

На правах рукописи



Баёв Михаил Алексеевич

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЗАКРЕПЛЕНИЯ ТРЕЩИН
ГИДРОРАЗРЫВА УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ ПРИ ИЗВЛЕЧЕНИИ МЕТАНА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕСКОВ МЕСТНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Специальность 25.00.20 – «Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Кемерово 2020

Работа выполнена на кафедре теоретической и геотехнической механики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева».

Научный руководитель	Хямяляйнен Вениамин Анатольевич доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и геотехнической механики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»
Официальные оппоненты	Сердюков Сергей Владимирович доктор технических наук, заведующий лабораторией физических методов воздействия на массив горных пород Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН)
	Козырева Елена Николаевна кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории газодинамики угольных месторождений Института угля Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» (ИУ ФИЦ УУХ СО РАН)
Ведущая организация	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»)

Защита состоится 21.01.2021 г. в 11:00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.102.02 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28; тел./факс: (384-2) 39-69-60; e-mail: kuzstu@kuzstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» и на сайте организации:

<http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2020/bma/Dissertation.pdf>

Автореферат разослан « » ноября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



М. А. Тюленев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Растущие объемы добычи метана из угольных пластов в мире, а также его значительные ресурсы в угольных бассейнах России и признание метана угольных пластов самостоятельным полезным ископаемым обуславливают актуальность и практическую направленность научно-исследовательских работ в этой области. Наиболее перспективным и подготовленным регионом для добычи метана угольных пластов в России является Кузнецкий угольный бассейн, где с 2009 года ООО «Газпром добыча Кузнецк» реализует проект по разработке Галдинской и Нарыкско-Осташкинской площадей. Задачей проекта является промышленная добыча метана угольных пластов в объеме до 4 млрд. куб. метров в год. Всё большую актуальность приобретают также вопросы увеличения метаноотдачи при дегазации угольных пластов с целью снижения газоопасности добычи угля в шахтах.

Особенности нахождения и перемещения метана в веществе угля определяют необходимость применения специальных методов интенсификации газоотдачи для его эффективного извлечения из угольных пластов. Наиболее широко в качестве такого метода используется гидравлический разрыв пласта. Несмотря на долгую и успешную историю применения гидроразрыва при разработке традиционных месторождений нефти и газа, результаты его применения при промысловой добыче метана из угольных пластов и их дегазации при отработке угольных месторождений часто оказываются неудовлетворительными и не соответствуют ожиданиям. Как показала практика разработки кузбасских метаноугольных промыслов, необходима адаптация методов интенсификации к условиям конкретных месторождений и снижение экономических затрат на их реализацию.

Одним из важнейших вопросов гидроразрыва пласта является закрепление создаваемых трещин разрыва расклинивающим агентом (закрепляющим материалом) – пропантом, обеспечивающим необходимую проницаемость закрепленной трещины гидроразрыва. Рынок пропантов в нашей стране представлен несколькими компаниями, которые находятся на большом расстоянии от метаноугольного промысла. С целью уменьшения стоимости закрепляющего материала, очевидно, целесообразно использовать местные пески. При этом необходимо провести исследование физических свойств кварцевых песков местных месторождений, обосновать параметры и возможность их использования при операциях гидроразрыва угольных пластов с учетом особенностей фильтрации транспортирующей жидкости в угольный пласт.

Работа выполнена в соответствии с планами НИР КузГТУ по Госзаданию № 2014/76 (НИР № 598); при поддержке гранта Фонда содействия инновациям по договору № 187ГУ1/2013 от 10.10.2013 г. и № 7983ГУ2/2015 от 23.11.2015 г.; при поддержке гранта АО «СУЭК–Кузбасс».

Цель работы: обоснование параметров процесса закрепления трещин гидроразрыва угольных пластов при извлечении метана с использованием песков местных месторождений, обеспечивающих повышение проницаемости и метаноотдачи.

Объект исследований: технология интенсификации метаноотдачи угольных пластов методом гидроразрыва.

Предмет исследований: процесс закрепления трещин гидроразрыва угольных пластов.

Идея работы состоит в использовании в качестве закрепляющего материала кварцевого песка местных месторождений и учете особенностей проявления его физических свойств при фильтрации транспортирующей жидкости разрыва в проницаемый угольный пласт.

Задачи исследований:

- разработка методики гидродинамического расчета процесса закрепления трещин гидроразрыва угольных пластов;
- определение физических свойств кварцевых песков местных месторождений;
- обоснование и разработка рекомендаций по закреплению трещин гидроразрыва угольных пластов.

Методы исследований: аналитический обзор и обобщение научно-информационных источников, патентов, нормативно-технических документов; анализ промысловых материалов; классические методы теории фильтрации, с использованием элементов физического моделирования; лабораторные исследования; статистическая и аналитическая обработка полученных результатов.

Научные положения, защищаемые в диссертации:

– интенсивность фильтрации транспортирующей жидкости в угольный пласт линейно зависит от коэффициента проницаемости пласта и кубически от раскрытия трещины гидроразрыва, незначительно зависит от давления на скважине и линейно влияет на фазовую проницаемость трещины разрыва, при этом в горизонтальной трещине значение интенсивности фильтрации в 2–8 раз больше, чем в вертикальной и может достигать 90 %;

– массовая доля гранул песка, разрушенных под действием сжимающей нагрузки, линейно уменьшается с увеличением насыпной плотности песка, при этом насыпная плотность песков местных месторождений возрастает с увеличением фракции и находится в диапазоне от 1,20 до 1,58 г/см³;

– применение песков местных месторождений фракций от (0,8 – 0,4) мм до (0,4 – 0,2) мм и учет гидродинамических особенностей движения гидросмеси в трещине разрыва обеспечивают ее проницаемость в пределах $(42 - 112) \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ и увеличение дебита скважины в 1,5–2 раза при проведении гидроразрыва угольных пластов проницаемостью менее $10 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ на глубине до 1400 м.

Научная новизна работы заключается:

- в оценке интенсивности фильтрации транспортирующей жидкости из трещины разрыва в зависимости от проницаемости угольного пласта и геометрии области фильтрации, учете их проявления при оценке фазовой проницаемости трещины;
- в определении диапазона показателя степени раздавливания местных песков с учетом изменения насыпной плотности в процессе закрепления трещин разрыва;
- в определении проницаемости закрепленной местными песками трещины разрыва с учетом влияния свойств и условий залегания угольных пластов, определении расхода гидросмеси на скважине с учетом фильтрации транспортирующей жидкости в угольный пласт и физических свойств песков местных месторождений.

Обоснованность и достоверность научных результатов подтверждается:

- корректностью применения методов гидродинамического моделирования и использования классических методов решения задач математической физики;
- достаточным объемом экспериментальных исследований физических свойств песков местных месторождений (42 пробы, около 800 экспериментов);
- использованием сертифицированного лабораторного оборудования и стандартизированных экспериментальных методов исследования.

Личный вклад автора заключается:

- в анализе современного состояния используемых технических и технологических решений по извлечению метана угольных пластов и их дегазации;
- в построении математической модели течения гидросмеси в трещине гидроразрыва и выполнении численных расчетов основных гидродинамических параметров процесса закрепления трещин гидроразрыва, их обработке и анализе;
- в анализе сырьевой базы месторождений природных песков и песчано-гравийного материала Кемеровской области и ближайших регионов, отборе проб, экспериментальных исследованиях по определению физических свойств песка;
- в разработке и изготовлении лабораторной установки, составлении методики и проведении испытаний по определению коэффициента проницаемости закрепленных песком трещин гидроразрыва;
- в формулировании результатов исследований в виде выводов и методических рекомендаций по выбору кварцевых песков для закрепления трещин гидроразрыва на метаноугольных месторождениях.

Научное значение работы состоит в разработке методики расчета интенсивности фильтрации транспортирующей жидкости в угольный пласт и определении условий применения закрепляющего материала в трещинах разрыва.

Отличие от ранее выполненных работ состоит в учете особенностей проявления свойств закрепляющих материалов в гидродинамическом расчете процесса закрепления трещин гидроразрыва угольных пластов, в определении физических свойств местных песков и проницаемости закрепленных ими трещин.

