

На правах рукописи

КОВАЛЕНКО Юрий Федорович

**Геомеханика нефтяных и газовых скважин**

01.02.04 - механика деформируемого твердого тела

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Москва – 2012

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН

Официальные оппоненты: член-корреспондент РАН, профессор

**Гольдштейн Роберт Вениаминович**

доктор технических наук, профессор

**Кузнецов Сергей Васильевич**

доктор физико-математических наук, профессор

**Назарова Лариса Алексеевна**

Ведущая организация: **Учреждение Российской академии наук Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН**

Защита состоится 01 марта 2012 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 002.240.01 при Учреждении Российской академии наук Институте проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН по адресу: 119526. Москва, проспект Вернадского, д. 101, корп. 1, ауд. 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПМех РАН.

Автореферат разослан “ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2011 года

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 002.240.01 при ИПМех РАН

кандидат физико-математических наук

Е.Я. Сысоева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Современные технологии добычи нефти и газа во многом основаны на бурении наклонных и горизонтальных скважин. Однако с их использованием возникли серьезные проблемы. Оказалось, что устойчивость стволов наклонных скважин существенно зависит от деформационных и прочностных характеристик горных пород, наличия и степени их анизотропии, а также от геометрии скважин и давления на их забое. Осложнения при бурении нефтяных и газовых скважин, связанные с потерей устойчивости ствола, как правило, сопровождаются большими затратами средств на ликвидацию их последствий, в связи с чем прогнозирование и предупреждение данного вида осложнений играет немаловажную роль в снижении себестоимости строительства скважин. Кроме того, разрушение стволов скважин является одним из основных факторов, ограничивающих максимальные дебиты скважин.

Традиционным подходом к решению подобных проблем является создание механико-математических моделей и отыскание с их помощью ответов на указанные вопросы. Однако для пород с ярко выраженной анизотропией упругих и прочностных свойств (в частности для слоистых пород) подобный путь сталкивается с большими трудностями. Это связано с тем, что попытки создать адекватную механико-математическую модель, описывающую процессы разрушения породы в окрестности наклонной скважины с учетом изменения угла ее наклона, для сильно анизотропных пород приводят к ее резкому усложнению.

В свою очередь, усложнение модели неизбежно приводит к увеличению числа деформационных и прочностных параметров, входящих в модель. Экспериментальное определение этих параметров для анизотропных пород само по себе является сложной задачей, требующей сложного лабораторного оборудования. Кроме того, любая математическая модель требует принятия некоторого закона прочности породы, что для анизотропных пород также является отдельной сложной задачей.

Все это приводит к необходимости принятия определенных упрощений и допущений в модели, в результате чего практические выводы, основанные на расчетах по таким моделям, часто носят лишь оценочный характер.

Развитый в диссертации подход кардинально отличается от изложенного выше. В его основе лежит прямое моделирование процессов деформирования и разрушения горных пород в окрестности скважины на уникальном испытательном стенде трехосного независимого нагружения (ИСТНН) под действием реальных напряжений, возникающих в пласте при разной геометрии скважин и разных забойных давлениях. При этом программа нагружения исследуемых образцов, представляющих собой кубики с ребром 40 или 50 мм, определяется на основе механико-математической модели, учитывающей анизотропию деформационных и прочностных свойств горных пород.

Другой важнейшей проблемой, возникающей при разработке нефтяных и газовых месторождений, является повышение продуктивности скважин. Одной из основных причин снижения дебита скважин в процессе их эксплуатации является ухудшение фильтрационных свойств пласта, что связано в основном с загрязнением и заиливанием естественных фильтрационных каналов при эксплуатации скважин.

Применяемые в настоящее время методы воздействия на ПЗП с целью повышения ее проницаемости направлены в основном на «очистку» существующих фильтрационных каналов от посторонних частиц. Но зачастую это оказывается невозможным.

Имеется принципиально другая возможность восстановления проницаемости призабойной зоны пласта, основанная на инициировании процесса растрескивания и разрушения породы в окрестности скважины. Академик С.А.Христианович предложил использовать этот процесс для повышения проницаемости призабойной зоны пласта, и на основе этой идеи был разработан новый метод повышения продуктивности нефтяных и газовых скважин – метод направленной разгрузки пласта.

Идея метода направленной разгрузки пласта состоит в том, чтобы за счет неравномерной направленной разгрузки породы от горного давления создавать в окрестности скважины напряжения, приводящие к растрескиванию породы и появлению

в пласте искусственной системы множественных макротрещин. Эта система трещин играет роль искусственной системы фильтрационных каналов, причем проницаемость этой новой системы значительно (на порядок и более) превышает природную проницаемость пласта.

В результате исследований и разработок, представленных в диссертации, разработаны теоретические и экспериментальные положения о процессах деформирования и разрушения анизотропных горных пород, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, направленное на решение научной проблемы, имеющей важное практическое значение - повышение эффективности бурения нефтяных и газовых скважин и увеличения их продуктивности.

**Целями работы были:**

Разработка нового подхода к решению геомеханических проблем, связанных с деформированием и разрушением горных пород в окрестности нефтяных и газовых скважин под действием возникающих в них напряжений.

Создание методики определения деформационных и прочностных характеристик анизотропных горных пород в условиях трехосного неравнокомпонентного нагружения образцов породы на установке ИСТНН.

Создание механико-математической модели устойчивости стволов наклонных и горизонтальных скважин при их проводке и эксплуатации, в основе которой лежит положение, что основным фактором, влияющим на устойчивость стволов скважин, является анизотропия прочностных и деформационных свойств горных пород.

Прямое моделирование на установке ИСТНН на основе разработанной механико-математической модели процессов деформирования и разрушения горных пород при бурения и эксплуатации скважин.

Разработка методики экспериментального определения на установке ИСТНН параметров бурения и эксплуатации наклонных и горизонтальных скважин.

Разработка методики определения параметров бурения нефтяных и газовых скважин (в том числе горизонтальных) на основании результатов одноосных испытаний образцов горных пород.

Апробация развитого подхода для определения оптимальных параметров бурения скважин на конкретных месторождениях.

Разработка нового способа повышения продуктивности нефтяных и газовых скважин – метода направленной разгрузки пласта.

Разработка технологии реализации метода направленной разгрузки пласта на скважинах нефтяных месторождений.

Проведение опытно-промысловых испытаний метода направленной разгрузки пласта по разработанной технологии на ряде нефтяных месторождений.

Для достижения поставленных целей ставились **следующие задачи**:

Экспериментальное изучение на испытательной системе трехосного независимого нагружения ИСТНН деформационных и прочностных характеристик анизотропных горных пород.

Изучение зависимости напряженного состояния, возникающего в окрестности наклонно направленных скважин, бурящихся в анизотропных (слоистых) горных породах, от геометрии скважин и величины давления на их забое.

Прямое моделирование на установке ИСТНН процессов деформирования и разрушения горных пород в окрестности наклонных и горизонтальных скважин.

Экспериментальное изучение на установке ИСТНН влияния напряжений на фильтрационные свойства горных пород.

Анализ напряженных состояний и размера зон разрушения, возникающих в окрестности нефтяных и газовых скважин, с учетом фильтрации нефти (газа) и зависимости их вязкости и плотности от давления.

