

на правах рукописи

МУРАВЛЕВ ЕВГЕНИЙ ВИКТОРОВИЧ

Разработка средств и методов исследования прочностных параметров пластовых пород при нагрузках, моделирующих технологию нефтедобычи

Специальность: 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Бийск 2007

Работа выполнена в Институте проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской Академии наук

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор,
Ворожцов Борис Иванович

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор,
Маркин Виктор Борисович

Доктор технических наук, профессор,
Кульков Сергей Николаевич
Ведущая организация: Особое структурное подразделение Томского государственного университета (Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики, г.Томск)

Защита состоится «28» мая 2007г. в 15-00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.004.06 при Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова, по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

Автореферат разослан «28» апреля 2007г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

С.П. Пронин

Общая характеристика работы

Актуальность работы

В настоящее время в России, в частности, в Западной Сибири, крупные нефтяные месторождения характеризуются значительным падением производительности наиболее продуктивных пластов. Доля таких месторождений (по оценкам ИХН СО РАН г. Томск) превышает 40%. Поэтому одним из основных направлений прогресса в нефтедобывающей отрасли является разработка методов интенсификации нефтедобычи.

В ряде организации, как в России, так и за рубежом ведутся интенсивные работы по созданию новых технологий интенсификации нефтедобычи.

Наиболее перспективным представляется сочетание широко применяемых методов гидроразрыва пласта с физико-химическим и термогазохимическим воздействиями. Механизм такого комплексного воздействия на характеристики нефтесодержащих пород (трещинообразование, предел прочности и т.д.) практически не исследован, что затрудняет целенаправленное конструирование соответствующей техники воздействия.

В связи с этим остро стоит проблема разработки методики и средств исследований эффективности различных методов воздействия на призабойные породы в условиях имитационных моделей. Такие методы позволят существенно повысить экспрессность проведения испытаний, снизить их стоимость, и, в конечном счете, радикально ускорить внедрение перспективных способов повышения нефтеотдачи обедненных пластов.

В связи с этим, тема диссертации, посвященная разработке лабораторного имитационно-измерительного комплекса для исследования основных характеристик образцов нефтяных пород при широком спектре воздействий (импульсного, статического или депрессионного давлений, введение химически активных композиций, термического воздействия) является, несомненно, актуальной.

Целью работы является разработка экспериментального комплекса, позволяющего имитировать различные виды воздействия достаточной интенсивности на образцы пород: импульсное или статическое давление, вакуумирование, воздействие температурой и химическими композициями, как в отдельности, так и при их сочетании. Исследование воздействия на образцы всего комплекса применяемых

технологических нагрузок позволяет выбрать наиболее эффективный метод интенсификации нефтедобычи.

Задачи исследований

1 Разработать и изготовить экспериментальный имитационный комплекс, позволяющий проводить экспресс-анализ влияния различных видов воздействий на механические свойства образцов пород из нефтяных скважин, по своим уровням аналогичным применяемым на скважинах в промышленных условиях. При этом:

- разработать внутренний источник импульсного давления в виде порохового заряда, что сделает его малогабаритным и автономным;
- разработать модули, обеспечивающие статическое или депрессионное давление и термическое нагружение образцов пород;
- обеспечить возможность использование сред, имитирующих условия залегания пород в сочетании с нефтевытесняющими композициями.

2 Разработать методику определения минимального и максимального давления нагружения, при которых происходит начало внутреннего трещинообразования и разрушение образцов при различных внешних условиях: температуре, химических композициях (ИХН-100, термообратимый гель, вода и т.д.) и времени воздействия.

Объектом исследования являются образцы склепированных песчаников Юрского и Мелового отложений нефтяных скважин Западно-Сибирского региона.

Методы исследования Для решения задач исследования при выполнении работ использовались физико-математическое моделирование процессов нагрузки образцов, оценка работоспособности установки высокого давления, теоретические литературные сведения о прочности горных пород, теории трещинообразования и роста трещин (теории хрупкого разрушения Гриффитса, Баренблатта) с учетом внешних условий, включая влияния поверхностно активных веществ (теория Ребиндера П.А.), литературные данные о влиянии разного рода нагрузок на породы нефтяных скважин и сравнение этих данных с результатами испытаний на разработанном экспериментальном комплексе.

Научная новизна

1 Разработан автономный экспериментальный комплекс на базе установки высокого давления для исследования прочностных характеристик образцов пород из нефтяных скважин, позволяющий реализовать большое количество видов воздействия на образцы пород неф-

тных скважин: импульсное, статическое, депрессионное, термическое и химическое воздействия на образцы. Установка имеет малые габариты, внутренний источник нагружения, систему измерения и обработки информации.

2 Показана возможность экспериментальной оценки комплекса параметров пластовых пород, определяющих технологию нефтедобычи. Комплекс позволяет проводить имитационные нагружения образцов в соответствии с планируемой технологией воздействия на нефтесодержащие пласты пород.

3 Получены новые экспериментальные данные при использовании разработанного имитационного комплекса.

3.1 Вода снижает предел начала трещинообразования на 20%.

3.2 Использование нефтewытесняющей композиции ИХН-100 еще дополнительно снижает давление начала трещинообразования на 5...8%.