Практическая ценность работы:

– выявлены наиболее перспективные местные месторождения кварцевых песков для закрепления трещин гидроразрыва на метаноугольных месторождениях Кузбасса – «Зеленая зона» (Кемеровская область) и «Виленское» (Томская область);

– разработаны методические рекомендации по определению состава и физических свойств песка, планируемого к использованию для гидроразрыва угольных пластов, определению проницаемости закрепленных песком трещин, расчету основных гидродинамических параметров процесса закрепления трещин гидроразрыва.

Реализация работы. Основные научно-практические положения диссертации изложены в методическом документе «Методические рекомендации по выбору кварцевых песков для закрепления трещин гидроразрыва на метаноугольных месторождениях Кузбасса / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева», ООО «Газпром добыча Кузнецк». – Кемерово, 2019. – 32 с.», принятом к применению ООО «Газпром добыча Кузнецк».

Результаты исследований используются в учебном процессе КузГТУ при изучении следующих дисциплин: «Методы интенсификации газоотдачи и эксплуатация скважин», «Физические процессы в нетрадиционных геотехнологиях».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: XIII, XV, XVI Международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс» (Кемерово, 2010, 2014, 2016); XIV, XV Международной научно-практической конференции «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности» (Кемерово, 2012, 2013); VI, VII, VIII, XI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Россия молодая» (Кемерово, 2014, 2015, 2016, 2019); The 7th China-Russia Symposium «Chinese Coal in the 21st Century: Mining, Green and Safety» (Qingdao, China, 2014); The 8th Russian-Chinese Symposium «Coal in the 21st Century: Mining, Processing, Safety» (Кемерово, 2016); I, IV, V Научно-практической конференции молодых специалистов и работников «Проблемы извлечения метана из угольных пластов» (Кемерово, 2012, 2015, 2016); II, IV Международном инновационном горном симпозиуме (Кемерово, 2017, 2019).

Публикации. Основные результаты научных исследований по теме диссертации представлены в 20 опубликованных работах, в том числе 4 в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, получен 1 патент на изобретение и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 187 наименований, 4 приложений, изложена на 137 страницах машинописного текста, содержит 22 рисунка и 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен анализ состояния проблемы извлечения метана из угольных пластов.

Значительные ресурсы метана угольных пластов (МУП) и необходимость снижения объема его выделения в горные выработки определяют потребность в разработке новых и совершенствовании существующих методов дегазации на угольных шахтах и промышленной добычи метана из нетронутых угольных пластов. Ресурсы МУП в России оцениваются в 84 трлн. м³, из которых 13,1 трлн. м³ сосредоточены в Кузнецком бассейне (до глубины 1800 м). В 1998 году в Кемеровской области на Талдинской площади была предпринята первая попытка промышленного освоения метаноугольных месторождений России. Начиная с 2009 г. к настоящему времени пробурено порядка 30 скважин; планируемый первоочередной уровень добычи – 4 млрд. м³ в год. Мировым лидером промышленного освоения ресурсов угольного метана являются США, где объем его добычи составляет около 60 млрд. м³ в год.

Значительный вклад в развитие теории и практики извлечения метана из угольных пластов внесли: Айруни А. Т., Гергерт В. В., Голицын М. В., Дрижд Н. А., Забурдяев В. С., Зайденварг В. Е., Зимаков Б. М., Золотых С. С., Каркашадзе Г. Г., Козырева Е. Н., Коликов К. С., Малышев Ю. М., Натура В. Г., Ножкин Н. В., Президент Г. М., Пучков Л. А., Рубан А. Д., Сердюков С. В., Сластунов С. В., Стронский Н. М., Трубецкой К. Н., Хрюкин В. Т., Чернов О. И., Ярунин С. А., Aminian K., Arnold E., Dugan T., Herrington M. R., Hollub V. A., Logan T. L., Montgomery C. T., Mullen M., Palmer D. I., Perkins T. K., Ramurthy K., Rodvelt G., Rogers R. E., Rudy E. R., Schafer P. S., Schatzel S., Seidle J., Sööt P. M., Thakur P., Xingjin Wang и другие.

По существующим представлениям до 80–95 % от общего объема МУП составляет связанный сорбированный метан. Особенности нахождения и перемещения метана в веществе угля определяют необходимость применения специальных методов внешнего воздействия для его промышленного извлечения. В мировой практике для стимуляции производительности скважин при промысловой добыче метана из угольных пластов наиболее часто используется гидравлический разрыв пласта (ГРП). На всех скважинах Талдинского и Нарыкско-Осташкинского метаноугольных промыслов Кузбасса в качестве метода интенсификации был применен ГРП. Анализ накопленной информации по эксплуатации этих скважин показал, что фактические среднесуточные дебиты значительно ниже ожидаемых. Одним из важнейших вопросов гидроразрыва является закрепление создаваемых трещин. В связи с этим актуальной задачей является выбор подходящего пропанта и определение основных гидродинамических параметров процесса закрепления трещин разрыва.

На рынке представлены две группы закрепляющих материалов – кварцевые пески и искусственные пропанты (керамические и полимерно-покрытые). Несмотря

на более чем 70-летнюю историю применения ГРП, отсутствуют единые научно-обоснованные рекомендации по подбору материала для закрепления трещин гидроразрыва. Распространенный принцип выбора основан лишь на глубине залегания пласта. В результате имеют место факты нерационального выбора закрепляющего материала. Например, использование прочного керамического пропанта при проведении операций гидроразрыва низкопроницаемых угольных пластов, залегающих на небольших глубинах (менее 1000 м) на метанугольных промыслах Кузбасса, а также Карагандинского угольного бассейна (Республика Казахстан). Или проведение кластерного гидроразрыва пласта глубиной залегания более 2500 м с использованием кварцевого песка на Южно-Приобском нефтяном месторождении. В нашей стране рынок пропантов представлен всего несколькими компаниями, большинство из которых предлагают керамические пропанты, что обусловлено глубинами залегания разрабатываемых и перспективных месторождений углеводородов в России – более 2000 м. Этим можно и объяснить слаборазвитый рынок кварцевого песка ГРП. Все эти компании находятся на большом расстоянии от метанугольных промыслов Кузбасса (Нижегородская, Новгородская, Свердловская и Иркутская области). С целью уменьшения стоимости закрепляющего материала, очевидно, целесообразно использовать местные пески, для чего необходимо обоснование пригодности их свойств для закрепления трещин гидроразрыва угольных пластов.

Эффективность транспортировки и размещения пропанта в трещине разрыва определяется в основном его плотностью, видом рабочей жидкости, скоростью потока гидросмеси в трещине разрыва и интенсивностью фильтрации транспортирующей жидкости в угольный пласт. При операциях по гидроразрыву угольных пластов используются обычно такие жидкости, как вода, линейные гели, структурированные (сшитые) гели и пенные системы на водной основе. Опасность повреждения продуктивного пласта гелем обуславливает использование воды в качестве рабочей жидкости. Учитывая низкую вязкость воды, в качестве расклинивающего агента используется кварцевый песок. При этом гидроразрыв с применением воды значительно дешевле, чем с применением геля или пены. Особенностью ГРП с применением воды является более интенсивная фильтрация (фильтрационная утечка) рабочей жидкости в угольный пласт по сравнению с гелями, что приводит к снижению скорости потока, а достаточно высокая скорость потока гидросмеси является ключевым условием транспортировки песка вдоль трещины и, следовательно, заполнения требуемого интервала трещины расклинивающим агентом. Учитывая выше отмеченное, имеется необходимость корректного определения критической скорости течения гидросмеси и учета фильтрации жидкости-носителя в угольный пласт при проектировании и проведении операций гидроразрыва угольных пластов.

По результатам анализа состояния изученности вопроса сформулированы цель работы и задачи исследований.

Вторая глава посвящена разработке методики гидродинамического расчета основных параметров процесса закрепления трещин гидроразрыва угольных пластов, включающей определение критической скорости потока гидросмеси в трещине разрыва и интенсивности фильтрации транспортирующей жидкости в угольный пласт.