Проведение на установке ИСТНН испытаний кернового материала из коллекторов конкретных месторождений с целью определения параметров и режимов реализации на них метода направленной разгрузки пласта.

Проведение опытно-промысловых работ по методу направленной разгрузки пласта на ряде нефтяных месторождений.

**Методы исследований.** Теоретический анализ проводился с использованием современных представлений и методов теории упругости и теории разрушения. При

проведении численных расчетов применялся пакета программ ANSYS, разработанный на основе метода конечных элементов. Для определения упругих и прочностных характеристик горных пород и физического моделирования процессов деформирования и разрушения в окрестности наклонных и горизонтальных скважин использовался уникальный экспериментальный стенд – испытательная система трехосного независимого нагружения, созданная в Институте проблем механики РАН. При реализации метода направленной разгрузки пласта на нефтяных скважинах применялось современное нефтепромысловое оборудование и материалы.

**На защиту выносятся следующие основные положения.**

Новый подход к решению геомеханических проблем, связанных с деформированием и разрушением горных пород в окрестности нефтяных газовых скважин под действием возникающих в них напряжений.

Методика определения на испытательной системе трехосного независимого нагружения ИСТНН деформационных, прочностных и фильтрационных характеристик горных пород (в том числе анизотропных).

Механико-математическая модель устойчивости стволов наклонных и горизонтальных скважин при их проводке и эксплуатации в анизотропных (слоистых) горных породах.

Методика определения оптимальных параметров бурения и эксплуатации скважин (оптимальных углов наклона скважины и допустимых давлений на ее забое) путем прямого моделирования этих процессов на испытательном стенде ИСТНН.

Новый способ повышения продуктивности нефтяных и газовых скважин – метод направленной разгрузки пласта.

Решение задачи о распределении напряжений, возникающих в окрестности нефтяной (газовой) скважины с учетом процесса фильтрации нефти (газа) и зависимости их вязкости и плотности от давления;

Анализ на основе полученного решения размеров зон разрушения, возникающих в окрестности нефтяной (газовой) скважины при понижении давления на ее забое, для различных критериев местного разрушения породы;

**Достоверность полученных результатов исследований** подтверждается использованием при анализе фундаментальных законов механики твердого деформируемого тела, применением высокоточного и неоднократно апробированного экспериментального оборудования, соответствием полученных данных по оптимальным параметрам бурения наклонных и горизонтальных скважин наблюдавшимся при разбуривании конкретных месторождений, положительными результатами опытно-промысловых испытаний метода направленной разгрузки пласта на скважинах.

**Научная новизна результатов работы и практическая ценность** заключается в том, что развит новый подход к исследованию процессов деформирования и разрушения анизотропных горных пород, возникающих при разработке нефтяных и газовых месторождений. На его основе создана новая методика определения на установке ИСТНН параметров бурения наклонных и горизонтальных скважин и методика определения допустимых депрессий при их эксплуатации. Разработана новая технология повышения дебита нефтяных и газовых скважин - метод направленной разгрузки пласта. Проведены успешные опытно-промысловые испытания технологии на ряде нефтяных месторождений Западной Сибири, Приобья и Приуралья.

#### **Апробация работы.**

Основные результаты работы докладывались, обсуждались и представлялись на международных и российских форумах и конференциях: VIII и IX Всероссийских съездах по теоретической и прикладной механике (Пермь, 2001, Нижний Новгород, 2006, Нижний Новгород, 2011); научно-практических конференциях по бурению и повышению нефтеотдачи скважин (Москва, 2003, 2004, 2005), международных салонах изобретений и инноваций (Брюссель, 2007 - серебряная медаль, Страсбург, 2009 – золотая медаль, Страсбург, 2010 – серебряная медаль), The 12th International Congress on Rock Mechanics (Beijing, October 18-21, 2011).

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертационного исследования изложены в 32 публикации, список которых представлен в конце автореферата, 15 из них представлены в изданиях из перечня ВАК.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы из 118 наименований, содержит 318 страниц.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дается обоснование необходимости разработки нового подхода к решению геомеханических проблем, связанных с деформированием и разрушением анизотропных горных пород при разработке нефтяных и газовых месторождений под действием возникающих в них напряжений, и приведен обзор основных исследований в этом направлении. Определены цели диссертации и приведены предлагаемые пути их решения. Кратко сформулированы основные результаты работы по главам.

**В первой главе** приведено подробное описание испытательной системы трехосного независимого нагружения (ИСТНН), позволяющей реализовать предложенный в диссертации новый подход к решению поставленных задач.

В настоящее время для определения упругих и прочностных характеристик горных пород главным образом используются экспериментальные установки, в основу которых заложен принцип Кармана. Испытываемые образцы представляют собой цилиндры длиной 70 – 80 мм и диаметром 30 – 40 мм. Нагружение образцов осуществляется сжатием вдоль образующей образца и всесторонним обжатием по боковой поверхности. Таким образом, в установках, основанных на принципе Кармана, можно осуществлять независимое нагружение образцов лишь по двум осям.

Этого оказывается достаточным для определения упругих и некоторых прочностных характеристик горных пород в предположении их изотропности. Для суще-

ственно анизотропных пород определение этих параметров на установках с кармановской схемой оказывается невозможным. При этом именно анизотропия упругих и прочностных свойств горных пород является основной причиной ряда серьезных проблем, возникающих при проводке и эксплуатации наклонных и горизонтальных скважин.

Важно также отметить, что поскольку в установках, использующих схему Кармана, осуществляется двухосное нагружение образца, то эти установки не позволяют воспроизводить реальные напряженно-деформированные состояния, возникающие в пласте, которые являются существенно трехмерными.

Всех этих недостатков лишена созданная в Институте проблем механики РАН испытательная система трехосного независимого нагружения (ИСТНН). Установка ИСТНН представляет собой уникальный исследовательский комплекс для изучения деформационных, прочностных и фильтрационных характеристик горных пород.



Рис.1. Испытательная система трехосного независимого нагружения.

Установка ИСТНН позволяет нагружать образцы горных пород в форме куба с ребром 40 или 50 мм независимо по каждому из трех направлений, что достигается благодаря примененной в конструкции нагружающего узла оригинальной кинематической схеме, которая позволяет нажимным плитам сближаться в трех направлениях, не создавая препятствия друг другу.

По сравнению с другими испытательными средствами на сложное нагружение с использованием жестких нажимных плит она обеспечивает равномерное приложение нагрузок по всей площади образца в течение всего процесса деформирования, включая стадию разрушения. Это существенно упрощает анализ результатов экспериментов, так как отпадает необходимость учета возможности концентрации напряжений вблизи ребра образца. Кроме того, это открывает возможность воссоздавать в ходе испытаний любые напряженные состояния, возникающие в призабойной зоне пласта при бурении скважины, ее освоении и эксплуатации, и изучать их влияние на фильтрационные свойства породы.