Практическая ценность

Разработанный комплекс рекомендован к использованию для проведения исследований изменения свойств образцов пород нефтяных скважин при различных видах воздействий (импульсно-взрывном, статическом, термическом, депрессионном, химическом).

Реализация и внедрение

Разработанная и изготовленная установка высокого давления для исследования физико-механических свойств материалов внедрена в Институте химии нефти СО РАН. Институтом проблем химико-энергетических технологий СО РАН разослана информация возможным пользователям.

Данные работы проводились в рамках следующих проектов:

по программе 7 Президиума РАН “Новые подходы к химии топлив и химическая электроэнергетика”, раздел 7.3 “Физико-химические основы создания новых методов повышения производительности нефтяных скважин”;

по междисциплинарному интеграционному проекту № 109 «Импульсно-депрессионные методы повышения продуктивности нефтедобывающих скважин»;

по интеграционному проекту РАН – СО РАН №32 “Физико-химические основы новых комплексных методов увеличения нефтеотдачи путем импульсно-взрывного воздействия на пласт в сочетании с нефтewытесняющими и гелеобразующими композициями”;

по проекту “Физико-математические основы эффективного преобразования энергии высокоэнергетических конденсированных сред для разработки нового оборудования, материалов и технологий” приоритетного направления 15 программы 15.2 фундаментальных исследований СО РАН.

Работа выполнена при поддержке гранта НОЦ (Томского государственного университета), выигранного автором в 2006 году.

К защите представлены

1 Теоретическое обоснование и практическая реализация экспериментального имитационного комплекса для анализа физико-механических свойств материалов при различных видах воздействий: импульсном, статическом, депрессионном, термическом, химическом в сочетании с естественными пластовыми условиями - давлением, температурой, жидкой средой.

2 Результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств образцов пород нефтяных скважин Западно-Сибирского региона при различных видах, позволяющие оценить перспективность разработанного комплекса для выбора методов воздействия при разработке технологий интенсификации нефтедобычи для каждой скважины.

Публикации

Содержание диссертационной работы отражено в 9 научных технических отчетах и было представлено в виде докладов на 16 Международных и Всероссийских научных конференциях, 15 докладов опубликованы в соответствующих сборниках конференции и в 2-х статьях в рецензируемых журналах.

Апробация работы

Материалы результатов работы обсуждались на 2-й Межрегиональной научно-практической конференции с международным участием “Ресурсосберегающие технологии в машиностроении” (26 – 27 сентября, 2002г., г. Бийск); 3-й Всероссийской научно-практической конференции “Ресурсосберегающие технологии в машиностроении” (25-26 сентября, 2003г., г. Бийск); 3-й Всероссийской научно-практической конференции (25 – 27 сентября 2003г.) “Проблемы и методология утилизации смесевых твердых топлив, отходов спецпроизводств и остатков жидких ракетных топлив в элементах ракетно-космической техники. Проектирование, отработка и испытания твердотопливных энергетических установок” (г. Бийск); Международной конференции НЕМs - 2004 “Высокоэнергетические материалы, деми-

литаризация и гражданское применение” (20 – 25 августа 2004г., г.Белокуриха); III Всероссийской научно-практической конференции “Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа” (20 – 24 сентября 2004г., г.Томск); Международной научно-технической и методической конференции “Современные проблемы технической химии” (22 – 24 декабря 2004 г., г. Казань); семинаре “Химические аспекты нефтесборки”, проводимого компанией «Шлюмбергер» совместно с Центром трансфера технологий СО РАН и НП «Центр химических технологий и материалов ИК СО РАН» (6 – 7 декабря 2004 г., г. Новосибирск); IV Всероссийской юбилейной научно-практической конференции «Ресурсосберегающие технологии в машиностроении» (23 – 24 сентября 2004 г., г. Бийск); V Всероссийской юбилейной научно-технической конференции «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях» (7 – 8 октября 2004 г., г.Бийск); 2-й Всероссийской конференции молодых ученых “Физика и химия высокоэнергетических систем” (4 – 6 мая 2006 г., г.Томск), II Международной конференции NEMs-2006 “Высокоэнергетические материалы: демилитаризация, антитерроризм и гражданское применение” (11-14 сентября 2006 г., г.Белокуриха); I Всероссийской конференции молодых ученых «Перспективы создания и применения конденсированных энергетических материалов» (27-29 сентября 2006 г., г. Бийск); V Всероссийской конференции “Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики” (2-5 октября 2006г., г.Томск).

Личный вклад

Автору принадлежат основные научные результаты теоретических и экспериментальных исследований по разработке установки высокого давления и ее применению для оценки физико-механических свойств образцов. Определение диапазона давлений, обеспечивающих испытания любых пластовых пород разной прочности, и учет этих данных в конструкции установки. Разработка физико-математической модели внутрибаллистических параметров энергоносителя установки (порохового заряда) и методики исследований.

Структура и объем диссертации Диссертационная работа состоит из введения, 3-х глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Общий объем диссертации 121 страниц текста, диссертация содержит 41 рисунок, 10 таблиц, список литературы из 92 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность исследований, научная и практическая значимость полученных результатов, сформулирована цель работы, изложены основные выносимые на защиту положения, приведена краткая характеристика работы.