При рассмотрении движения потока гидросмеси в трещине разрыва от скважины необходимо учитывать падение скорости за счет фильтрации транспортирующей жидкости в угольный пласт и осесимметричности (радиальности) течения.

Под критической (минимальной безосадочной) скоростью $v_{кр}$ понимают ту минимальную среднюю скорость движения гидросмеси, при которой возможно в данных условиях транспортирование твердых веществ полностью во взвешенном состоянии без оседания их на дно потока. Основные исследования в области движения жидкости с включенными в нее твердыми частицами были проведены Алексеевым М. И., Великановым М. А., Калицуном В. И., Кнороза В. С., Куприным А. И., Кургановым А. М., Майоровым А. Е., Смолдыревым А. Е., Трайнисом В. В., Федоровым Н. Ф., Хямяляйненом В. А., Юфиным А. П., Яковлевым С. В. и другими.

Анализ структур существующих формул для определения параметров движения гидросмеси показывает, что они получены, в основном, на основе моделей плоского течения без учета фильтрации жидкой фазы в проницаемые стенки. Наиболее подходящей моделью, учитывающей двухфазность гидросмеси, радиальность течения, фильтрацию транспортирующей жидкости в проницаемый угольный пласт, является фильтрационная модель течения двухфазной водотвердой суспензии в трещиновато-пористой среде Хямяляйнена В. А., используемая при исследовании движения тампонажных растворов.

Для решения поставленной задачи нами используется инженерный эмпирический метод, основанный на классических понятиях теории подобия и анализа размерностей. Учитывая физику процесса перемещения гидросмеси в трещине разрыва, использованы общепринятые гидродинамические критерии подобия: число Рейнольдса (Re), число Эйлера (Eu), числа Фруда для транспортирующей жидкости (Fr) и пропанта (Fr^*). Гидродинамические сопротивления движению гидросмеси в трещине разрыва представлены в виде суммы сопротивлений движению транспортирующей жидкости и дополнительных сопротивлений, возникающих при транспортировании пропанта. Общая структура формулы для определения дополнительных сопротивлений получена с использованием π -теоремы теории анализа размерностей. Для определения полных гидродинамических сопротивлений получено выражение

$$I = \frac{\lambda v^2 \gamma_{ж}}{g \delta} + \frac{(g \delta)^{1/6} u^2 \rho_{ж}}{v^{1/3} d_{cp}} a s_m, \quad (1)$$

где λ – коэффициент гидродинамического сопротивления трещины разрыва течению транспортирующей жидкости; v – скорость движения в трещине разрыва транспортирующей жидкости, м/с; $\gamma_{ж}$ – удельный вес транспортирующей жидкости, Н/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²; δ – раскрытие трещины разрыва, м; u – гидравлическая крупность пропанта, м/с; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность транспортирующей жидкости, кг/м³; $a = (\rho_{\text{T}} - \rho_{\text{ж}})/\rho_{\text{ж}}$ – относительная плотность; ρ_{T} – плотность пропанта, кг/м³; $s_m = m_{\text{T}}/(m_{\text{T}} + m_{\text{ж}})$ – массовая концентрация пропанта в гидросмеси; m_{T} – масса сухого пропанта в единице объема гидросмеси, кг; $m_{\text{ж}}$ – масса жидкости в этом же объеме гидросмеси, кг; d_{cp} – средневзвешенный диаметр частицы пропанта, м.

Исследуя предложенную зависимость $I(v)$ (1) на минимум, получено следующее выражение для определения критической скорости

$$v_{\text{кр}} = k \sqrt{g\delta} \left(\frac{u^2}{6\lambda g d_{\text{cp}}} a s_m \right)^{3/7}, \quad (2)$$

где k – безразмерный поправочный эмпирический коэффициент, $k = 1,25$.

В таблице 1 представлены некоторые результаты численных расчетов критической скорости движения гидросмеси в трещине разрыва при следующих исходных данных: $\rho_{\text{ж}} = 1000$ кг/м³; $\rho_{\text{T}} = 2650$ кг/м³; $Re = 500$; $d_{\text{cp}} = 0,0008$ м; $u = 0,086$ м/с.

Таблица 1 – Результаты вычислений критической скорости движения гидросмеси

$\delta \cdot 10^3$, м	Критическая скорость движения гидросмеси в трещине разрыва $v_{\text{кр}}$, м/с, при различной концентрации песка в транспортирующей жидкости, кг/м ³									
	50	100	150	200	250	300	400	600	800	1000
3	0,20	0,27	0,31	0,34	0,37	0,40	0,43	0,49	0,52	0,55
4	0,23	0,31	0,36	0,40	0,43	0,46	0,50	0,56	0,60	0,64
5	0,26	0,34	0,40	0,44	0,48	0,51	0,56	0,63	0,68	0,71
6	0,28	0,37	0,44	0,49	0,53	0,56	0,61	0,69	0,74	0,78
7	0,31	0,40	0,47	0,53	0,57	0,60	0,66	0,74	0,80	0,84
8	0,33	0,43	0,51	0,56	0,61	0,65	0,71	0,79	0,85	0,90
9	0,35	0,46	0,54	0,60	0,64	0,68	0,75	0,84	0,91	0,95
10	0,37	0,48	0,56	0,63	0,68	0,72	0,79	0,89	0,96	1,00

Для оценки расхода транспортирующей жидкости в угольный пласт построена приближенно-аналитическая модель течения гидросмеси в трещине разрыва с проницаемыми стенками и ее фазовой проницаемостью. За основу взяты общие методические подходы исследования интенсивности отфильтровывания жидкой фазы водотвердых суспензий при тампонаже трещиновато-пористых горных пород. Для упрощения получения аналитического решения рассмотрено течение транспортирующей жидкости в трещине разрыва, удовлетворяющее линейному закону движения Дарси. При этом коэффициент фазовой проницаемости трещины $k_{\text{ж}}$, м², представлен в виде монотонно убывающей функции длины потока r

$$k_{\text{ж}} = \frac{\delta^2}{12} C_s \sigma \frac{R_{\text{ск}}}{r}, \quad (3)$$

где C_s – коэффициент учета плотности упаковки пропанта в трещине; σ – объемная концентрация транспортирующей жидкости в гидросмеси; $R_{\text{ск}}$ – радиус скважины, м.

Совместное рассмотрение уравнений движения и неразрывности с учетом (3) в двумерной осесимметричной постановке приводит к необходимости решения соответствующей краевой задачи математической физики. Конкретно задача сводится к решению следующего уравнения для функции давления в трещине $P(r, z)$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_{\text{ж}} \frac{\partial P}{\partial r} \right) + k_{\text{ж}} \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0 \quad (4)$$

при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} P = P_{\text{ск}}, r = R_{\text{ск}}, z \in [0, \delta]; & \quad P = P_{\text{к}}, r = R_{\text{к}}, z \in [0, \delta]; \\ \frac{\partial P}{\partial z} = 0, r \in [R_{\text{ск}}, R_{\text{к}}], z = 0; & \quad \frac{\partial P}{\partial z} + \alpha(P - P_0) = 0, r \in [R_{\text{ск}}, R_{\text{к}}], z = \delta, \end{aligned} \quad (5)$$

где r, z – цилиндрические координаты; $R_{\text{к}}$ – радиус трещины разрыва (радиус распространения транспортирующей жидкости), м; $P_{\text{ск}}, P_{\text{к}}$ – давление транспортирующей жидкости соответственно на входе в трещину (в скважине) и контуре $R_{\text{к}}$, Па; P_0 – давление в соседней трещине или полости, Па; $\alpha = k_y / (k_{\text{ж}} h)$ – коэффициент, учитывающий особенности фильтрации транспортирующей жидкости в проницаемый угольный пласт; k_y – коэффициент проницаемости угольного пласта до разрыва, м^2 ; h – толщина фильтрующего слоя угольного пласта, м.