ИСТНН относится к классу электрогидравлических испытательных машин с автоматизированной системой управления. Испытательная система представляет собой комплекс, включающий силовой агрегат, маслонасосную станцию (МНС) с пультом управления, блок автоматического управления, измерительно-информационную систему. Наибольшее давление рабочей жидкости в гидроцилиндре составляет 200 МПа, при этом гидроцилиндр развивает усилие 500 кН. Три пары плит образуют нагружающий узел, в котором нагрузки прикладываются по всей поверхности призматического образца. Нагружающие и опорные плиты снабжены комплектами сменных наконечников, позволяющих проводить испытания образцов в форме куба с ребром 40 мм и 50 мм.

В ИСТНН применена четырехканальная система управления с электрогидравлическими преобразователями (сервоклапанами). В ходе опыта имеется возможность управлять процессом нагружения либо по усилиям, либо по перемещениям по каждому из трех каналов, и реализовать практически любую траекторию нагружения (деформирования) образца, включая процесс разрушения.

Установка ИСТНН позволяет определять деформационные и прочностные характеристики анизотропных горных пород. Для определения типа анизотропии породы используется специально созданная установка по измерению скоростей распространения продольных ультразвуковых волн в трех направлениях. После этого путем испытания образцов породы на установке ИСТНН по специальным программам нагружения определяются упругие модули породы.

Для определения прочностных характеристик горной породы (коэффициента сцепления и угла внутреннего трения) необходимо проведение специальных экспериментов, позволяющих построить круги Мора при различных уровнях нагружения образца. Сложность заключается в том, что желательно все опыты проводить на одном образце. При этом каждое нагружение образца (цикл) необходимо доводить до уровня, когда образец начнет деформироваться пластически, но еще будет оставаться целым. Для этого необходим постоянный контроль за состоянием образца в ходе опыта, чего можно достичь лишь за счет вывода в режиме он-лайн на экран компьютера кривых деформирования образца и одновременного вычисления текущих деформационных характеристик породы. Кроме того, управление нагружением образца должно осуществляться по перемещениям, а не по нагрузке. В противном случае вовремя остановить нагружение образца в пластической области, не доводя его до разрушения, практически невозможно. Испытательная система трехосного независимого нагружения ИСТНН дает возможность проведения подобных работ.

В качестве примера на рис.2 и рис.3 показаны кривая  $\sigma$ – $\epsilon$  и зависимость касательного модуля от величины действующего по оси керна напряжения, регистрировавшиеся в ходе первого цикла испытания образца из Штокмановского ГКМ.

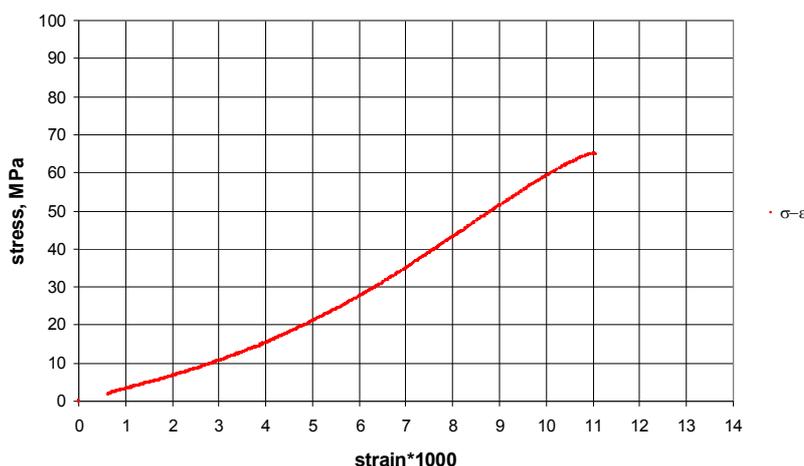


Рис.2. Кривая  $\sigma$  –  $\epsilon$  на первом цикле нагружения

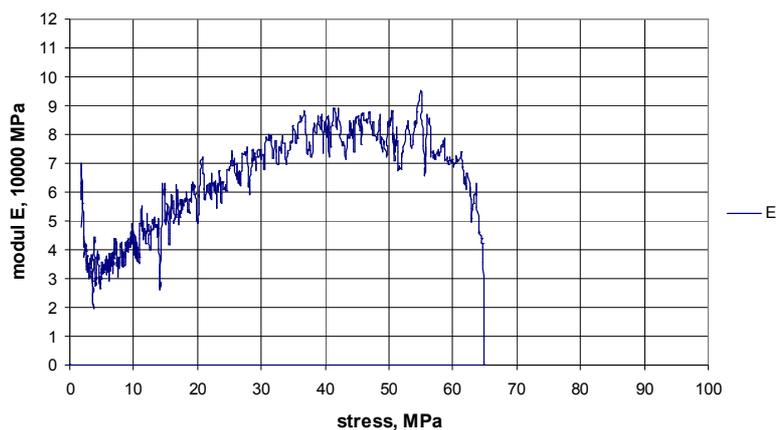


Рис.3. Изменение касательного модуля на первом цикле нагружения.

Важной особенностью установки ИСТНН является возможность исследования зависимости проницаемости горных пород от величины и вида действующих напряжений. Известно, что проницаемость горных пород может как уменьшаться, так и увеличиваться (причем необратимо) в зависимости от возникающих в них напряжений. Тип и уровень этих напряжений определяются конструкцией забоя (наличие или отсутствие обсадки, тип перфорации и так далее) и создаваемыми на забое скважины депрессиями. Установка ИСТНН позволяет моделировать эти условия на образцах породы и непрерывно регистрировать при этом изменение их проницаемости.

На установке ИСТНН реализована схема эксперимента, представляющего большой интерес при решении проблем, связанных с устойчивостью стволов горизонтальных скважин и определению максимально допустимых депрессий на их забое. Такая схема эксперимента практически не используется в практике российских исследовательских организаций. Это опыты по прямому моделированию на установке ИСТНН процесса создания депрессий на забое горизонтальной скважины с целью определения депрессий, при которых начинается вынос песка из скважины и разрушение стенок скважины.

Необходимость постановки подобных экспериментов возникла в ходе проведения работ по изучению деформационных и прочностных свойств пород Штокмановского ГКМ, которые велись совместно со специалистами французской компании

«Total». Эти эксперименты можно рассматривать как аналоги известным испытаниям цилиндрических образцов по схеме «полый цилиндр».

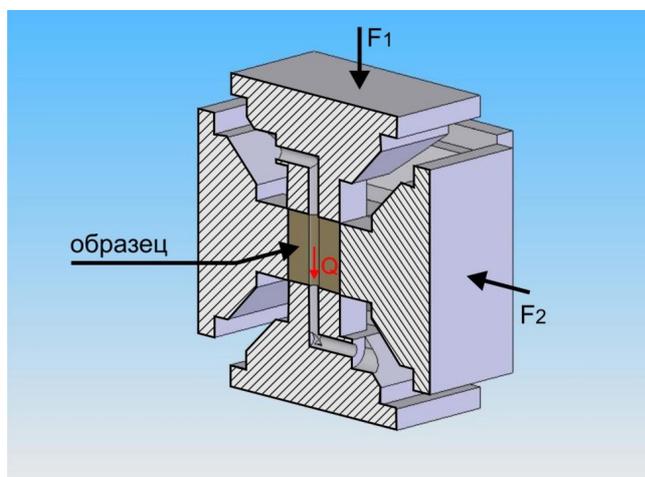


Рис.4. Схема испытания образца с отверстием

Для испытаний используются специально изготовленные кубические образцы с центральным отверстием (диаметром 10 мм) и две нажимные плиты с центральными каналами, рис.4. В ходе эксперимента через канал в наконечнике верхней активной нажимной плиты, совпадающий с отверстием в образце, продувается воздух под давлением около 0,1 МПа. Прошедший через канал в образце воздух отводится через канал в наконечнике нижней нажимной плиты, совпадающий с отверстием в образце. Через это отверстие по специальной трубке выносимый песок поступает на электронные весы, соединенные с компьютером.