Глава I. Методы исследования физико-механических свойств пород при воздействиях технологиями интенсификации нефтедобычи

Глава представляет литературный обзор особенностей интенсификации нефтедобычи различными методами: химическими, механическими, термическими и комбинированными. Показаны достоинства и недостатки этих методов. Приведены схемы существующих лабораторных установок для исследования механических свойств кернов горных пород и описано влияние различных факторов на прочностные свойства образцов.

Обзор теорий прочности и трещинообразования горных пород, их зависимостей от свойств внутренней среды (наличие воды, ПАВ и др.) позволяет оценить предельные нагрузки, безусловно обеспечивающие образование в их макроструктуре трещин, и, таким образом, спроектировать достижение максимального давления в установке.

Глава II. Имитационный комплекс для исследования физико-механических свойств пород нефтяных скважин

Глава посвящена описанию разработанного автором экспериментального модельного комплекса для исследования физико-механических свойств пород нефтяных скважин.

Схема комплекса показана на рисунке 1.

Технические характеристики комплекса приведены в таблице 1.

Измерительный комплекс включает в себя: установку высокого давления, тензометрический датчик давления, усилитель постоянного тока, АРМ (автоматизированное рабочее место), термостат, вакуум-насос и ресивер высокого давления. Схема установки высокого давления и внешний вид измерительной системы приведены на рисунке 2.

В соответствии с данными прочностных свойств горных пород при различных нагружениях определены уровни импульсного давления (порядка 55МПа), установка рассчитана на давления до 200 МПа, что показывает безопасность ее использования.

Герметизация верхней (запальной) крышки 3 осуществлена с помощью стальных и резиновых колец, образующих систему 2, самоуп-

лотнящуюся под действием внутреннего давления. В этой крышке смонтирован электроввод 1.

Таблица 1 - Технические характеристики комплекса

Параметр	Значение
Амплитуда импульсного воздействия, МПа	до 200
Длительность импульсного воздействия, с	от 0,01 до 1
Температура нагрева, °С	до 150
Вакуумирование, МПа	до 0,01
Статическое давление, МПа	до 20
Масса рабочей части, кг	не более 15
Объем рабочей части, см ³	до 270

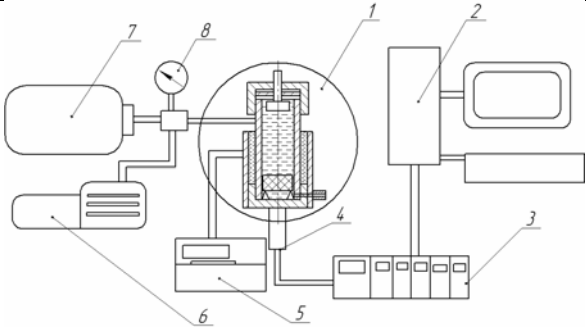
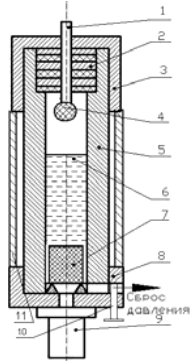


Рисунок 1 – Схема комплекса (1 – установка высокого давления; 2 – АРМ; 3 – измерительный усилитель постоянного тока; 4 – тензометрический датчик давления; 5 – термостат; 6 – вакуум-насос; 7 – ресивер высокого давления; 8 – манометр)



а)



б)

Рисунок 2 –Установка высокого давления: а) – внешний вид системы измерения; б) – схема установки (1 – запальный стержень; 2 – система уплотнений; 3 – верхняя крышка; 4 – пороховой заряд; 5 – корпус; 6 – рабочая жидкость; 7 – исследуемый образец; 8 – нижняя крышка; 9 – датчик давления; 10 – узел сброса давления; 11 – рубашка для термостатирования)

Герметизация нижней крышки 8 проведена с помощью клапанного уплотнения конструкции металл – отожженная медь – металл.

В дно крышки вкручивается тензометрический датчик давления типа РЗМА фирмы НВМ. В этой же крышке расположен клапан для сброса давления после испытания.

К электровводу в верхней крышке крепится зарядное устройство из баллиститного пороха. Набор пороха помещается в миткалевый мешочек, сюда же засыпается навеска дымного пороха для обеспечения воспламенения баллиститного. Воспламенение производится от нихромовой спирали накаливания от постоянного напряжения 12 В.

Для увеличения длительности воздействия нагружения в качестве энергоносителя может использоваться порох торцевого горения. На рисунке 3 приведены кривые давления для сравнения пороха торцевого горения (1) и пороха острого горения (2).

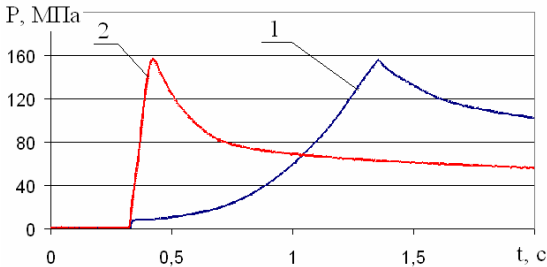


Рисунок 3 – Кривые давления для порохов торцевого горения (1) и трубчатого (2)

Для метрологического обеспечения измерения давления в установке разработана система измерения. На рисунке 4 приведена схема системы измерения. Для метрологического обеспечения измерения давления в установке в проведенных экспериментальных исследованиях применялся тензорезисторный датчик давления типа РЗМА фирмы НВМ, который способен измерять давление до 200 МПа.