Определив распределение давления $P(r, z)$ в трещине, можно найти расходы транспортирующей жидкости на скважине (на входе в трещину) $Q_{\text{ск}}$ и контуре $Q_{\text{к}}$. Относительный расход фильтрующейся в угольный пласт транспортирующей жидкости определен по формуле

$$\eta = \frac{Q_{\text{ск}} - Q_{\text{к}}}{Q_{\text{ск}}}. \quad (6)$$

Решение уравнения (4) при граничных условиях (5) получено классическим методом разделения переменных Фурье в виде ряда, сходимость которого доказана численно. Рассмотренная задача реализована также в одномерной постановке в виде плоской радиальной осесимметричной задачи. При этом для практических расчетов параметров гидроразрыва выражение (6) получено в конечной форме

$$\eta = \frac{6k_y R_{\text{к}}^3 [(P_{\text{к}} + P_{\text{ск}})/2 - P_0]}{\delta^3 C_S \sigma h R_{\text{ск}} (P_{\text{ск}} - P_{\text{к}}) + k_y R_{\text{к}}^3 (3P_{\text{ск}} + 2P_{\text{к}} - 5P_0)}. \quad (7)$$

В аналогичной постановке рассмотрена задача по оценке интенсивности фильтрации транспортирующей жидкости в вертикальной трещине разрыва. При этом задача сведена к решению уравнения Лапласа для определения функции давления $P(x, y)$ при плоскопараллельном течении транспортирующей жидкости в трещине

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (8)$$

где x, y – прямоугольные координаты, соответствующие направлению развития трещины разрыва от скважины и направлению, перпендикулярному плоскости трещины.

В одномерной постановке получено выражение для оценки интенсивности фильтрации транспортирующей жидкости в проницаемый угольный пласт из вертикальной трещины разрыва

$$\eta = \frac{12k_y R_k^2 [(P_k + P_{ck})/2 - P_o]}{\delta^3 C_S \sigma h (P_{ck} - P_k) + 2k_y R_k^2 (3P_{ck} + 2P_k - 5P_o)}. \quad (9)$$

На рисунке 1 в виде графиков представлены некоторые результаты расчетов интенсивности фильтрации транспортирующей жидкости в угольный пласт при следующих исходных данных: $P_{ck} = 25$ МПа; $P_k = P_o = 5,5$ МПа; $R_k = 0,076$ м; $\sigma = 0,9$.

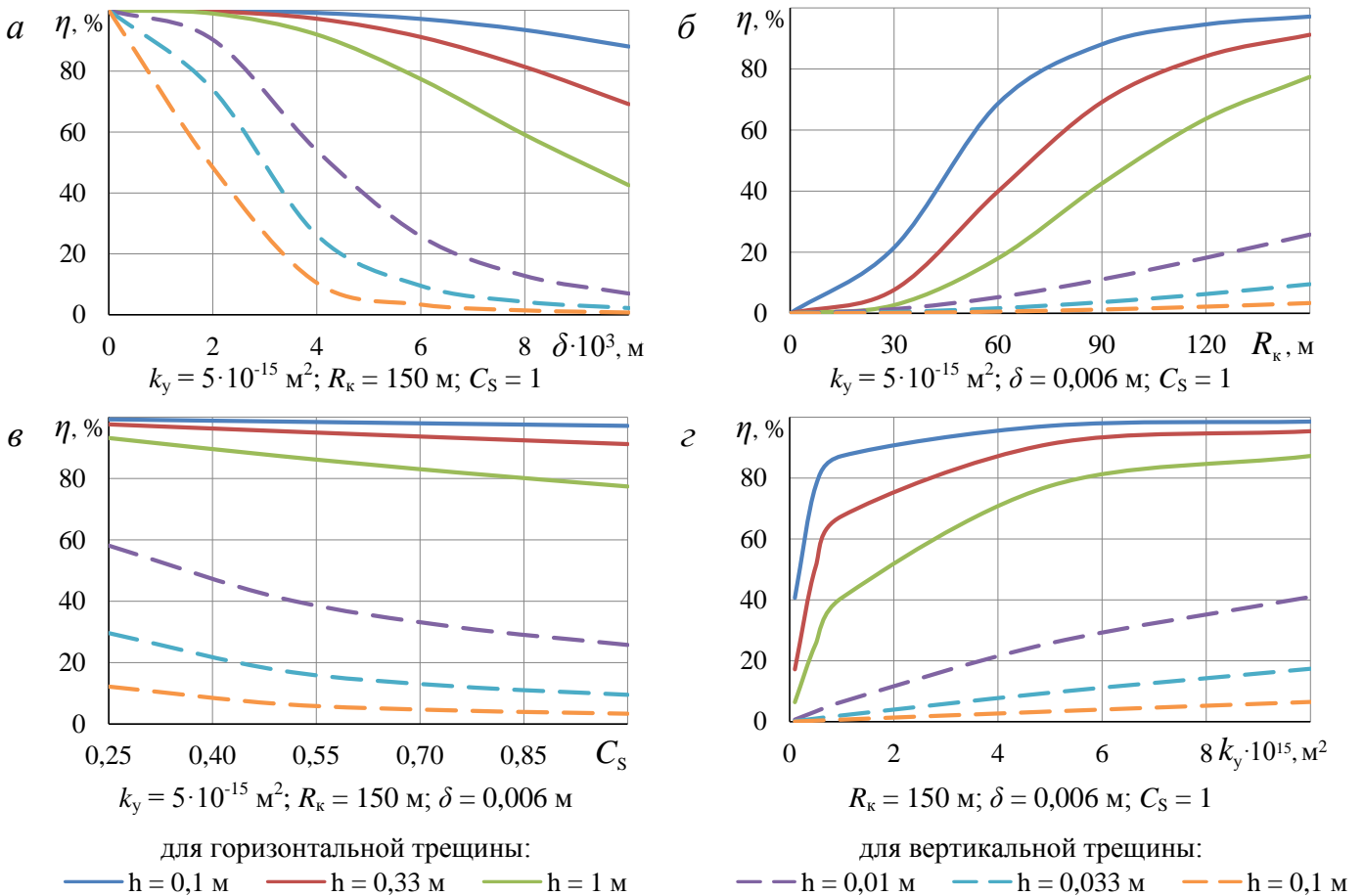


Рисунок 1 – Зависимости интенсивности фильтрации транспортирующей жидкости от раскрытия трещины разрыва (а), радиуса (полудлины) трещины (б), плотности упаковки пропанта в трещине (в) и проницаемости угольного пласта (г)

Можно заключить, что величина интенсивности фильтрации η возрастает с увеличением значений k_y , R_k и с уменьшением значений δ , h и C_S ; зависимость от давления на скважине незначительна (приняв в (9) $P_k = P_o = 0$, получим полное отсутствие этого влияния). Интенсивность фильтрации при течении гидросмеси в горизонтальной трещине больше по сравнению с течением в вертикальной трещине.

Разработанная методика определения $v_{кр}$ и η позволяет более обоснованно определять режимы подачи гидросмеси и концентрацию пропанта в ее составе.

Полученные результаты позволили сформулировать первое научное положение.

В третьей главе приведены методики и результаты исследований физических свойств песков месторождений Кемеровской области и ближайших регионов.

Основываясь на данных о размерах и промышленной освоенности, для исследований были отобраны пробы 22 месторождений песков и песчано-гравийных смесей Кемеровской области, 3 месторождений Томской области и 2 месторождений Алтайского края. Кроме этого, был испытан песок ГРП 40/70 Игирминского месторождения (п. Янгель, Иркутская обл.), а также песок ГРП Unifrac 30/50 производства ООО «Сибелко Рус» (п. Неболчи, Новгородская обл.). Эти пески были выбраны для сравнения. С этой же целью был исследован песок ГРП 30/70, который использовался при гидроразрыве угольных пластов месторождения Фукан (Синьцзян-Уйгурский автономный район, КНР).

Песчаные и песчано-глинистые породы редко можно исследовать без предварительной обработки вследствие присутствия хемотропного и биогенного вещества и слипания отдельных обломочных частиц в более крупные агрегаты. Промывка проб показала, что в естественном состоянии пески содержат значительное количество пылевидных и глинистых частиц – от 10 до 30 %. Учитывая, что к чистоте закрепляющих материалов предъявляются высокие требования, можно заключить о необходимости обогащения песков рассмотренных местных месторождений.