Так же, как и в эксперименте «полый цилиндр», образец равномерно обжимается со всех сторон нагрузкой, периодически поднимавшейся в ходе опыта. Нагружение образца производилось до его разрушения.

В ходе всего эксперимента измеряется вес песка, выносимого через отверстие, и регистрируются деформации образца по трем осям.

На рис.5 приведены результаты испытания одного из образцов. Синей линией показана программа нагружения образца, красной – зависимость веса вынесенного песка от величины внешнего обжатия.

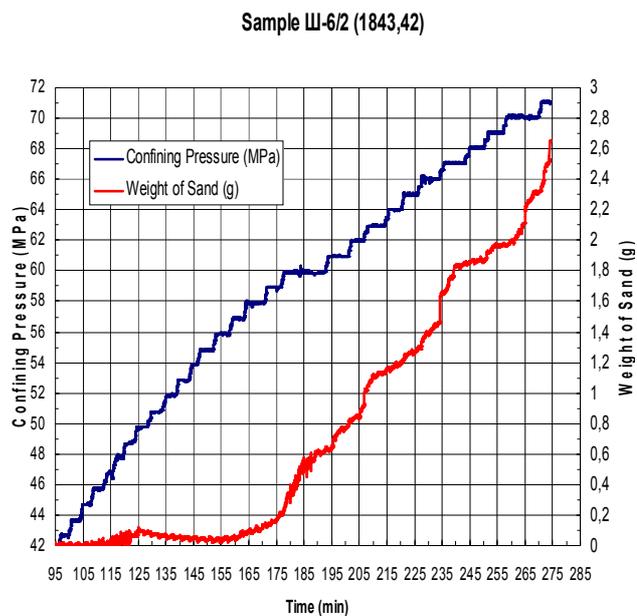


Рис.5. Зависимость веса вынесенного песка от нагрузки

На рис.6 показаны кривые деформирования образца по трем осям в ходе опыта.

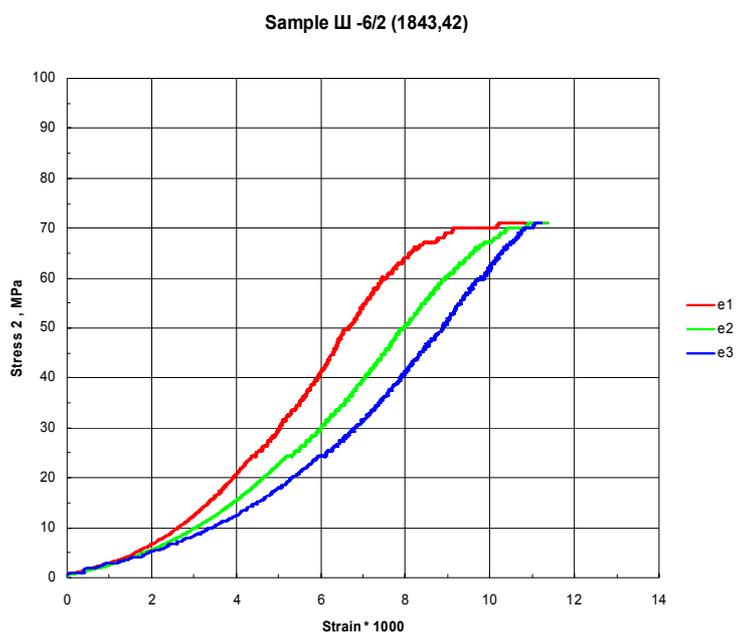


Рис.6. Кривые деформирования образца в ходе опыта

Таким образом, установка ИСТНН позволяет проводить эксперименты, аналогичные опытам по схеме «полый цилиндр». Более того, испытания на установке ИСТНН обладают значительными преимуществами:

- ИСТНН позволяет нагружать кубический образец независимо по каждой из трех осей по любой программе нагружения, моделирующей реальные напряжения, возникающие в пласте, в том числе и наличие бокового распора.

- ИСТНН позволяет измерять деформации образца по каждой из трех осей и фиксировать начало разрушения стенок отверстия по отклонению кривых деформирования образца от линейности. Как показали опыты, это обстоятельство дает дополнительную важную информацию об устойчивости стенок нефтяных и газовых скважин.

**Во второй главе** излагается новый подход к анализу процессов деформирования и разрушения горных пород (в том числе анизотропных) под действием возникающих в них напряжений.

Проведенные в последние годы в лаборатории геомеханики Института проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН теоретические и экспериментальные исследования показали, что геомеханический подход лежит в основе решения важнейшей проблемы, возникающей при разработке месторождений нефти и газа – устойчивости стволов скважин при их бурении и эксплуатации. Особенно остро этот вопрос встал в последнее время, когда основным инструментом разработки нефтяных и газовых месторождений стала технология бурения наклонных и горизонтальных скважин. При ее реализации возник целый ряд совершенно новых проблем, не имевших место при бурении и эксплуатации вертикальных скважин. На первый план вышли вопросы устойчивости стволов скважин при бурении и ее зависимости от геометрии скважины, вопросы определения допустимых депрессий при эксплуатации горизонтальных скважин и др.

Традиционным подходом к решению подобных проблем является создание математических моделей и попытка с их помощью ответить на указанные вопросы. Однако для пород с ярко выраженной анизотропией упругих и прочностных свойств (в частности для слоистых пород) попытки создать адекватные математические модели с одной стороны приводят к их резкому усложнению, а с другой – к неизбежному увеличению числа деформационных и прочностных параметров, входящих в

модель, экспериментальное определение которых само по себе является сложной задачей, требующей сложного лабораторного оборудования.

Развиваемый в Институте проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН подход кардинально отличается от общепринятого. В разработанном подходе математическое моделирование при ответе на вопрос о деформировании и разрушении горной породы под действием приложенных напряжений предлагается заменить прямым моделированием этих процессов на испытательной системе ИСТНН. Оно включает в себя два этапа.

Первоначально на кубических образцах определяется тип анизотропии горных пород и по специальным программам нагружения измеряются их деформационные и прочностные характеристики. Затем рассчитываются напряжения, возникающие в пласте при различных параметрах изучаемых процессов, и определяются наиболее опасные места с точки зрения начала разрушения. Найденные зависимости используются для составления программ нагружения образцов на установке ИСТНН при последующем моделировании.

На втором этапе производится моделирование изучаемых процессов на установке ИСТНН. С этой целью изготавливаются специальные образцы, ориентация которых относительно осей анизотропии соответствует направлению главных напряжений в наиболее опасных местах. Затем образцы нагружаются по программам нагружения, составленным на первом этапе

Разработанный подход использован для решения проблемы устойчивости стволов наклонных и горизонтальных скважин при их проводке и эксплуатации.