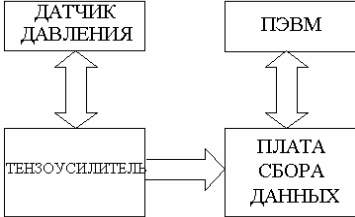


Рисунок 4 – Структурная схема канала измерения давления в установке высокого давления

В проведенных экспериментальных исследованиях применен 6 канальный усилитель (тензостанция) типа KWS3020B фирмы НВМ, по принципу усиления относящаяся к усилителям постоянного тока (УПТ). УПТ отличаются простотой схемы и удобством управления,

могут работать как с параметрическими, так и с генераторными датчиками. Полоса частот УПТ простирается от нуля до 10...20 кГц. Это позволяет использовать их при исследовании как статических, так и динамических процессов. В схеме отсутствуют реактивные элементы, поэтому нет причин для возникновения частотных и фазовых искажений. При отсутствии мощных источников помех входные кабели могут быть неэкранированными и большой длины.

Тензостанция KWS3020B обеспечивает усиление выходного сигнала датчика и стабилизированное напряжение для его питания (1В, 5В, 10В). Диапазон входных напряжений – $\pm(0...60)$ мВ. Напряжение выходного сигнала предусилителя – $\pm(0,15...9,0)$ В. Максимальная длина измерительного кабеля – 500м. Предпочтительно подключать датчики к усилителю кабелями, жилы которых перевиты между собой, имеют общий экран и изолирующую оболочку снаружи и сопротивление которых пренебрежимо мало.

Поскольку известные зависимости для расчета необходимой навески пороха (формула Нобля-Абея) не дают приемлемой точности задания давления в камере (погрешность более 30%), была разработана и программно реализована физико-математическая модель, в которой учтены:

- тепловые потери на стенки установки;
- конструктивные параметры установки (двухкамерность, свободный объем, теплофизические характеристики материала, толщина стенок и т.д.);
- геометрические характеристики заряда (диаметр, толщина горящего свода и т.д.).

Математическая модель представляется системой обыкновенных дифференциальных уравнений для усредненных по внутреннему свободному объему внутрибаллистических характеристик, так называемое нульмерное описание. Внутрибаллистический расчет при этом базируется на уравнениях, выражающих законы сохранения массы и энергии. Задача решалась при допущении, что химические реакции не протекают, а термодинамические свойства смеси определяются через массовые концентрации компонентов. При этом предполагается, что заряд твердого топлива загорается одновременно по всей рабочей поверхности, а деградацию выгорания заряда можно описать в рамках геометрического приближения. Термодинамика пороховых газов баллистических топлив изучена достаточно хорошо, влияние реакций диссоциации на температуру горения пренебрежимо мало, поэтому во

всех расчетах внутрибаллистических характеристик рекомендуется учитывать только равновесие реакции водяного газа. Такой подход позволил получать результаты вполне удовлетворительной точности с наименьшими затратами труда.

Систему уравнений для установки высокого давления можно представить в виде:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}[\rho W] &= G^+ - G^-, \\ \frac{d}{dt}[\rho R W] &= R_T G^+ - R^- G^-, \\ \frac{d}{dt}[\rho C_p W] &= C_{pT} G^+ - C_{p-} G^-, \\ \frac{d}{dt}\left[\frac{pW}{\gamma - 1}\right] &= H_T G^+ - \left[\frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p}{\rho}\right] G_- - S_b q, \\ \frac{dW}{dt} &= \frac{G^-}{\rho_T},\end{aligned}\tag{1}$$

где t – время работы порохового заряда;

p – давление;

H_T – теплота сгорания топлива;

S_b – поверхность конструкции, с которой происходит теплообмен горячих продуктов сгорания топлива при плотности теплового потока q ;

G – расход газов;

W – объем камеры;

ρ – плотность заряжания;

γ – показатель адиабаты.

Индекс "Т" характеризует параметры топлива и продуктов сгорания.

Газоприток G^+ за счет горения твердого топлива рассчитывается через скорость горения топлива u_T .

Плотность теплового потока в уравнении энергии имеет вид:

$$q = \varepsilon \sigma_o (T_g^4 - T_o^4) + \alpha (T_g - T_o);\tag{2}$$

где ε – эффективная степень черноты системы газ–поверхность;

σ_o – постоянная Стефана-Больцмана;

α – коэффициент конвективной теплоотдачи;

T_g – температура газа;

T_o – начальная температура.

Для расчета теплоотдачи посредством конвекции использовался метод теории подобия. Исходя из значений определяющих критериев, по формулам теории подобия вычисляется критерий Нуссельта, из которого определяется коэффициент теплоотдачи α . Определяющим критерием для свободной конвекции является критерий Грасгофа. Теплопроводность и вязкость отдельных газов для равновесного состава определялись по формуле Сезерленда. Теплопроводность бинарных смесей определяется по известной формуле Андреевой. Эта формула неприменима для многокомпонентной газовой смеси. Но в данном случае теплопроводности компонентов смеси, за исключением водорода, близки друг к другу, и газ рассмотрен как бинарная смесь, состоящая из водорода и второго компонента, представляющего собой смесь CO_2 , H_2O , CO и N_2 , теплопроводность которой принимается равной среднему арифметическому из теплопроводностей всех этих веществ. Количество тепла, отдаваемое излучением, выражается законом Стефана-Больцмана. Здесь вопрос сводится к нахождению эффективной степени черноты ε . Для CO_2 и H_2O полная степень черноты, полученная нами, равна $\varepsilon=0,48$. Полученное значение ε должно считаться заведомо преуменьшенным. Точно рассчитать ε невозможно. Но, зная нижний предел этой величины и верхний предел, равный единице, принято для расчетов среднее арифметическое из этих двух предельных значений, т.е. $\varepsilon=0,74$.

