей опубликованы в сборниках научных трудов, индексируемых международными базами цитирования Web of Science и Scopus).

**1. Актуальность темы.** Диссертационная работа Баркова Святослава Олеговича посвящена экспериментальному исследованию деформационных и фильтрационных свойств горных пород, слагающих низкопроницаемые продуктивные пласты месторождений углеводородного сырья, в реальных напряженно-деформированных состояниях, возникающих в окрестности скважин с различными конструкциями забоя. Сложность экспериментального определения закономерностей изменения проницаемости горных пород при различных трехосных напряженно-деформированных состояниях пласта, сложность определения ключевых параметров воздействия на пласт, приводящих к улучшению фильтрационных свойств пород и недопущению разрушения стволов скважин, обуславливают актуальность работы.

**2. Научная новизна.** В диссертационной работе на основе разработанных методик проведено прямое физическое моделирование процессов неупругого деформирования и разрушения низкопроницаемых пород-коллекторов продуктивных горизонтов месторождений углеводородного сырья, исследованы квазистатические закономерности фильтрации при трехосном непропорциональном нагружении на Испытательной системе трехосного независимого нагружения (ИСТНН) по траекториям в виде многозвенных ломаных. Определены закономерности эволюции проницаемости в условиях непропорционального трехосного нагружения; сформулированы ключевые закономерности изменения филь-

рационных свойств продуктивных пластов Астраханского газоконденсатного месторождения и Верхневилучанского нефтегазоконденсатного месторождения при проведении технологических операций на скважине; обоснованы мероприятия по улучшению фильтрационных характеристик пород при реализации метода направленной разгрузки пласта, которые исключают разрушение ее ствола.

**3. Обоснованность и достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций** подтверждается строгой постановкой задач, корректным применением методов экспериментальной механики деформируемого твердого тела; применением при проведении экспериментальных исследований методологических подходов, проверенных многолетней практикой; использованием испытательного и измерительного оборудования с высокими метрологическими характеристиками.

**4. Теоретическая и практическая значимость.** Диссертантом сделан серьезный шаг в области физического моделирования процессов неупругого деформирования, разрушения и фильтрации. Наиболее значимыми научными результатами являются сформулированные и обоснованные условия, которые необходимо создать в низкопроницаемых породах Астраханского газоконденсатного и Верхневилучанского нефтегазоконденсатного месторождений для значительного повышения проницаемости и, как следствие, увеличения продуктивности скважин и нефтегазоотдачи пластов; сформулированные и обоснованные оптимальные режимы эксплуатации скважин (предварительная оценка величин депрессий) с целью поддержания неизменности их стенок и недопущения негативных процессов в продуктивном пласте. Экспериментально определенные закономерности механического поведения горных пород при трехосном непропорциональном нагружении, установленные новые экспериментальные зависимости проницаемости от вида сложного напряженно-деформированного состояния могут быть использованы для построения новых уточненных геомеханических моделей, используемых для проектирования и разработки оптимальных режимов эксплуатации скважин.

**5. Анализ содержания диссертации.** Диссертационная работа включает в себя введение, 5 глав, заключение; изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 42 рисунка и 4 таблицы. Список литературы состоит из 186 наименований. Диссертация хорошо структурирована, изложение материала выстроено логически грамотно.

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, отмечена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, достоверность и обоснованность полученных результатов; показана степень разработанности темы исследования, представлены методология исследования и используемые методы, отражены положения, выносимые на защиту; приведены сведения об апробации результатов и отражен личный вклад автора.

**В первой главе** проведен аналитический обзор методов и подходов физического и математического моделирования механического поведения и фильтрации в нефтегазовых пластах с использованием экспериментальных установок, работа которых основана на реализации схемы Кармана, и установок истинного трехосного нагружения (УИТН). Приведена классификация УИТН, описаны их преимущества и недостатки. Отмечена необходимость исследования напряженно-деформированных состояний горных пород, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации месторождений.

**Во второй главе** представлены результаты проведенного анализа распределения напряжений в окрестности открытого ствола скважин при различных конструкциях забоя и для различных начальных условий в породном пласте. Рассмотрены следующие случаи: необсаженная скважина (открытый ствол), необсаженная и обсаженная скважина с перфорационными отверстиями. Полученные результаты использованы в дальнейшем для разработки программ неравнокомпонентного трехосного сжатия горных пород.

**В третьей главе** дано краткое описание Астраханского газоконденсатного и Верхневилучанского нефтегазоконденсатного месторождений, низкопроницаемые карбонатные породы продуктивных пласты которых являются объектами исследования в диссертационной работе. Проведено сравнение касательных модулей «модельной» геосреды (карьерного песчаника) при проведении ступенчатого нагружения на ИСТНН и на установке, реализующей схему Кармана, при боковых обжатиях в 2.0, 10.0 и 20.0 МПа. Разработаны программы непропорционального трехосного нагружения в виде трехзвенных ломаных, реализация которых на ИСТНН позволяет определить механические и фильтрационные свойства пород. Все программы учитывают на первом этапе напряжения, действующие на грунтовый скелет до начала бурения скважины; на втором — напряженное состояние, когда скважина пробурена, а давление на ее забой равно пластовому; на третьем — снижение давления на забое скважины. Последний этап длится до тех пор, пока образец не будет разрушен, или напряжения не достигнут значений, соответствующих максимально возможной депрессии. Если по завершению отработки программы нагружения не происходит макроразрушение образца, производится разгрузка по тем же траекториям, что и нагружение, но в противоположном направлении.