Ключевой вопрос, который необходимо решить до проведения моделирования на установке ИСТНН – это программы нагружения образцов, отвечающие реальным напряженным состояниям, возникающим в окрестности наклонных скважин при различных углах наклона скважин и давлениях на их забое. Для их выбора необходимо знать наиболее опасные точки на контуре скважины и значения напряжений в этих точках.

С этой целью в работе была разработана механико-математическая модель явления, согласно которой основным фактором, влияющим на устойчивость стволов

скважин, является анизотропия прочностных свойств пород, в которых осуществляется проводка скважины. Эта анизотропия обусловлена наличием плоскостей напластования, являющимися по существу поверхностями ослабления, вдоль которых прочностные характеристики значительно понижены по сравнению с другими направлениями. Поэтому можно ожидать, что именно по этим поверхностям в первую очередь будет происходить разрушение породы в ходе проводки скважины под действием возникающих на них касательных напряжений.

Начало разрушения определяется двумя основными факторами:

- величиной касательных напряжений, действующих в плоскостях напластования (ослабления);

- прочностными характеристиками породы, и в первую очередь прочностными характеристиками вдоль плоскостей напластования;

Величина касательных напряжений, действующих на контуре скважины в плоскостях напластования, зависит от угла наклона скважины к этим поверхностям, точки на контуре скважины и давления жидкости в скважине. При незначительном угле наклона скважины касательные напряжения в горизонтальных плоскостях невелики. При увеличении угла наклона скважины растут и касательные напряжения в плоскостях напластования, т.е. опасность разрушения породы на контуре скважины увеличивается.

На рис.7 показан участок наклонной скважины, пробуренной в породе, обладающей горизонтальным напластованием.

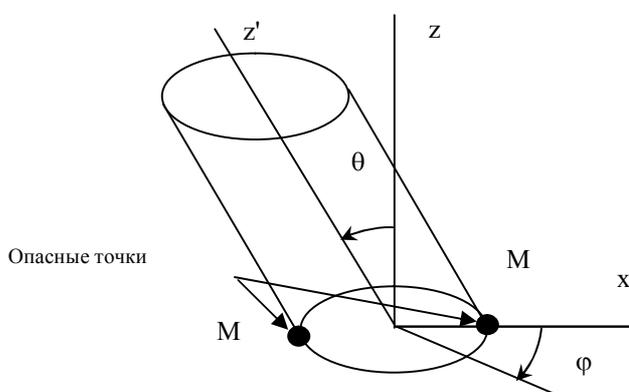


Рис.7. Положение опасных точек при малых углах наклона.

На рис.7 ось  $z$  – вертикальная ось, ось  $z'$  – ось скважины, угол  $\theta$  – угол наклона скважины к вертикали. Сечение скважины горизонтальной плоскостью (плоскостью напластования) представляет собой эллипс, на рисунке угол  $\varphi$  – угол между большой полуосью такого эллипса и рассматриваемой точкой.

Абсолютная величина касательных напряжений в плоскости ослаблений (горизонтальной плоскости) может быть вычислена путем преобразований компонент тензора напряжений к системе координат, связанной с плоскостью напластования следующим образом

$$\tau = (q - p_c) \sin \theta \sqrt{1 - \cos^2 2\varphi \sin^2 \theta} \quad (1)$$

Сжимающие напряжения, нормальные к плоскости напластования, будут

$$\sigma_n = q - (q - p_c) \cos 2\varphi \sin^2 \theta \quad (2)$$

В качестве критерия разрушения породы по плоскостям напластования вполне обоснованно принять обычный для горных пород критерий типа Кулона - Мора, согласно которому разрушение на этих плоскостях происходит при достижении касательным напряжением предельной величины

$$[\tau] = k - \sigma_n \operatorname{tg} \rho \quad (3)$$

где  $k$  и  $\rho$  – модуль сцепления и угол внутреннего трения породы, являющиеся прочностными характеристиками породы. Здесь и далее сжимающие напряжения считаются отрицательными.

Следовательно, наиболее опасными точками контура будут те точки, для которых комбинация

$$Q(\theta, \varphi) = \tau + \sigma_n \operatorname{tg} \rho - k = \max \quad (4)$$

будет максимальной. Результат получается не очевидным. Величина критического угла  $\varphi$ , условие разрушения (3) и область применения даются следующими формулами

для  $0 \leq \theta \leq \rho$

$$\varphi = 0 \quad (5)$$

$$(q - p_c) \sin \theta (\cos \theta + \operatorname{tg} \rho \sin \theta) + q \operatorname{tg} \rho - k = 0 \quad (6)$$

для  $\rho \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$

$$\varphi = \frac{1}{2} \arccos \left[ \frac{\sin \rho}{\sin \theta} \right] \quad (7)$$

$$(q - p_c) \sin \theta \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \rho} + q \operatorname{tg} \rho - k = 0 \quad (8)$$

Таким образом, для малых углов наклона скважины наиболее опасные точки лежат в плоскости, образуемой вертикалью и осью скважины, рис.7. Для больших углов наклона скважины, опасные точки смещаются по окружности на угол, определяемый выражением (7), рис. 8.

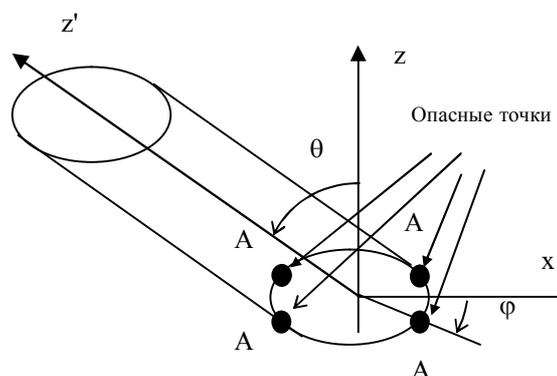


Рис.8. Положение опасных точек для больших углов наклона скважины.

На рис.9 представлены распределения комбинаций напряжений (4) в зависимости от полярного угла  $\varphi$ , для различных углов наклона скважины  $\theta$ . Угол внутреннего трения взят равным  $30^{\circ}$ .

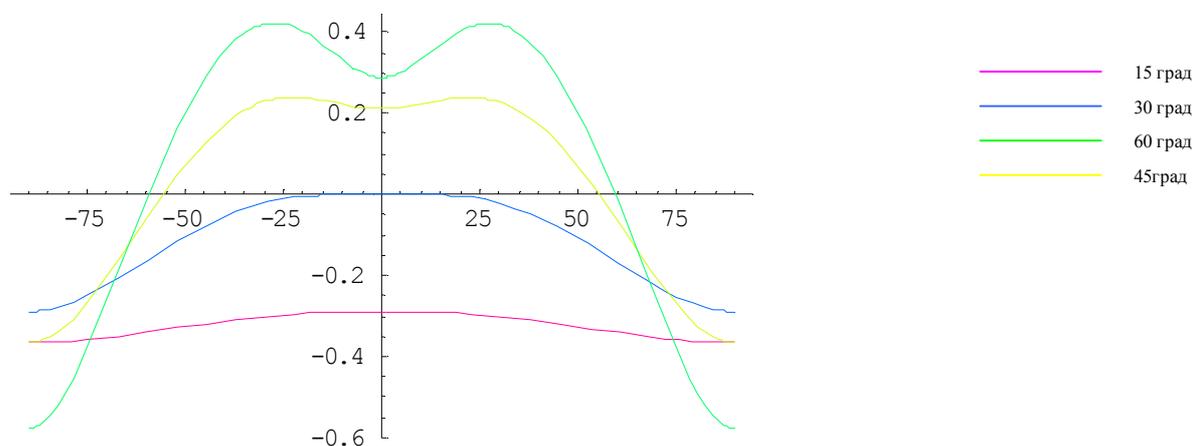


Рис.9. Распределения комбинаций напряжений (4) в зависимости от полярного угла  $\varphi$  для различных углов наклона скважины  $\theta$ .