Расчет по программно реализованной физико-математической модели показал, что с учетом всех источников погрешность задания веса заряда не превышает 10% (рисунок 5).

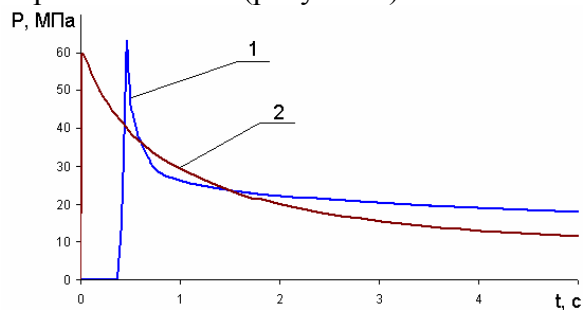


Рисунок 5 – Экспериментальная (1) и теоретическая (2) зависимости $P(t)$

Полное описание физико-математической модели приведено в приложении Б диссертации.

Глава III. Методика проведения эксперимента и оценка работоспособности комплекса диссертации содержит результаты экспериментальных исследований механических свойств пород на разработанном имитационном комплексе, что подтверждает его работоспособность.

Отбор образцов. Для исследования используются образцы горных пород, полученные при бурении скважин (керны). Размеры образца: длина – 30...40 мм, диаметр – 29...31 мм.

Аппаратура. При определении критериев трещинообразования горных пород использовались экспериментальный модельный комплекс, микроскоп (стократное увеличение), фотоаппарат, штангенциркуль.

Материалы. Для проведения работ необходимы следующие материалы: рабочая среда (в зависимости от целей исследований), ткань для очистки образцов, навеска высокоэнергетического вещества.

Подготовка к испытанию. Перед испытаниями замеряются диаметр образца, его длина и масса. Далее образец исследуется на наличие дефектов структуры, при нахождении дефектов (трещин, пор, включений и т.д.) замеряются геометрические характеристики дефектов, а сами дефекты помечаются маркером. Образец помещается в рабочую жидкость, в которой необходимо проводить исследование, и выдерживается в ней в течение 30 суток для полного насыщения пор рабочей жидкостью.

Определение давления, необходимого для начала трещинообразования. В зависимости от параметров экспериментов (рабочей среды, температуры и т.д.) определяется уровень давления, необходимого для начала трещинообразования. Выбираются следующие три значения давления: равное расчетному, на 20% ниже расчетного, на 20% выше расчетного. Для этих давлений определяются необходимые навески высокоэнергетического вещества в соответствии с программой расчета внутрибаллистических характеристик.

Проведение исследований. Образцы, предварительно насыщенные рабочей жидкостью, помещают в установку высокого давления. Далее, в соответствии с программой экспериментов, образцы подвергаются различным воздействиям. Далее образцы вынимаются из установки и сушатся.

После проведения экспериментов замеряются геометрические значения помеченных дефектов и дефектов, образованных при нагружении.

В случае если образец не разрушился, а просто наблюдается увеличение дефектов, возможны проведения исследований изменения предела прочности. Эти испытания позволяют выявить наиболее эффективные режимы воздействия имитационных испытаний. В этом случае используемое оборудование: гидравлический пресс, система измерения давления, система измерения перемещения штока прессы.

Подготовленный образец (подвергшийся воздействию в установке высокого давления, высушенный) нагружается статическим давлением до разрушения. Фиксируется давление разрушения. Проводится сравнение пределов прочности эталонного образца и образца, подвергнутого воздействию.

Для исследования деформации образцов измеряются диаметр, длина и масса. Определяются пластические деформации и изменение плотности образцов.

Все экспериментальные исследования проводились практически при полном заполнении трещин образцов жидкими средами (образцы 30 суток выдерживались в соответствующих жидких средах).

Результаты испытаний:

- определены зависимости начала роста трещин (рисунок 6) при различных видах воздействия (в воде и ИХН-100):

- в насыщенных водой образцах (кривая 3) давление начала образования трещин снижается на 20% по сравнению с сухим образцом (кривая 1);

- использование композиции ИХН-100 (кривая 4) дополнительно снижает давление начала трещинообразования на 5...8%;

- при использовании композиции ИХН-100 трещины развиваются интенсивнее (20...30%) чем в воде (кривая 2, рисунок 7).

Проводилось исследование изменения плотности образцов горных пород после воздействия импульсным давлением в различных рабочих средах. Перед испытаниями измерялся объем образцов и их масса, по этим значениям определялась начальная плотность. Так как эти показатели у всех образцов разные, то результаты экспериментов целесообразно приводить в безразмерном виде.

