

# 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

*В работе представлены результаты исследования прочностных свойств пород из нефтяных скважин при высоких давлениях. Определены пороги давления разрушения пород в зависимости от различных физико-химических воздействий.*

В настоящее время наиболее перспективным методом повышения нефтеотдачи из нефтяных скважин является метод гидроразрыва с использованием порохового аккумулятора давления с одновременной обработкой призабойной зоны химически активными реагентами [1].

Для оценки эффективности этого метода важным являются данные о прочностных свойствах пород скважин, полученных в лабораторных условиях. Для проведения исследований прочностных свойств пород из нефтяных скважин нами разработана установка с внутренним источником давления, которое создается за счет сгорания порохового заряда [2]. Давление на образец породы передается через жидкую среду - нефтewытесняющая композиция ИХН-100, термообратимый гель и вода. Схема и внешний вид установки приведены на рис. 1 и 2.

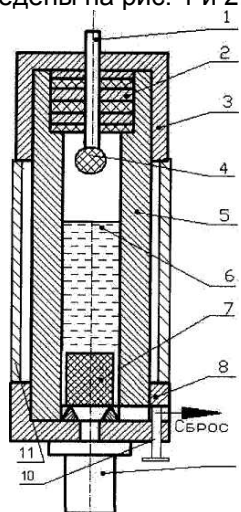


Рисунок 1 - Схема установки: 1 - запальный стержень; 2 - система уплотнений; 3 - верхняя крышка; 4 - пороховой заряд; 5 - корпус; 6 - рабочая жидкость; 7 - исследуемый образец; 8 - нижняя крышка; 9 - датчик давления; 10 - узел сброса давления; 11 - рубашка для термостатирования

Установка позволяет проводить исследования при различных режимах нагружения

образца: статическим, импульсным, депрессионным, при различном сочетании циклов нагружения. В таблице 1 приведены технические характеристики установки.

Таблица 1  
Технические характеристики установки

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

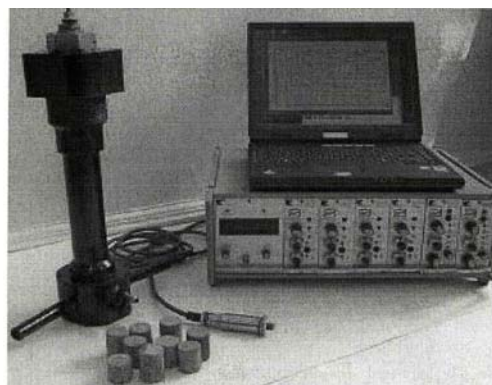


Рисунок 2 - Внешний вид установки

Измерение импульсного давления проводилось с использованием тензометрического датчика давления РЗМ и тензостанции KWS фирмы HBM, по схеме: датчик - KWS - автоматизированное рабочее место. Регистрация и обработка результатов измерения давления осуществлялась по специальной программе с использованием ПЭВМ.

На данной установке проведена серия испытаний с тремя типами образцов пород при различных видах воздействий на них:

## ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Подбор порохового заряда для получения максимального давления ( $P_{max}$ ) в установке в первом приближении определялся по известной формуле Нобля-Абея [3].

Для выбранного веса заряда значение  $P_{max}$  по этой формуле получалось много выше экспериментального. Эта разница объясняется тем, что формула не учитывает тепловые потери в стенке камеры.

Для учета тепловых потерь была решена задача расчета внутрибаллистических характеристик в камере. Эта задача представляется системой обыкновенных дифференциальных уравнений для осредненных по внутреннему свободному объему внутрибаллистических характеристик - так называемое нульмерное описание [4].

Значения максимального давления, полученные из решения этой задачи отличаются от экспериментального не более чем на 10 %.

Режимы нагружения кернов назначались Программой стендовых испытаний. Например, проводились испытания со следующими вариантами:

### **Вариант А**

Керн, предварительно выдержанный в композиции ИХН-100 в течение 10 суток, помещается в установку, заливается композицией ИХН-100, проводится сборка установки и проводится испытание.

### **Вариант В**

Выдержанный в ИХН-100 образец породы помещается в установку. Образец заливается этой композицией, в собранную установку через штуцер в верхней части камера нагружается давлением от газового ресивера (азот) до 15 МПа и выдерживается в течение 2-х часов. После него проводится испытание.