После предварительной промывки было выполнено определение гранулометрического состава отобранных проб, при этом использовали сита с круглыми отверстиями диаметрами 5,0 и 2,5 мм и сита проволочные со стандартными квадратными ячейками № 1,25; 1,2; 08; 063; 04; 0315; 02; 016; 01 по ГОСТ 6613. На рисунке 2 представлена суммарная гистограмма, отражающая результаты выполненных гранулометрических анализов.

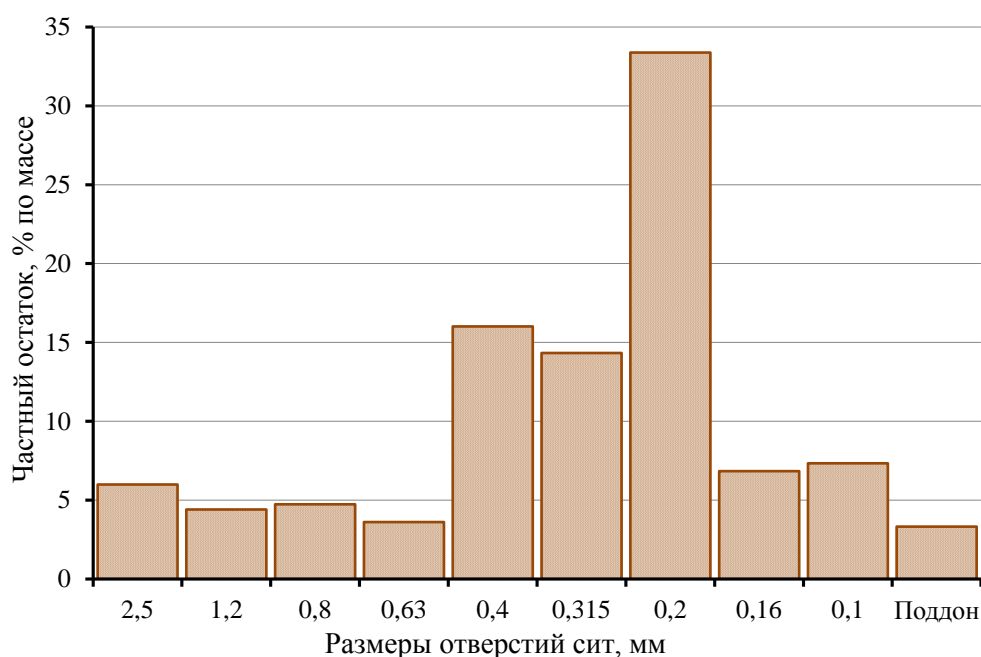


Рисунок 2 – Суммарная гистограмма гранулометрических анализов промытых проб

Основываясь на полученных результатах гранулометрического анализа и учитывая чаще всего используемые фракции пропанта, для дальнейших исследований были отобраны пески следующих фракций: (1,2 – 0,8) мм, (0,8 – 0,4) мм, (0,4 – 0,2) мм и (0,2 – 0,1) мм. При этом следует отметить дефицит крупных фракций песка ($\geq 0,63$ мм) в изученных пробах.

Проницаемость трещин гидроразрыва напрямую связана с продуктивностью скважин. В свою очередь существует взаимосвязь между проницаемостью зернистого сыпучего материала и его пористостью (пустотностью). Для расчета пустотности необходимо определить насыпную и истинную плотности. Истинную плотность определяли, используя пикнометрический метод. Результаты показали, что насыпная плотность местных песков ρ_n изменяется от 1,20 до 1,58 г/см³, истинная плотность ρ_t – от 2,55 до 2,70 г/см³, пустотность – от 37,8 до 54,2 %. Эти данные используют в других исследованиях, а также при расчете некоторых параметров ГРП.

На проницаемость закрепленной трещины гидроразрыва существенно влияет разрушение зерен закрепляющего материала в трещине под действием напряжения сжатия. При механическом воздействии на песчаный материал в первую очередь происходит разрушение агрегатов обломочных частиц и механически нестойких компонентов. Также на интенсивность разрушения влияет размер зерен, их форма, невидимые дефекты, температура, химический состав и пр. Поэтому при выборе закрепляющего материала необходимо учитывать способность его зерен сопротивляться разрушению. Все отобранные фракции подвергли испытаниям по определению показателя степени раздавливания («Crush Resistance Test», краш-тест). Суть метода заключается в следующем. Рассчитанное количество просеянного песка засыпают в специальную ячейку для раздавливания. Затем ячейку помещают в машину для испытаний на сжатие. Увеличивают давление до достижения рекомендуемого значения (20,7; 27,6 или 34,5 МПа) и поддерживают его в течение 2 мин. Далее переносят содержимое ячейки на набор сит. После отсева взвешивают разрушенные гранулы из поддона. Показатель степени раздавливания f в процентах вычисляли по формуле

$$f = \frac{m_{\text{раз}}}{m_n} \cdot 100, \quad (10)$$

где $m_{\text{раз}}$ – масса разрушенных гранул, г; m_n – масса навески для испытаний, г.

Результаты определения показали, что для подавляющего большинства проб с уменьшением фракции песка показатель степени раздавливания уменьшается (даже с учетом увеличивающегося давления испытаний). Это объясняется в первую очередь снижением удельной нагрузки, приходящейся на каждое зерно.

Сопоставляя результаты экспериментов, была выявлена линейная взаимосвязь с отрицательным угловым коэффициентом между показателем степени раздавливания и насыпной плотностью песка (рисунок 3).

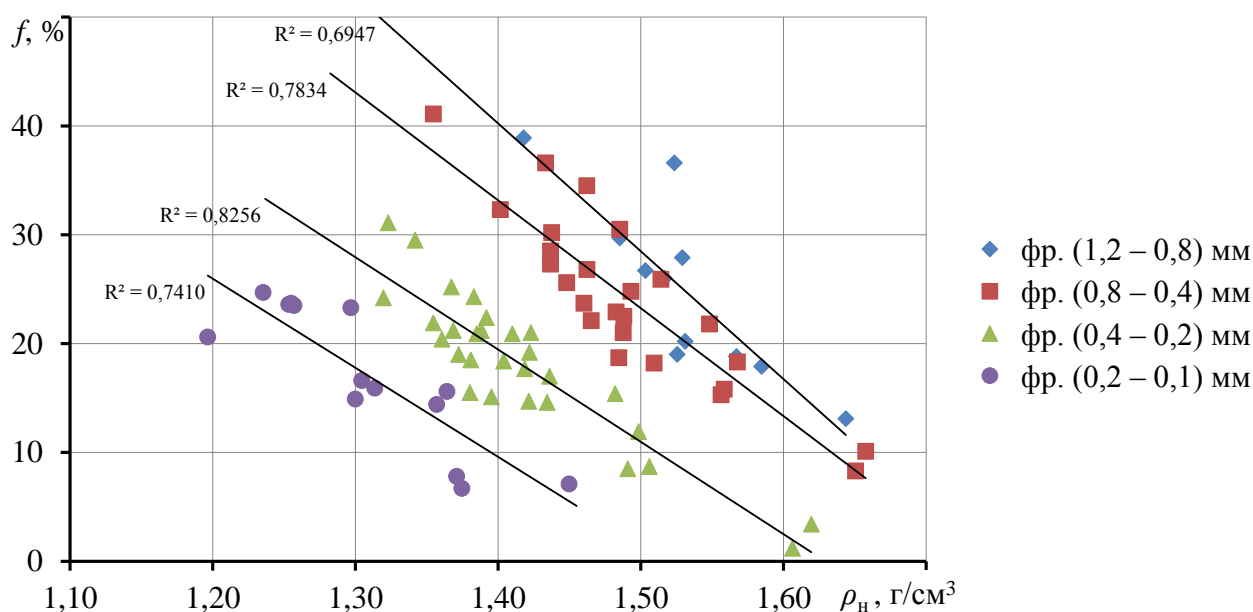


Рисунок 3 – Зависимости степени раздавливания песка от насыпной плотности

Объяснить это можно следующим. Низкие значения насыпной плотности при прочих равных условиях обусловлены угловатой неокатанной формой зерен. При механическом воздействии происходит интенсивное разрушение таких зерен с образованием значительного количества преимущественно мелких осколков. Такие осколки способны заполнить межзерновое пространство, что приведет к снижению проницаемости закрепленной таким песком трещины. Пески с преобладанием окатанных зерен изначально имеют более высокие значения насыпной плотности и, как показывают данные, более прочные, а при их разрушении образуются в основном крупные осколки и небольшое количество мелких частиц.