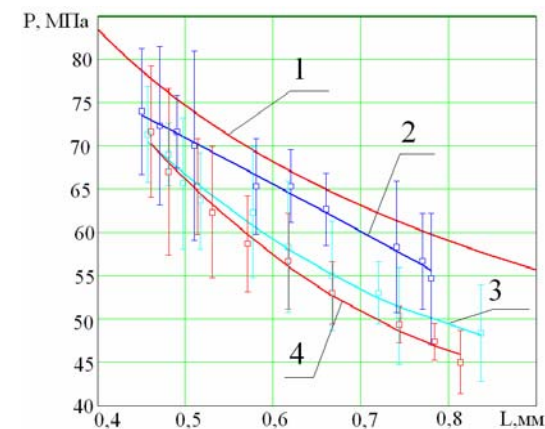


Рисунок 6 – Начало трещинообразования при различных видах воздействия образцов пород сцементированного песчаника: 1 – теоретическая кривая начала образования трещины; 2 – экспериментальная зависимость начала распространения трещины при воздействии в гелеобразующей композиции; 3 – экспериментальная зависимость начала распространения трещины при воздействии в воде; 4 – экспериментальная зависимость начала распространения трещины при воздействии в нефтewтесняющей композиции ИХН-100

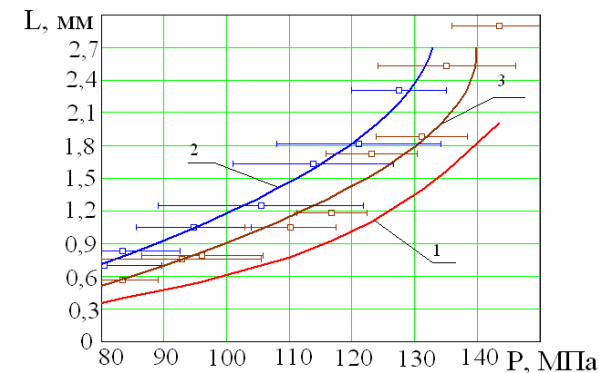


Рисунок 7 – Зависимости увеличения длин трещин при различных видах воздействия: 1 – расчетная зависимость раскрытия трещины от давления; 2 – экспериментальные данные при испытаниях в нефтewтесняющей композиции ИХН-100; 3 – экспериментальные данные при испытаниях в воде.

На рисунке 8 приведены зависимости изменения плотности при различных воздействиях. Изменение плотности образцов (явление дилатансии) может свидетельствовать о раскрытии внутренних микротрещин. Для исследования внутренней структуры кернов после воздействия давлением изготавливались шлифы образцов. На рисунке 9 приведены шлифы кернов до и после испытаний. Из рисунка видно, что трещины образуются и внутри образцов.

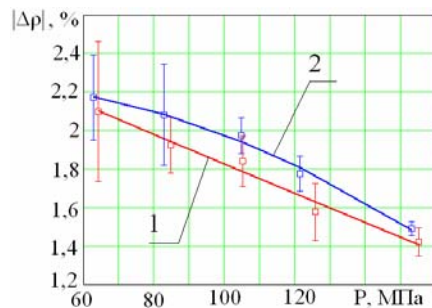


Рисунок 8 – Зависимости изменения плотности от давления импульсного воздействия: 1 – зависимость изменения плотности от давления при испытаниях в воде; 2 – зависимость изменения плотности от давления при испытаниях в нефтewытесняющей композиции ИХН-100



Рисунок 9 – Шлифы кернов после (а) и до испытания (б)

Определенные характеристики изменения прочностных пределов в зависимости от нагружения подтверждены оценкой прочности образцов при одноосном статическом нагружении. Качественно картина изменения пределов прочности совпадает с известными данными, что подтверждает результаты, полученные при импульсных испытаниях в модельных условиях. На рисунке 10 приведены зависимости предела прочности при статических испытаниях от предварительного импульсного воздействия в различных передающих давление средах.

На рисунке 11 приведены зависимости предела прочности горных пород при нагреве до 350⁰С и для сравнения – аналогичные зависимости в холодном состоянии.

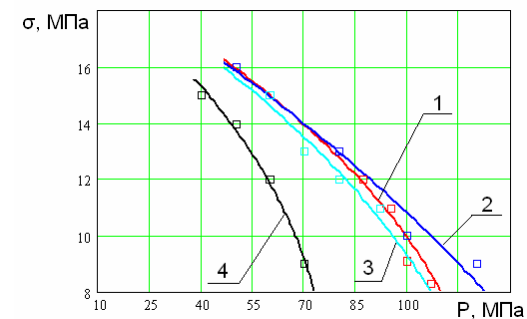


Рисунок 10 – Зависимости изменения предела прочности σ от предварительного импульсного воздействия: 1 – кривая изменения предела прочности σ для образцов, испытанных в термообратимом геле; 2 – кривая изменения предела прочности σ для образцов, испытанных в нефтewытесняющей композиции ИХН-100; 3 – кривая изменения предела прочности σ для образцов, испытанных в воде при давлении 100 МПа и нефтewытесняющей композиции ИХН-100; 4 – кривая изменения предела прочности σ для образцов, испытанных в воде при трехкратном воздействии