### **Вариант С**

Керн закладывается в установку, заливается водой, подвергается импульсному воздействию, выдерживается под давлением 10...60 минут, после снятия давления удаляется вода и установка заливается композицией ИХН-100, и проводятся испытания.

### **Вариант D**

На корпус установки крепится рубашка 11 (рис. 1). В установку помещается образец породы, заливается термообратимым гелем. Рубашка подключена к термостату. Накручивается верхняя крышка с зарядным устройством. Рабочая жидкость в термостате - машинное масло. Температура масла доводится до 90°C. При этой температуре установка выдерживается 1,5 часа. Проводится испытание.

### **Вариант Е**

В установку помещается керн, заливается композицией ИХН-100. Устанавливается запальная крышка с пороховым зарядом. К установке подключается вакуумный насос. В установке устанавливается давление 0,01 МПа. Это давление поддерживается в течение 2 часов. После сброса вакуума керн заливается жидкостью и проводится испытание при различных давлениях.

После проведения испытаний образцы визуально осматривались на наличие трещин. Появление трещин наблюдалось на некоторых образцах в районе давлений 80... 100 МПа, причем в случае, когда в качестве рабочей жидкости использовалась композиция ИХН-100. Эти образцы показаны на рис. 3.



Рисунок 3 – Керны пород нефтяных скважин после испытаний

Для исследования внутренней структуры после испытаний использовались шлифы кернов. На рис. 4 показан шлиф керна, подвергавшийся испытанию по варианту Е.

Здесь же для сравнения приведен результат испытаний в воде (испытание № 40 в таблице 2).

Видно, что начало разрушения (появление трещин) наблюдалось в испытании, когда импульсное воздействие на образец проводилось несколько раз, причем для среды ИХН-100 этот процесс начинается при более низком давлении, чем для воды.

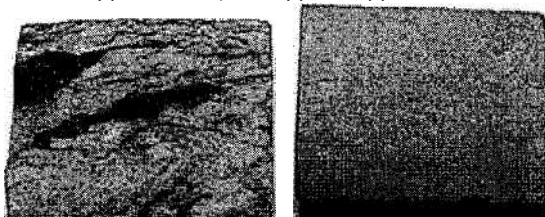


Рисунок 4 – Образцы шлифов до и после испытания: а - после испытания, б - до испытания

Результаты испытаний на воде

№ опыта	Марка образца	Условия испытания	Примечание
40	413/239-88	Давление импульсного нагружения в воде - 66 МПа, выдержка 2,5 часа, сброс давления, подряд два испытания в ИХН-100 при 82 МПа	Появление трещин на торце и боковой поверхности
44	413/245-88	Давление импульсного нагружения в воде - 74 МПа, выдержка 10 мин, сброс давления, Импульсное нагружение в воде - 98 МПа (два раза подряд)	Трещинообразование отсутствует
45	88-312-89	Давление импульсного нагружения в воде 140 МПа, два испытаниями	Трещины на поверхности

В среде ИХН-100, начиная с давления 170 МПа, происходит разрушение всех образцов.

На рис. 5 показан шлиф марки Л керн не подвергавшийся никакому воздействию. На рисунке 6 показан шлиф этой же марки после испытания по варианту С и повторному испытанию при давлении 130 МПа при рабочей среде - вода.

На рисунках 7 и 8 представлены торцевая и боковая поверхности образца марки 413 239-88 после давления в 160 МПа.

Из анализа полученных результатов определен диапазон давлений (90... 170 МПа), который определяет начало трещинообразования образцов и их разрушение.



Рисунок 5 – Шлиф образец не подвергавшегося воздействию



Рисунок 6 – Шлиф образца после испытания



Рисунок 7 – Торцевая поверхность образца 413 239-88 после испытания

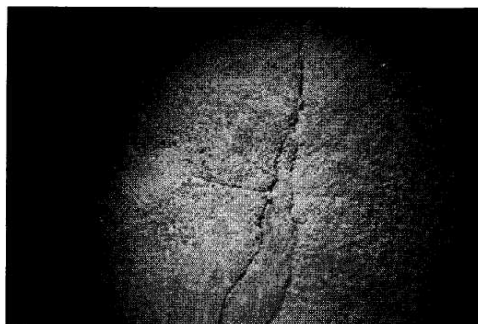


Рисунок 8 – Боковая поверхность образца 413 239-88 после испытания

Приведенные фотографии получены с помощью установки, состоящей из: микроскопа МБС-10 с максимальным десяти кратным увеличением, цифрового фотоаппарата OLYMPUS с возможностью десяти кратного увеличения и блока подсветки.