На рис.9 представлены распределения комбинации напряжений (4) в зависимости от полярного угла  $\varphi$ , для различных углов наклона скважины  $\theta$ . Угол внутреннего трения  $\rho$  был взят равным  $15^{\circ}$ . Расчеты производились для следующих условий - глубина скважин около 2900 м и плотность бурового раствора  $1,12 \text{ г/см}^3$ , чему соответствует горное давление  $q = 66,5 \text{ МПа}$  и и давление на забое скважины  $p_c = 32,5 \text{ МПа}$ .

Из рис.9 следует, что первоначально с увеличением угла наклона скважины величина параметра  $Q$  растет во всех точках контура скважины, достигая максимума в окрестности точки М, соответствующей  $\varphi=0$ . При некотором угле наклона скважины величина параметра  $Q$  касательное напряжение в точке М достигают предельного значения  $k$ . При дальнейшем увеличении угла наклона скважины размер области, в которой параметр  $Q$  достигает значения  $k$ , увеличивается. Поэтому по ме-

ре увеличения наклона скважины зона предельных напряжений расширяется, и, естественно, повышается вероятность разрушения.

В качестве минимального угла наклона скважины, при котором может начаться потеря устойчивости, естественно принять угол, когда в точке М касательные напряжения достигают предела прочности. Согласно (3) и (4) это означает, что в этой точке величина  $Q$  становится равной коэффициенту сцепления  $k$ . Для значения коэффициента сцепления 5 МПа (рис.9) это происходит при угле наклона скважины около  $50^{\circ}$ .

Из рис.9 следует важный вывод, при углах наклона скважины больше  $60^{\circ}$  вероятность разрушения уменьшается. Это связано с тем, что при углах больше  $60^{\circ}$  величина параметра  $Q$  вблизи точки М начинается уменьшаться, в результате чего зона, в которой касательные напряжения достигают предельного значения, значительно сужается. Таким образом, можно сделать вывод, что наиболее опасными с точки зрения потери устойчивости скважин являются углы наклона  $40^{\circ} - 60^{\circ}$  в зависимости от модуля сцепления и угла внутреннего трения породы.

В качестве программы нагружения образцов при моделировании на установке ИСТНН условий в окрестности скважины при различных углах ее наклона было выбрано изменение напряжений  $s_r, s_{\varphi}, s_z$  в точке М при изменении давления в скважине.

Поскольку для проницаемых и непроницаемых пород эти напряжения различны, то различными будут и соответствующие программы нагружения. На рис.10 и рис.11 показаны программы нагружения образцов для непроницаемых и проницаемых пород соответственно.

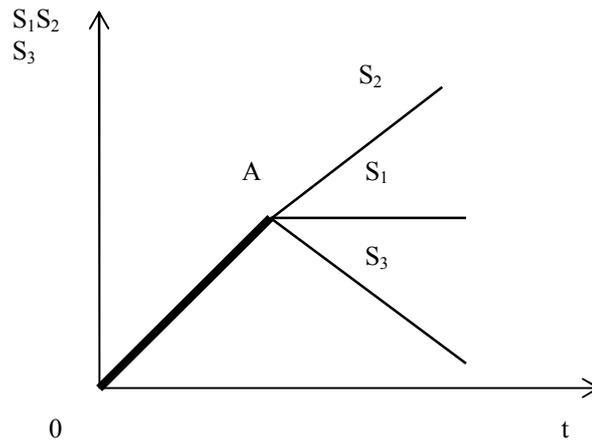


Рис. 10. Программа нагружения для непроницаемых пород

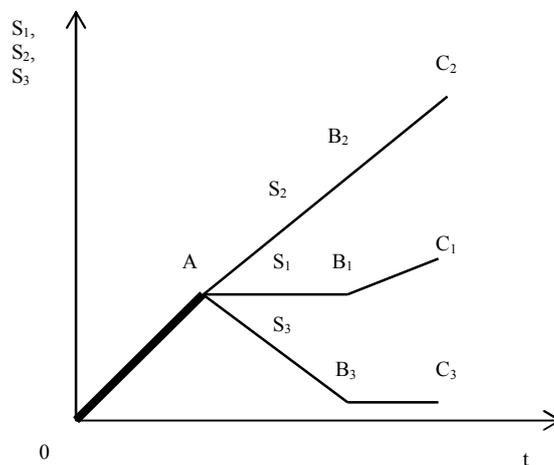


Рис. 11. Программа нагружения для проницаемых пород

Изображенные на них напряжения  $S_1, S_2, S_3$  относятся к осям нагружающего узла ИСТНН, в которых по оси 2 напряжение всегда возрастает, т.е. напряжение  $S_2$  является так называемым параметром нагружения. Применительно к осям скважины напряжение  $S_2$  отвечает напряжению  $S_\theta$ , напряжение  $S_3$  соответствует радиальному напряжению  $S_r$ , т.е. равно давлению жидкости в скважине, а напряжение  $S_1$  равно  $S_2$ . Точки А на рис.10 и рис.11 соответствуют напряжениям, действовавшим в грунтовом скелете до пробуривания скважины. Для непроницаемых пород это напряжение равно горному давлению на данной глубине, а в случае проницаемых пород – эффективному напряжению на данной глубине, т.е. разности между горным давлением и пластовым давлением нефти (газа). Различным значениям давлений на забое скважины соответствуют определенные точки напряжения  $S_3$  на рис.10 и рис.11.

Для исследования зависимости устойчивости стенок скважины от угла наклона скважины из кернового материала изготавливаются образцы породы, соответствующие различным углам наклона скважины к вертикали. С этой целью образцы выпиливаются таким образом, чтобы их вертикальная ось составляла с осью керна угол, равный углу наклона скважины. Обычно это углы  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ .

Затем образцы поочередно помещаются в установку ИСТНН и нагружаются по программе, показанной на рис.10, для непроницаемых пород, и по программе, показанной на рис.11, для проницаемых пород.

При значениях нагрузки на образец, отвечающих давлениям на забое скважины в интересующем интервале значений, осуществляется продолжительная выдержка образца при постоянной нагрузке для регистрации деформации ползучести. В ходе каждого опыта регистрируется деформация образца во времени по каждому из трех направлений.