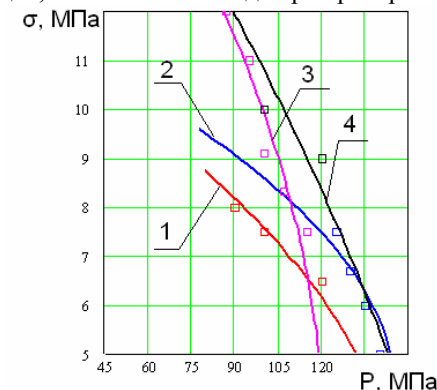


Рисунок 11 – Зависимости изменения предела прочности σ от предварительного импульсного воздействия давлением P : 1 – зависимость изменения предела прочности σ для образцов, испытанных в воде при нагреве до 350⁰С; 2 – зависимость изменения предела прочности σ для образцов испытанных в гелеобразующей композиции МЕТКА при нагреве до 350⁰С; 3 – зависимость изменения предела прочности σ для образцов, испытанных в рабочей среде – термообратимом геле; 4 – зависимость изменения предела прочности σ для образцов, испытанных в воде при давлении 100 МПа и нефтewытесняющей композиции ИХН-100

Таким образом, исследованиями установлено:

- образцы пород, подвергавшиеся ранее воздействию импульсным давлением, разрушаются при одноосном нагружении при более низком усилии, чем образцы без каких-либо предварительных воздействий;

- у «мокрых» образцов давление начала трещинообразования ниже, чем у «сухих». Различия в поведении воздушно-сухих и водо-

насыщенных образцов пород вызываются механическим действием поровой воды, которое способствует развитию трещин при меньших долях разрушающей нагрузки и снижает прочность;

- прочность образцов, предварительно подвергавшихся ранее многократному импульсному нагружению значительно ниже, чем у других образцов, что также подтверждает появление и развитие микротрещин в процессе циклического импульсного нагружения и при статическом нагружении;

- явление дилатансии наблюдалось для всех исследуемых пород, что также может быть объяснено раскрытием микротрещин в образцах перед разрушением.

В Заключение представлены основные выводы и результаты работы.

В Приложении приведены акт внедрения установки высокого давления в ИХН СО РАН и физико-математическая постановка и решение задачи определения внутрибаллистических параметров установки высокого давления, которая позволяет с погрешностью до 10% определить навеску пороха для создания заданного уровня давления.

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем.

1 Впервые разработан экспериментальный имитационный комплекс на основе пороховой установки высокого давления, позволяющий исследовать физико-механические характеристики твердых материалов, включая горные породы, в широком диапазоне давлений (до 200 МПа, безопасность установки гарантирована коэффициентом запаса более 2) при различных вариантах нагружения (импульсном, статическом, депрессионном, химическом и термическом).

2 Разработана методика проведения исследований, обеспечивающих определение условий трещинообразования в образцах. При этом назначение импульсного давления определяется с учетом теоретических основ трещиностойкости материалов и ожидаемого снижения этого параметра, связанного с условиями эксперимента (температурой, влиянием ПАВ, воды, скоростью нагружения). Определение массы навески порохового заряда, для реализации заданного уровня давления, производится по разработанной методике с погрешностью до 10%.

3 Показана эффективность использования установки на примерах исследования комплексного воздействия импульсного давления на образцы, находящиеся в различных средах и условиях, например

водная среда насыщающей поры и трещины снижает предел прочности на 15%, применение в этих условиях композиции ИХН-100, разработки Института химии нефти СО РАН дополнительно снижает предел трещинообразования еще на 7...8%. Этот факт подтверждает успешное применение ИХН-100 при добыче нефти на скважинах Западно-Сибирского региона;

4 Исследование трещиностойкости образцов, подвергавшихся различным воздействиям в модельном комплексе, в условиях одноосного сжатия качественно совпадает с известными данными, что подтверждает эффективность использования установки.

Основное содержание диссертационного исследования опубликовано в следующих работах:

1 **Муравлев, Е.В.** Повышение КПД универсальной пороховой газодинамической установки / Е.В. Муравлев, П.В. Верещагин, И.А. Титов, В.А. Беляев // 2 Межрегиональная научно-практическая конференция с международным участием "Ресурсосберегающие технологии в машиностроении": материалы конф. – Бийск, 2002. – С.18-21.

2 **Муравлев, Е.В.** Исследование комплексного воздействия импульсного давления ВЭМ в сочетании с нефтевытесняющими композициями на призабойные породы / Е.В. Муравлев, Б.И. Ворожцов, М.Г. Потапов, Ю.В. Хрусталеv, Л.К. Алтунина, В.А. Кувшинов // 3 Всероссийская научно-практическая конференция "Проблемы и методология утилизации смесевых твердых топлив, отходов спецпроизводств и остатков жидких ракетных топлив в элементах ракетно-космической техники. Проектирование, отработка и испытания твердотопливных энергетических установок": материалы конф. - Бийск, 2004. – С. 124 – 128.

3 **Муравлев, Е.В.** Установка высокого давления для исследования механических свойств образцов пород из нефтяных скважин / Е.В. Муравлев, М.Г. Потапов, Л.К. Алтунина, Б.И. Ворожцов, Ю.В. Хрусталеv, А.А. Павленко // Международная конференция NEMs - 2004 "Высокоэнергетические материалы, демилитаризация и гражданское применение": тез. докл. - Белокуриха, 2004 – С. 138.