**В четвертой главе** описана методика проведения исследований горных пород при помощи микротомографа ProCon X-Ray CT-MINI, включающая подготовку и сканирование, реконструкцию трехмерной структуры, обработку данных и численное моделирование фильтрационных процессов на трехмерной цифровой модели образца.

**В пятой главе** представлены экспериментальные результаты физического моделирования процессов деформирования и фильтрации в окрестности необсаженных и обсаженных скважин Астраханского газоконденсатного и Верхневилучанского нефтегазоконденсатного месторождений при создании в них депрессий для различных конструкций забоя. Сформулированы и обоснованы практические рекомендации по увеличению продуктивности (благодаря направленной разгрузке пласта), которые исключают разрушение ствола.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы.

Основными результатами следует считать:

– разработанную методику проведения томографических исследований низкопроницаемых пород-коллекторов; разработанные и отработанные на ИСТНН программы непропорционального трехосного нагружения (позволяют проводить физическое моделирование реальных напряженно-деформированных состояний, возникающих при понижении давления в окрестности скважин в низкопроницаемых продуктивных пластах Астраханского газоконденсатного и Верхневилучанского нефтегазоконденсатного месторождений с различными конструкциями забоя) с целью изучения закономерностей влияния процессов деформирования на фильтрационные свойства пород;

– сформулированные и обоснованные практические рекомендации (конструкция забоя, величины необходимых депрессий, при которых произойдет разрушение породы в призабойной зоне) по увеличению продуктивности и нефтегазоотдачи низкопроницаемых пластов при помощи их направленной разгрузки, которые исключают разрушение стволов скважин Астраханского газоконденсатного и Верхневилючанского нефтегазоконденсатного месторождений.

**6. Замечания.** По диссертационной работе имеется ряд замечаний:

1. Список литературы оформлен не по алфавиту, а по мере поступления ссылки на цитируемую работу. Публикации на русском и английском языках идут вперемежку. Это представляет определенное неудобство. Когда необходимо выяснить информацию о наличии научной работы того или иного автора, приходится просматривать весь список. Каждая глава должна содержать вначале перечень публикаций соискателя, в соответствии с которыми изложен материал этой главы. Отсутствуют четко структурированные выводы по первой, второй, третьей и четвертой главам.

2. Реальные программы нагружения, которые отрабатывались во время проведения экспериментов на ИСТНН (определение проницаемости вдоль оси керна и в перпендикулярном к нему направлении для необсаженной скважины; определение проницаемости вдоль оси керна для обсаженной скважины с перфорационным отверстием) с низкопроницаемыми породами Верхневилючанского нефтегазоконденсатного месторождения, не вполне соответствовали разработанным в третьей главе. Вместо предполагаемых трехзвенных ломаных имели место многозвенные. При остановках во время отработки программ наблюдалась кратковременная ползучесть, регистрация которой должна была потребовать дополнительное уточнение и/или корректировку программ нагружения.

3. В диссертационной работе приведены результаты сравнения касательных модулей карьерного песчаника, определенных только для первого этапа ступенчатого нагружения на ИСТНН и на установке, реализующей схему Кармана, при боковом давлении в 2.0 МПа. Для других этапов этих сравнений в тексте рукописи почему-то нет.

4. Из текста диссертационной работы не ясно, какие гипотезы использовались при выборе граничных условий для плоскостей образца, перпендикулярных направлению фильтрации, при моделировании фильтрационных процессов в реальных трехмерных поврежденных структурах, которые были получены при томографических исследованиях после экспериментов на ИСТНН. Еще одним из возможных вариантов могли бы быть условия, соответствующие плоскостям симметрии.

Высказанные замечания и недостатки имеют частный характер, не затрагивают сути основных выводов и положений, выносимых на защиту, не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы (которая написана и оформлена в соответствии с установленными требованиями) и квалификации ее автора. Результаты работы хорошо апробированы (доклаживались и обсуждались на Всероссийских и международных научных конференциях) и опубликованы в 9 статьях (4 статьи опубликованы в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ, 5 статей опубликованы в сборниках научных трудов, индексируемых международными базами цитирования Web of Science и Scopus).

**7. Автореферат** дает ясное представление о постановке исследования и основных результатах, **полностью соответствует содержанию диссертации.**

8. Диссертационная работа полностью соответствует специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела по пунктам 3, 10 и 13 паспорта специальности.

9. **Заключение.** Оценивая работу в целом, считаю, что по уровню решаемых задач, объему выполненных исследований, обоснованности вынесенных на защиту положений и выводов, уровню достоверности, научной новизны и оригинальности полученных результатов, их значимости для науки и практики диссертационная работа «Геомеханическое моделирование механических и фильтрационных процессов в низкопроницаемых нефтегазовых пластах в условиях сложного нагружения» является законченной научно-квалификационной работой, вносящей существенный вклад в решение теоретических и прикладных вопросов соответствующих разделов механики деформируемого твердого тела, выполненной на высоком научном уровне, соответствует пп. II. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор — Барков Святослав Олегович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Согласен на обработку своих персональных данных

Кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры «Механика композиционных  
материалов и конструкций» Федерального  
государственного автономного образовательного  
учреждения высшего образования «Пермский  
национальный исследовательский  
политехнический университет» (ПНИПУ),  
614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29,  
Телефон: +7 (342) 239–11–59,  
E-mail: a-zaitsev@mail.ru

Зайцев Алексей Вячеславович

21 ноября 2024 г.

Подпись А. В. Зайцева заверяю  
секретарь Ученого совета ПНИПУ



Макаревич Владимир Иванович