Подобные опыты проводятся для различных давлений на забое скважины. Если при данном давлении на забое ползучесть образца является ограниченной, т.е. его деформация спустя некоторое время перестает нарастать, то это давление на забое скважины считается допустимым. Если ползучесть образца носит установившийся характер, т.е. деформация образца нарастает со временем, то при данном давлении на забое скважины следует ожидать потери устойчивости ствола скважины.

В результате анализа данных экспериментов определяются допустимые параметры бурения скважин (угол наклона, плотность бурового раствора, время устойчивости ствола скважин) и допустимые депрессии при проводке скважин в продуктивных пластах и вмещающих породах.

На основе изложенной методики были выполнены исследования по определению допустимых параметров бурения и эксплуатации скважин более, чем на 10 нефтяных и газовых месторождениях ОАО «Газпром», ОАО «Сургутнефтегаз», ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь».

В качестве примера на рис.12 и рис.13 показаны результаты испытаний по указанной методике двух образцов породы из Рогожниковского месторождения ОАО «Сургутнефтегаз, вырезанных под углами  $30^\circ$  (рис.12) и  $45^\circ$  (рис.13) относи-

тельно вертикальной оси керна, что отвечает соответствующим углам наклона скважины. На них изображены кривые ползучести образцов в направлении, отвечающем радиусу скважины. Кривые на этих рисунках относятся к различным плотностям бурового раствора.

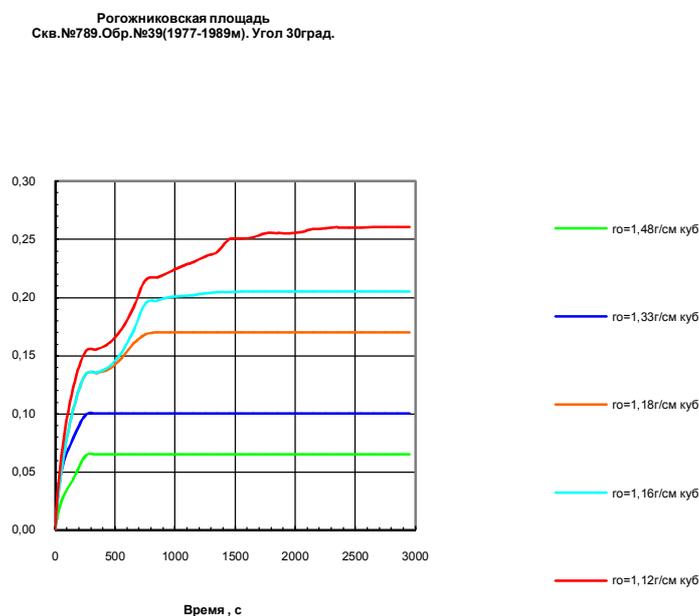


Рис.12. Кривые ползучести образца для угла наклона скважины  $30^{\circ}$

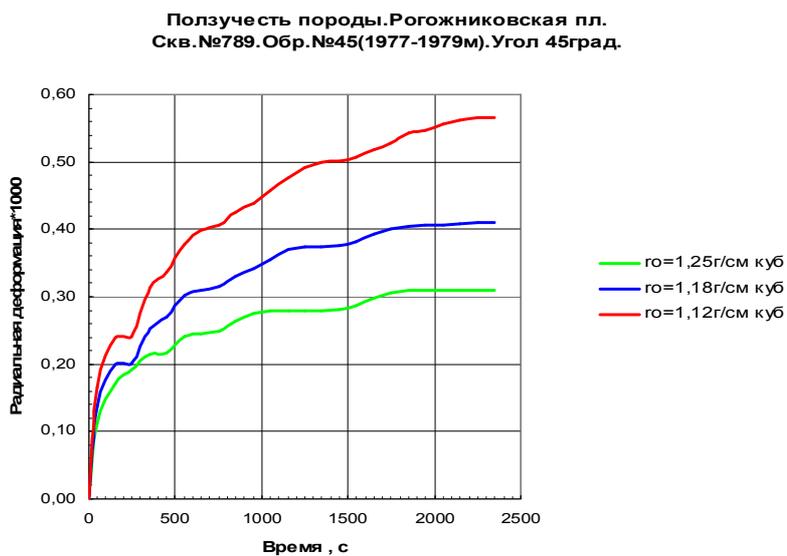


Рис.13. Кривые ползучести образца для угла наклона скважины  $45^{\circ}$

Из рис.12 видно, что с уменьшением плотности бурового раствора, т.е. с уменьшением давления на забое скважины, интенсивность ползучести породы в направлении скважины возрастает, однако даже при минимальной плотности бурового раствора 1,14 г/см.куб. ползучесть носила ограниченный характер, т.е. со временем она прекращалась. Это означает, что скважина с углом наклона  $30^{\circ}$  будет устойчива при всех допустимых плотностях бурового раствора.

Иная картина наблюдалась при испытании образца, вырезанного под углом  $45^{\circ}$ , рис.13. Из него видно, что если при плотности бурового раствора 1,25 г/см.куб. ползучесть образца была ограниченной, то при плотности 1,15 г/см.куб., а тем более 1,12 г/см.куб. она уже стала неограниченной, т.е. увеличивалась со временем. Это означает, что при угле наклона скважины  $45^{\circ}$  и при плотностях бурового раствора 1,15 г/см.куб. или меньше возможно разрушение стенок скважины.

На рис.14 приведена фотография образца породы, вырезанного под углом  $30^{\circ}$  и доведенного в ходе испытаний до разрушения. Из фотографии хорошо видно, что разрушение произошло строго по плоскости напластования, что согласуется с изложенными выше представлениями.

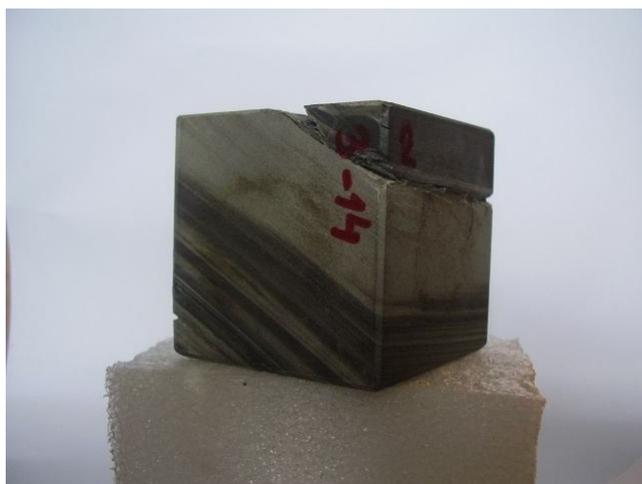


Рис.14. Образец, отвечающий углу наклона скважины  $30^{\circ}$ , после испытаний

**Глава 3** посвящена разработке методики определения параметров устойчивости стволов скважин при испытании образцов горных пород на одноосное сжатие.

В гл.2 приведены методика и результаты определения параметров устойчивости стволов скважин при испытании образцов породы на испытательном стенде трехосного независимого нагружения ИСТНН. Но ИСТНН – это уникальная установка, позволяющая с высокой точностью моделировать реальные напряженные – деформированные состояния, возникающие в окрестности скважин при их бурении и эксплуатации. В то же время желательно иметь возможность определять параметры устойчивости стволов скважин, пусть и с меньшей точностью, на стандартных установках для испытания цилиндрических образцов горных пород на одноосное сжатие.