4 **Муравлев, Е.В.** Установка для исследования физико-химических воздействий на образцы пород нефтяных скважин в условиях высоких давлений / Е.В. Муравлев, Л.К. Алтунина, М.Г. Потапов, В.А. Кувшинов, Ю.В. Хрусталеv, А.А. Павленко // III Всероссийская научно-практическая конференция “Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа”: материалы конф. – Томск, 2004. – С.63–66.

5 **Муравлев, Е.В.** Экспериментальные исследования физико-механических свойств пород нефтяных скважин / Е.В. Муравлев, Л.К. Алтунина, Б.И. Ворожцов, Ю.В. Хрусталеv, А.А. Павленко // Международная научно-техническая и методическая конференция “Современные проблемы технической химии”: материалы конф. – Казань, 2004. – С.541–547

6 **Муравлев, Е.В.** Автономный экспериментальный комплекс для исследования воздействий химических реагентов на физико-механические свойства горных пород нефтяных скважин / Е.В. Муравлев, Б.И. Ворожцов, Л.К. Алтунина, В.А. Кувшинов, А.А. Павленко, Ю.В. Хрусталеv // Семинар «Химические аспекты нефтедобычи»: тез. докл. – Новосибирск, 2004. – С. 37–38.

7 **Муравлев, Е.В.** Исследование распределения давления передающей среды в пороховых гидроимпульсных установках / Е.В. Муравлев, П.В. Верещагин, И.А. Титов, В.А. Беляев // IV Всероссийская юбилейная научно-практическая конференция «Ресурсосберегающие технологии в машиностроении»: материалы конф. – Бийск, 2004 – С. 126–128.

8 **Муравлев, Е.В.** Измерение распределения давления передающей среды в пороховых гидроимпульсных установках / Е.В. Муравлев, А.А. Мищенко, В.А. Абанин, И.А. Титов // V Всероссийская юбилейная научно-техническая конференция «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях»: материалы конф. – Бийск, 2004 г. – С. 273–277.

9 Gauging of Pressure Profile of the Transmitting Medium in Powder Hydroimpulse / E.V. Muravlev, I.A. Titov, V.A. Abanin, A.A. Mishchenko //Setting Sixth International Siberian Workshop and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM’2005: Novosibirsk, 2005. – P.90–92.

10 Влияние различных факторов на прочностные свойства пород нефтяных скважин при высоких давлениях / Е.В. Муравлев, Ю.В. Хрусталеv, Б.И. Ворожцов, Л.К. Алтунина, А.А. Павленко // Ползуновский вестник. – 2006. - №2-2. - С. 84–89.

11 **Муравлев, Е.В.** Метод лабораторного исследования прочностных свойств пород нефтяных скважин / Е.В. Муравлев // 2 Всероссийская конференция молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем»: материалы конф. – Томск, 2006. – С. 437 – 440

12 **Muravlev, E.V.** Analysis of the Combined Stimulation of Well Productivity in Bottomhole Zone / E.V. Muravlev, S.S.Bondarchuk, L.K.Altunina, B.I.Vorozhtsov, Yu.V.Khrustalev, A.A.Pavlenko // II International Workshop «HEMs-2006»: Belokurikha, 2006. – P. 152.

13 **Муравлев, Е.В.** Физика нефтяного пласта при высоких давлениях / Е.В. Муравлев, Ю.В. Хрусталеv, Б.И. Ворожцов, А.А. Павленко // I Всероссийская конференция молодых ученых «Перспективы создания и применения конденсированных энергетических материалов»: материалы конф. – Бийск, 2006. – С. 141 – 145.

14 Метод лабораторного исследования процесса трещинообразования пород нефтяных скважин / Е.В. Муравлев, Ю.В. Хрусталеv, Б.И. Ворожцов, Л.К. Алтунина, А.А. Павленко // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2006. – Т 49, №6. – С. 108 – 110.

15 **Муравлев, Е.В.** Метод лабораторного исследования физико-механических свойств горных пород / Е.В. Муравлев, Ю.В. Хрусталеv, Б.И. Ворожцов, Л.К. Алтунина, А.А. Павленко // Международная научно-техническая и методическая конференция “Современные проблемы технической химии”: материалы конф. – Казань, 2006 г. – С. 554 – 558.

16 **Муравлев, Е.В.** Комплексное воздействие на призабойную зону для повышения нефтеотдачи пластов / Е.В. Муравлев, Ю.В. Хрусталеv, Б.И. Ворожцов, Л.К. Алтунина, А.А. Павленко // Пятая Всероссийская конференция “Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики”: материалы конф. – Томск, 2006. – С. 140 – 142.

17 **Муравлев, Е.В.** Математическая модель анализа изменения нефтеотдачи при комбинированных воздействиях на призабойную зону / Е.В. Муравлев, С.С. Бондарчук, Л.К. Алтунина, Б.И. Ворожцов, Ю.В. Хрусталеv, А.А. Павленко // Пятая Всероссийская конференция “Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики”: материалы конф. – Томск, 2006 – С. 138 – 140.

18 Разработка и исследование пороховых гидроимпульсных установок / Е.В. Муравлев, И.А. Титов, П.В. Верещагин, В.А. Беляев // Бийский Вестник. Специальный выпуск. 2007. – №10. – С. 61 – 63.