Принимая во внимание полученные результаты, для определения проницаемости закрепленной трещины были выбраны 15 проб песка фракции (0,8 – 0,4) мм с наименьшими показателями степени раздавливания (до 26 %), которым соответствуют высокие значения насыпной плотности.

На основании полученных результатов сформулировано второе научное положение.

В четвертой главе изложены результаты разработки рекомендаций по закреплению трещин гидроразрыва угольных пластов.

В качестве критерия оценки применимости закрепляющих материалов (таких как местные пески) предложено использовать коэффициент проницаемости, который должна иметь закрепленная трещина гидроразрыва. Для определения необходимой проницаемости трещины гидроразрыва воспользовались параметром безразмерной проводимости трещины C_{fd} . Безразмерную проводимость трещины можно рассматривать как меру относительной легкости, с которой добываемые флюиды текут внутри трещины, в сравнении со способностью пласта поставлять флюиды

внутри этой трещины. Она связывает параметры трещины и продуктивного пласта и вычисляется по формуле

$$C_{fD} = \frac{k_f \cdot w_f}{k \cdot x_f}, \quad (11)$$

где k_f – коэффициент проницаемости закрепленной трещины, м^2 ; w_f – средняя расклиненная ширина (раскрытие) трещины, м; k – коэффициент проницаемости пласта, м^2 ; x_f – полудлина трещины, м.

Установлено (*Economides M. J.*), что максимальный дебит из скважины для фиксированного объема пропанта, намечаемого к закачке в пласт, будет обеспечен при оптимальном значении $C_{fD} = 1,6$. Допускаются и большие величины C_{fD} , однако после того как ее значение достигает 10, дальнейшее увеличение безразмерной проницаемости трещины экономически нецелесообразно.

В таблице 2 представлены результаты выполненных с использованием формулы (11) расчетов коэффициента проницаемости k_f , который должна иметь закрепленная трещина гидроразрыва при оптимальном значении C_{fD} . По этим данным можно определить для каких пластовых условий и какого дизайна ГРП подходит исследованный материал либо сделать вывод о невозможности его использования.

Таблица 2 – Результаты вычислений необходимой проницаемости закрепленной трещины гидроразрыва при оптимальном значении C_{fD}

Коэффициент проницаемости пласта $k \cdot 10^{15}, \text{м}^2$	Коэффициент проницаемости $k_f \cdot 10^{12}, \text{м}^2$, который должна иметь закрепленная трещина гидроразрыва различной полудлины $x_f, \text{м}$, и раскрытия $w_f, \text{м}$								
	50			100			150		
	0,004	0,0065	0,01	0,004	0,0065	0,01	0,004	0,0065	0,01
0,1	2	1,2	0,8	4	2,5	1,6	6	3,7	2,4
0,5	10	6	4	20	12	8	30	18	12
1	20	12	8	40	25	16	60	37	24
5	100	62	40	200	123	80	300	185	120
10	200	123	80	400	246	160	600	369	240
20	400	246	160	800	492	320	1200	738	480
50	1000	615	400	2000	1231	800	3000	1846	1200
100	2000	1231	800	4000	2462	1600	6000	3692	2400

Результаты расчетов с учетом фактического состояния российского рынка расклинивающих агентов показывают, что целевыми для проведения гидроразрыва (подходящими с точки зрения оптимального закрепления пропантом) являются угольные пласты проницаемостью менее $10 \cdot 10^{-15} \text{м}^2$, при этом в качестве пропанта может быть успешно использован песок. Для угольных пластов проницаемостью более $10 \cdot 10^{-15} \text{м}^2$ целесообразно применение других методов интенсификации.

В связи со сложностью изготовления образцов из угля для определения проницаемости закрепленной песком трещины гидроразрыва была использована разработанная в КузГТУ оригинальная лабораторная установка (рисунок 4), главной осо-

бенностью которой являются образцы, изготовленные из эквивалентного углю материала. Образцы изготавливали путем заливки цементного раствора определенного состава в специальную форму.

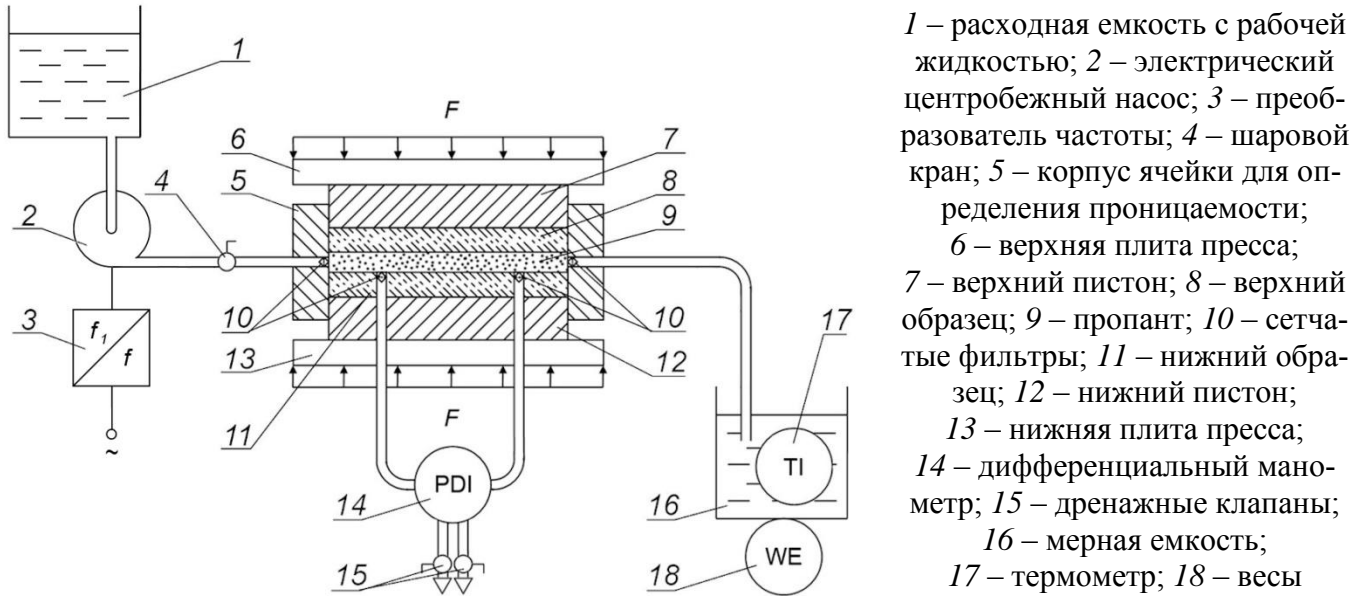


Рисунок 4 – Схема лабораторной установки для определения проницаемости закрепленной песком трещины гидроразрыва

Коэффициент проницаемости закрепленной трещины гидроразрыва k_f , м^2 , определяли при давлении 13,79; 27,58 и 41,37 МПа и вычисляли по формуле

$$k_f = \frac{Q \cdot \mu \cdot L}{\Delta P \cdot A}, \quad (12)$$

где Q – расход рабочей жидкости, замеренный на выходе из ячейки, $\text{м}^3/\text{с}$; μ – коэффициент динамической вязкости рабочей жидкости при данной температуре, Па·с; L – расстояние между портами подключения дифференциального манометра, м; ΔP – перепад давления по длине потока, Па; A – площадь поверхности сечения пачки песка, перпендикулярного направлению потока флюида, м^2 .