Дополнительно проводились исследования деформации образцов пород при их нагружении статическим давлением на гидравлическом прессе. Давление нагружения измерялось с помощью тензометрического датчика силы типа LWC фирмы НВМ, закрепленного на стойках пресса. Общий вид установки приведен на рис. 9.



## ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

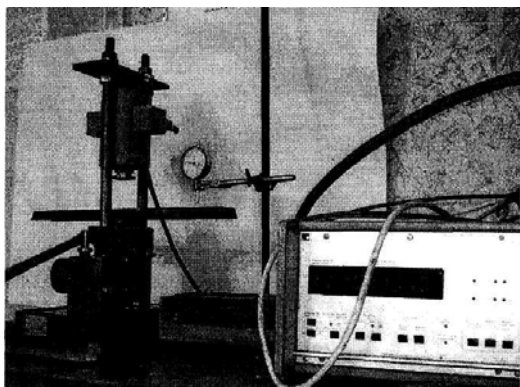


Рисунок 9 – Общий вид установки испытания образцов статическим давлением

С помощью индикатора часового типа ИЧ-10 фиксировались высота образца с момента начала нагружения до момента разрушения или до достижения заданного давления.

В качестве вторичной аппаратуры использовался цифровой измерительный прибор ДК-38 с классом точности 0,0025. Диаметры и высоты образцов измерялись до и после испытания.

Измеренные параметры одного из типов образцов представлены в таблице 3.

В этих испытаниях обнаружено увеличение объема образцов всех исследуемых пород (явление дилатансии) перед разрушением.

Согласно литературным данным увеличение объема при деформации может быть объяснено раскрытием микротрещин в образце перед его разрушением [1].

Образец Т-23 предварительно не нагружался и испытания проводились в сухом его состоянии, для определения эталонных нагрузок. Образцы Т-3 и Т-4 первоначально нагружались в установке импульсным давлением, причем образец Т-3 в среде термообратимого геля, а Т-4 первоначально в воде, затем в композиции ИХН. Образец Т-17 пред-

варительно выдерживался в воде в течении 48 часов. Видно, что для Т-3 и Т-4 давление разрушения существенно ниже, чем для Т-23, что подтверждает наличие макротрещин, образовавшихся при импульсном нагружении. "Мокрый" образец Т-17 также разрушился при более низком давлении. Различия в поведении воздушно-сухих и водонасыщен-

ных образцов пород вызываются механическим воздействием поровой воды, которое способствует развитию трещин при меньших долях разрушающей нагрузки и снижает прочность. Образец Т-6 предварительно подвергался серии импульсных нагружений (три раза) давлением 70 МПа. Из таблицы 3 видно, что его предел прочности значительно ниже, чем для других образцов, что также подтверждает появление и развитие микро и макротрещин в процессе циклического импульсного нагружения.

Исследовалось влияние температуры образца на его прочность. Образцы пород нагревались в печи до 350°С. Время нагрева керна до этой температуры предварительно определялось из решения задачи теплопроводности. Нагретый образец быстро перемещался на гидравлический пресс и нагружался давлением. Торцы керна изолировались от металлических поверхностей пресса с помощью асбестовых прокладок. Заранее экспериментально определялось время остывания образца при комнатной температуре.

Для этого на боковой поверхности керна просверливалось отверстие до его центра (по оси) в которое устанавливалась термомпара градуировки ХК.

Видно, что скорость остывания равна приблизительно 20°С в минуту. Время от изъятия керна из печи до его разрушения на прессе меньше минуты, т.е. температуру в момент разрушения смогли определить достаточно точно. Примечание: на прессе испытывались образцы без сверловки.

Таблица 3

Результаты исследований					
Образец	Усилие нагрузки, кг	Ход штока индикатора, мм	Начальный объем, $V_1$ мм <sup>3</sup>	Конечный объем, $V_2$ , мм <sup>3</sup>	$\Delta V/V$
Т-23	1400	0,54	25139,78	25545,44	-0,01614
Т-3	920	1,5	27047,92	27530,76	-0,01785
Т-4	846	1,3	29139,26	29444,42	-0,01047
Т-17	750	1,4	26420,52	27457,26	-0,03924
Т-6	650	3	25689,55	28168,54	-0,0965

Кривая зависимости остывания образца при комнатной температуре (20°C) приведена на рис. 10.