Было исследовано 15 проб песка фракции (0,8 – 0,4) мм, отобранных по результатам выполненных работ по определению их физических свойств. Сопоставляя полученные данные с данными, приведенными в таблице 2, все исследованные пробы были поделены на три группы (таблица 3). К первой группе отнесены пески, не удовлетворяющие условиям проведения операций ГРП. Пески второй группы могут быть применены для закрепления трещин гидроразрыва угольных пластов, залегающих на глубине до 700 м, а для некоторых условий, залегающих на глубине от 700 до 1400 м. Пески третьей группы (конечно, без учета китайского песка ГРП) могут быть рекомендованы к применению при проведении гидроразрыва угольных пластов, залегающих на глубине до 1400 м, а для некоторых условий, залегающих на глубине от 1400 до 1800 м. Для песков третьей группы дополнительно определили проницаемость трещин, закрепленных фракцией (0,4 – 0,2) мм.

Таблица 3 – Результаты лабораторных исследований проницаемости трещины гидроразрыва, закрепленной песком местных месторождений

Давление нагружения, МПа	Коэффициент проницаемости трещины гидроразрыва $k_f \cdot 10^{12}$, м ² , закрепленной песком фракции (0,8 – 0,4) мм различных месторождений														
	I группа				II группа						III группа				
	Жургаванское (Кемеровский р-он)	Бийский (г. Бийск, Алтайский край)	Абагуро-Атамановское (г. Новокузнецк)	Сидоровское (Новокузнецкий р-он)	Вознесенское (г. Асино, Томская обл.)	Кудровское (Томская обл.)	Сосновское (п. Смирновка, Новокузнецкий р-он)	Промышленное II (Промышленновский р-он)	Чулымский (Тяжинский р-он)	Яйское (Яйский р-он)	Зеленая зона (Ижморский р-он)	Виленское (Томская обл.)	Китай, Песок ГРП 30/70	Неболчи (Новгородская обл.), Песок ГРП Unifrac 30/50	Игирминское (Иркутская обл.), Песок ГРП 40/70
13,8	31,8	44,6	45,1	48,4	62,8	69,7	73,9	82,4	82,9	93,4	84,2	112,6	92,9	89,2	131,1
27,6	7,6	11,0	3,4	3,9	27,9	22,7	11,4	6,4	32,9	11,8	47,9	42,0	33,3	54,4	84,7
41,4	1,8	3,6	0,5	0,6	1,4	1,5	0,7	1,1	1,8	1,1	12,1	21,7	7,6	22,9	39,4

Таким образом, можно заключить, что наиболее перспективными местными месторождениями кварцевых песков для закрепления трещин гидроразрыва на метаноугольных месторождениях Кузбасса являются «Зеленая зона» (Кемеровская область) и «Виленское» (Томская область).

На основе результатов выполненных исследований разработаны обобщенные методические рекомендации по закреплению трещин гидроразрыва угольных пластов, включающие в себя следующее.

1. По данным геофизических и гидродинамических исследований скважин определяют параметры продуктивного угольного пласта – глубину залегания, мощность пласта, пластовое давление, коэффициент проницаемости и др.

2. Параметры геометрии трещины (в первую очередь – длину) определяют в процессе моделирования продуктивности скважины после гидроразрыва. При этом на размеры трещины накладываются экономические ограничения и, следовательно, количество пропанга, намечаемого к закачке, является фиксированным.

3. По формуле (11) определяют коэффициент проницаемости k_f , который должна иметь закрепленная трещина гидроразрыва при оптимальном значении C_{fD} . Учитывая глубину залегания продуктивного угольного пласта, выбирают закрепляющий материал, проницаемость которого при соответствующем давлении нагружения трещины близка или превышает вычисленное значение k_f .

4. С учетом физических свойств выбранного закрепляющего материала по формуле (2) определяют критическую скорость движения гидросмеси в трещине разрыва $v_{кр}$. При этом следует учесть, что на выбор концентрации пропанга в транспортирующей жидкости влияют потери давления на трение.

5. По формуле (7) или (9) определяют интенсивность фильтрации транспортирующей жидкости в угольный пласт η .

6. Расходом гидросмеси устанавливают такой режим, при котором фактическая скорость гидросмеси в трещине разрыва v должна быть равна или несколько выше критической скорости. Принимают $v = 1,2 v_{кр}$.

7. Необходимый расход гидросмеси на скважине (производительность насосных агрегатов) $Q_{ск}$, м³/мин, определяют по формуле

$$Q_{ск} = \frac{2 \cdot 60 \cdot v \cdot A_f}{(1 - \eta)}, \quad (13)$$

где множитель 2 учитывает две стороны трещины; 60 – переводной коэффициент; A_f – площадь поперечного сечения потока (трещины), м².

Оценка технико-экономической эффективности использования разработанных рекомендаций приведена в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты расчета технико-экономической эффективности и основные параметры процесса закрепления трещин гидроразрыва угольных пластов

Параметр	Значение	
	базовый вариант	предлагаемый вариант
Суммарная эффективная мощность продуктивных угольных пластов в скважине, м	50	
Коэф-т проницаемости продуктивных угольных пластов, м ²	$(0,1 - 5) \cdot 10^{-15}$	
Тип рабочей жидкости	вода + 4 % KCl	
Коэф-т динамической вязкости рабочей жидкости, Па·с	$(0,6 - 0,8) \cdot 10^{-3}$	
Общий объем рабочей жидкости, м ³	1 100	1 500
Общая масса KCl, кг	44 000	60 000
Тип закрепляющего материала	песок фракции (0,8 – 0,4) мм	
	Игирминское м-ие (Иркутская обл.)	м-ие «Зеленая зона» (Кемеровская обл.)
Насыпная плотность закрепляющего материала, г/см ³	1,66	1,49
Общая масса закрепляющего материала, кг	110 000	150 000
Концентрация закрепляющего материала в транспортирующей жидкости, кг/м ³	250	
Давление нагнетания рабочей жидкости/смеси на устье, МПа	35 – 45	
Расход рабочей жидкости/смеси на устье, м ³ /мин	4,0	5,8
Коэф-т проницаемости закрепленной трещины, м ²	$131,1 \cdot 10^{-12}$	$84,2 \cdot 10^{-12}$
Средняя ширина закрепленной трещины, м	0,0065	0,01
Полудлина закрепленной трещины, м	60	100
Дебит газа скважины с гидроразрывом пластов, м ³ /сут	3 011	5 256
Продолжительность работ (время закачки рабочей жидкости/смеси), ч	4,9	4,6
Фактическая трудоемкость работ по закачке рабочей жидкости/смеси, чел·ч	44,1	41,4
Стоимость работ по закачке рабочей жидкости/смеси и материалов (песок, KCl), руб.	968 050	860 700

Расчеты показывают, что применение разработанных рекомендаций при проведении гидроразрыва может позволить увеличить дебит скважины в 1,5–2 раза, при этом экономический эффект может составить более 100 тыс. руб. на одну скважину.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи по обоснованию параметров процесса закрепления трещин гидроразрыва угольных пластов при извлечении метана с использованием песков местных месторождений, включающее в себя учет особенностей фильтрации транспортирующей жидкости в угольный пласт и оценку физических свойств песков местных месторождений, обеспечивающих повышение проницаемости и метаноотдачи, что имеет существенное значение для промышленной добычи метана угольных пластов и совершенствования существующих методов дегазации на угольных шахтах.

Основные научные, практические результаты и рекомендации заключаются в следующем.

1. Для стимуляции производительности скважин при добыче метана угольных пластов следует использовать гидравлический разрыв пласта, при этом, с целью снижения экономических затрат на его реализацию и сохранения фильтрационных характеристик угольного пласта и закреплённой трещины разрыва, рекомендуется в качестве рабочей жидкости применять воду, а в качестве закрепляющего материала – кварцевый песок местных месторождений.

2. Условием транспортирования песка вдоль трещины разрыва является соответствие фактической скорости турбулентного потока гидросмеси в трещине разрыва критическому значению, которое зависит от физических свойств закрепляющего материала, его концентрации и геометрии трещины. При закреплении трещины гидроразрыва с раскрытием до 0,01 м кварцевым песком фракции (0,8 – 0,4) мм значение критической скорости составляет $v_{кр} \leq 1,0$ м/с. Для фракции (0,4 – 0,2) мм критическая скорость в 2 раза ниже.

3. В результате фильтрации транспортирующей жидкости в угольный пласт снижается фактическая скорость потока гидросмеси в трещине. Интенсивность фильтрации транспортирующей жидкости в угольный пласт линейно зависит от коэффициента проницаемости пласта и кубически от раскрытия трещины гидроразрыва, при этом в горизонтальной трещине значение интенсивности фильтрации в 2–8 раз больше, чем в вертикальной и может достигать 90 %.

4. Массовая доля гранул песка, разрушенных под действием сжимающей нагрузки, линейно уменьшается с увеличением насыпной плотности песка. Первоначально месторождения песков для использования при операциях гидроразрыва угольных пластов рекомендуется выбирать, основываясь на значении насыпной плотности – так, например, для фракции (0,8 – 0,4) мм насыпная плотность должна быть более $1,45$ г/см³.

5. Решение о применении песка при гидроразрыве угольных пластов следует принимать на основе значения коэффициента проницаемости закреплённых трещин

разрыва, который должен составлять $(42 - 112) \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$. При этом пески местных месторождений фракций от $(0,8 - 0,4) \text{ мм}$ до $(0,4 - 0,2) \text{ мм}$ рекомендуются для закрепления трещин гидроразрыва при извлечении метана из угольных пластов проницаемостью менее $10 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ на глубине до 1400 м.

6. Использование рекомендаций по закреплению трещин гидроразрыва угольных пластов позволяет определять необходимый расход гидросмеси и концентрацию закрепляющего материала в ее составе, что обеспечивает увеличение дебита скважины в 1,5–2 раза, при этом экономический эффект может составить более 100 тыс. руб. на одну скважину.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

В изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:

1. **Баёв, М. А.** Исследование закрепляющего материала трещин гидроразрыва при извлечении метана из угольных пластов / **М. А. Баёв**, В. А. Хямяляйнен // Вестник КузГТУ. – 2016. – № 6. – С. 68–72.
2. Хямяляйнен, В. А. О влиянии напряженно-деформированного состояния угольного пласта на проницаемость закрепленной трещины гидроразрыва / В. А. Хямяляйнен, **М. А. Баёв**, А. Г. Шевцов // Вестник КузГТУ. – 2017. – № 6. – С. 121–126.
3. **Баёв, М. А.** Критерий оценки применимости материала для закрепления трещин гидроразрыва угольных пластов Кузбасса / **М. А. Баёв** // Наука и техника в газовой промышленности. – 2017. – № 4. – С. 41–46.
4. Хямяляйнен, В. А. Гидродинамический расчет процесса закрепления трещин гидроразрыва / В. А. Хямяляйнен, **М. А. Баёв** // Вестник КузГТУ. – 2019. – № 4. – С. 90–98.

В изданиях, индексируемых в международных базах Web of Science, Scopus:

5. **Baev, M. A.** Modeling Peculiarities of Reinforced Crack of Hydraulic Fracture of Coal Seams for Estimation of Their Permeability / **M. A. Baev** // Proceedings of the Taishan Academic Forum – Project on Mine Disaster Prevention and Control. Qingdao, China, October 2014. – P. 361–365.
6. **Baev, M. A.** Research in the Propping Agent for the Hydraulic Fracturing Cracks for the Methane Extraction from the Massive Coal Seams / **M. A. Baev**, V. A. Khyamyalyaynen // Proceedings of the 8th Russian-Chinese Symposium «Coal in the 21st Century: Mining, Processing, Safety». Kemerovo, Russia, October 2016. – P. 330–332.
7. **Baev, M. A.** Stimulation of the Methane Production with the Use of Changing of the Rock Massif Physical Conditions / **M. A. Baev**, V. A. Khyamyalyaynen, A. G. Shevtsov // E3S Web Conf. – 2017. – Vol. 21. – Article No. 02018.
8. **Baev, M. A.** Geomechanical Assessment of the Effect of Inhomogeneities on the Propagation of Hydrofractures in Coal Seams / **M. A. Baev**, V. A. Khyamyalyaynen, A. G. Shevtsov // E3S Web Conf. – 2019. – Vol. 105. – Article No. 01046.

Объекты интеллектуальной собственности:

9. Патент № 2540717 Российская Федерация, МПК E21C 39/00 (2006.01). Модель трещиноватого горного массива: № 2013143434/03; заявл. 25.09.2013; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 4 / Хямяляйнен В. А., **Баёв М. А.**, Коровицын А. П., Шевцов А. Г.; заявитель и патентообладатель КузГТУ. – 5 с.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016610243 Российская Федерация. Расчет проницаемости трещины: № 2015660734; заявл. 09.11.2015; опубл. 20.02.2016 / **Баёв М. А.**, Шевцов А. Г.; заявитель и правообладатель КузГТУ. – 1 с.

В прочих научных изданиях:

11. Хямяляйнен, В. А. Исследование процесса закрепления трещин гидроразрыва / В. А. Хямяляйнен, А. П. Коровицын, **М. А. Баёв** // Материалы XIII Международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2010». – Кемерово, 2010. – С. 311–314.
12. **Баёв, М. А.** О некоторых проблемах технологии добычи метана из угольных пластов и возможных путях их решения / **М. А. Баёв**, А. П. Коровицын, А. Г. Шевцов, В. А. Хямяляйнен // Сб. тр. XIV Международной научно-практической конференции «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности». – Кемерово, 2012. – С. 124–126.
13. **Баёв, М. А.** Модель трещиноватого горного массива для исследования проницаемости закрепленной трещины гидроразрыва / **М. А. Баёв**, А. П. Коровицын, В. А. Хямяляйнен // Сб. тр. XV Международной научно-практической конференции «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности». – Кемерово, 2013. – С. 290–292.
14. **Баёв, М. А.** О некоторых результатах исследования устойчивости закрепленных трещин гидроразрыва угольного пласта / **М. А. Баёв**, А. Г. Шевцов // Сб. материалов VI Всерос., 59-й научно-практической конференции с международным участием «Россия молодая». – Кемерово, 2014.
15. **Баёв, М. А.** Методика исследования проницаемости закрепленной трещины разрыва угольного пласта / **М. А. Баёв**, А. Г. Шевцов // Сб. материалов VI Всерос., 59-й научно-практической конференции с международным участием «Россия молодая». – Кемерово, 2014.
16. **Баёв, М. А.** Обоснование применения кварцевых песков месторождений Кемеровской области для закрепления трещин гидроразрыва метаноугольных пластов / **М. А. Баёв**, А. Г. Шевцов, В. А. Хямяляйнен // Материалы XV Международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2014». – Кемерово, 2014.
17. **Баёв, М. А.** О первых результатах оценки применимости песков Кемеровской области для закрепления трещин гидроразрыва угольных пластов / **М. А. Баёв**, А. Г. Шевцов // Сб. материалов VII Всерос., научно-практической конференции с международным участием «Россия молодая». – Кемерово, 2015.
18. **Баёв, М. А.** Экономическое обоснование применения песков Кемеровской области для закрепления трещин гидроразрыва метаноугольных пластов / **М. А. Баёв**, А. Г. Шевцов // Сб. материалов VII Всерос., научно-практической конференции с международным участием «Россия молодая». – Кемерово, 2015.
19. **Баёв, М. А.** Применение компьютерных программ для лабораторных исследований физических процессов добычи метана из угольных пластов / **М. А. Баёв**, А. Г. Шевцов // Сб. материалов VIII Всерос., научно-практической конференции с международным участием «Россия молодая». – Кемерово, 2016.
20. Шипачева, А. А. Обзор применяемых конструкций скважин для добычи метана угольных пластов / А. А. Шипачева, Е. В. Тяжких, **М. А. Баёв** // Сб. материалов XI Всерос. научно-практической конференции с международным участием «Россия молодая». – Кемерово, 2019.

Подписано в печать 11.11.2020 г.

Формат 60x84/16. Гарнитура «Times New Roman».

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,28.

Тираж 100 экз. Заказ № 324.

Отпечатано в издательском центре УИП КузГТУ.

650000, г. Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а.