В таблице 4 приведены результаты экспериментов.

Таблица 4

Результаты экспериментов при исследовании прочностных пределов в случае нагрева образцов до температуры 350°C

Образец	Предварительное воздействие	Усиление нагрузки, кг	Примечание
Л-7	импульсное давление, раб. среда - вода $p=1300\text{атм}$	317	Разрушение образца
Л-4	импульсное давление, раб. среда - МЕТКА $p=1300\text{атм}$	430	Разрушение образца
88 313-89	импульсное давление, раб. среда - вода 1300 атм	699	Разрушение образца
Л-3	импульсное давление, раб. среда - вода 1400 атм	247	Разрушение образца
Л-26	новый	600	Разрушение
88 319-89	новый	763	Разрушение
Л-29	новый, не подвергался нагреву	780	
88 344-89	новый, не подвергался нагреву	1100	

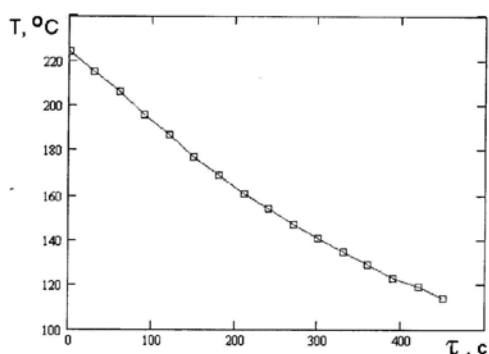


Рисунок 10 – Зависимость температуры остывания образца от времени

Образец Л-26, не подвергавшийся ранее никаким воздействиям (в таблице такие образцы обозначены как "новые") разрушился при более низком усилии нагрузки, чем "холодный" образец Л-29. Остальные нагретые образцы, подвергавшиеся ранее импульсным воздействиям в установке, разрушались при еще более низких нагрузках.

Данные исследования проводились совместно с ИХН СО РАН в рамках программы президиума РАН "Новые подходы к химии топлив и химическая электроэнергетика" по проекту "Физико-химические основы создания новых методов повышения производительности нефтяных скважин".

#### Выводы

1. Разработанный комплекс позволяет исследовать прочностные характеристики твердых пород в широком диапазоне да-

лений при различных вариантах нагружения кернов, давление на которые передается через жидкую среду. Конструкция установки позволяет определять эффективность (влияния) (обратимых) композиций на газопроницаемость образцов.

2. Определен диапазон давлений, при которых начинается трещинообразование образцов, причем для среды ИХН-100 этот процесс начинается при более низком усилии, чем для воды.

3. В испытаниях определены уровни давлений разрушения и трещинообразований образцов пород. Результаты продемонстрированы фотографиями поверхностей пород и их шлифов после испытаний.

4. При нагружении статическим давлением образцы, подвергавшиеся ранее испытаниям импульсным давлением, потеряли изначальную прочность и разрушались призначительно меньших

5. Показано, что выдержанный в жидкости керн разрушается при более низком усилии, чем "сухой".

6. Решена задача расчета внутрибаллистических параметров в манометрической бомбе, проведен учет влияния тепловых потерь на максимальное давление в установке. Это позволяет использовать ее в автономных условиях.

7. Показано, что нагретые образцы разрушаются при более низких усилиях нагрузки.

## ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

### ЛИТЕРАТУРА

1. Воларович М.П., Томашевская И.С., Будников В.А. Механика горных пород при высоких давлениях. М.: Наука, 1979. 152 с.

2. Муравлев Е.В., Алтунина Л.К., Потапов М.Г., Кувшинов В.А., Хрусталеv Ю.В., Павленко А.А. Установка для исследования физико-химических воздействий на образцы пород нефтяных скважин в условиях высоких давлений. Сборник докладов III Всероссийской научно-практической конференции "Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа". – Томск: Издательство

Ин-та оптики атмосферы СО РАН, 2004.-С. 63-66.

3. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. М.: Оборонгиз, 1962.-703 с.

4. Муравлев Е.В., Ворожцов Б.И., Хрусталеv Ю.В., Бондарчук С.С. Определение тепловых потерь в манометрической бомбе высокого давления. Материалы Первой Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых "Материалы и технологии XXI века", г. Бийск, 7-9 сентября 2005 г.