Очевидно, что прямое моделирование устойчивости стволов наклонных скважин на такой установке невозможно. Более того, возможность использовать лишь одноосное сжатие цилиндрических образцов значительно осложняет определение деформационных и прочностных характеристик породы.

Тем не менее, результаты многочисленных исследований на установке ИСТНН механических свойств пород из различных нефтяных и газовых месторождений позволили предложить способ оценки устойчивости стволов наклонных скважин на основе одноосного сжатия цилиндрических образцов керна для практически важного и широко распространенного класса пород. Речь идет о породах с выраженным напластованием.

Предложенный в гл.3 подход заключается в следующем.

1. Учитывая возможности установок на одноосное сжатие (прессов), разработана достаточно простая механико-математическая модель зависимости устойчивости стволов наклонных скважин от их геометрии. Эта модель основана на предположении о существенной анизотропии упругих и прочностных свойств породы, связанной с наличием напластования. В качестве параметров в эту модель входят модуль упругости породы и два прочностных параметра – модуль сцепления и угол внутреннего трения вдоль на поверхностях напластования, которые должны быть определены в результате одноосных испытаний образцов породы на прессе. Отме-

тим, что, несмотря на кажущуюся простоту, предлагаемая механико-математическая модель хорошо описывает поведение реальных пород, что подтвердили многочисленные испытания кернавого материала на установке ИСТНН.

2. На основе развитой модели предложен способ определения необходимых для проведения расчетов упругих и прочностных параметров с помощью испытания цилиндрических образцов породы на одноосное сжатие.

3. Создана методика изготовления цилиндрических образцов породы, испытания их на одноосном прессе и обработки полученных результатов с целью определения параметров бурения наклонных скважин, обеспечивающих устойчивость их стволов.

Для тестирования разработанной методики были проведены испытания кернавого материала на установке SHIMADZU UH-300 kNI, позволяющей испытывать цилиндрические образцы горных пород в условиях одноосного осевого сжатия. Опыты проводились в Тюменском филиале СургутНИПИнефть, заведующий лабораторией к.т.н. Е.А.Усачев.

Испытанные образцы представляли собой цилиндры с диаметром 30 мм и длиной 70 – 80 мм. Угол наклона образцов к вертикальной оси керна составлял  $30^{\circ}$  и  $45^{\circ}$ . В ходе экспериментов определялись прочностные характеристики горных пород и проводились расчеты параметров устойчивости скважин по разработанной методике.

Основными расчётными величинами являлись параметры устойчивости - время устойчивости ствола скважины, диапазон плотности бурового раствора, угол наклона оси скважины.

Для оценки времени до разрушения породы необходимо было определить предельную деформацию при одноосном сжатии, при которой происходит разрушение образца, вырезанного под тем же самым углом, что и испытываемый образец, а также среднюю скорость ползучести породы при данной плотности. Для определения предельной деформации изготовленный под требуемым углом образец помещался в установку SHIMADZU и доводился до разрушения при одноосном сжатии. При этом регистрировалась продольная деформация, при которой это разрушение происходи-

ло. Затем рассчитывались средние скорости ползучести породы при различных плотностях бурового раствора. Для этого общая деформация образца делилась на общее время его нагружения при рассматриваемой плотности бурового раствора. Искомое время до разрушения породы на стенках скважины находилось как отношение измеренной предельной деформации на одноосное сжатие к вычисленной скорости ползучести.

Если при данной плотности бурового раствора ползучесть образца являлась ограниченной, то есть его деформация спустя некоторое время перестала нарастать, то эта плотность бурового раствора считалась допустимой.

Если ползучесть образца носила установившийся характер, то есть деформация образца нарастала со временем, то при данной плотности бурового раствора следует ожидать потери устойчивости ствола скважины.

Для оценки адекватности разработанной методики аналогичные образцы горных пород были испытаны на трехосное нагружение на испытательной системе ИСТНН.

На основании проведенных исследований и сравнения результатов испытаний на установке ИСТНН и одноосном прессе SHIMATZU можно сделать вывод, что разработанная методика определения упругих и прочностных свойств горных пород со слоистой структурой, а также параметров устойчивости скважин на основе испытаний образцов кернового материала в условиях одноосного сжатия позволяет получать достаточно надежные данные и может быть рекомендована к использованию.

**В четвертой главе** излагается новый метод повышения продуктивности нефтяных и газовых скважин – метод направленной разгрузки пласта. При его разработке был использован тот же подход, что и при решении проблемы устойчивости стволов наклонных и горизонтальных скважин.

Общепринятая система вскрытия нефтеносных пластов, основанная на использовании затяжеленных буровых растворов, и традиционные режимы освоения скважин неизбежно приводят к значительному ухудшению проницаемости породы в прискважинной зоне пласта (ПЗП). Существует несколько основных причин этого

явления – кольтатация и проникновение в пласт бурового раствора, загрязнение и заиливание естественных перфорационных каналов, набухание глин и пр. В свою очередь, снижение фильтрационных свойств пласта даже в небольшой окрестности скважины может в несколько раз и даже в десятки раз снижать ее продуктивность.

Применяемые в настоящее время методы воздействия на призабойную зону пласта с целью восстановления её естественной проницаемости (вибровоздействие, гидроимпульсное воздействие, циклическое чередование кратковременных депрессий и репрессий и др.) направлены в основном на «очистку» существующих фильтрационных каналов от посторонних частиц. Но зачастую это оказывается невозможным.

В ИПМех РАН группой специалистов под руководством автора был разработан новый способ повышения продуктивности нефтяных и газовых скважин – метод направленной разгрузки пласта. В его основе лежат идеи, высказанные академиком С.А. Христиановичем относительно решающего влияния действующих в окрестности скважин напряжений на фильтрационные свойства пласта и, как следствие, на дебит нефтяных и газовых скважин.

Многочисленные испытания кернового материала на установке ИСТНН и опытно-промышленные работы на скважинах полностью подтвердили справедливость этого положения. Было обнаружено, что для большинства горных пород, слагающих коллектора нефтяных и газовых месторождений, существуют напряженные состояния, при которых в них начинает развиваться процесс трещинообразования, приводящий к резкому увеличению проницаемости породы. Вид и уровень этих напряжений зависит от структуры и деформационных свойств породы, глубины залегания пластов, пластового давления нефти, конструкции забоя скважин и условий их эксплуатации.

Академик С.А.Христианович предложил использовать этот процесс для повышения проницаемости призабойной зоны пласта, и на основе этой идеи был разработан новый метод повышения продуктивности нефтяных и газовых скважин – метод направленной разгрузки пласта. Идея метода направленной разгрузки пласта состоит в том, чтобы за счет неравномерной направленной разгрузки породы от гор-

ного давления создавать в окрестности скважины напряжения, приводящие к рас- трескиванию породы и созданию в пласте искусственной системы множественных макротрещин. Эта система трещин играет роль искусственной сетки фильтрацион- ных каналов, причем проницаемость этой новой системы фильтрационных каналов значительно (на порядок) превышает природную проницаемость пласта.

На рис.15 приведена фотография образца породы после его испытания на ус- тановке ИСТНН, в ходе которых моделировалось создание депрессии на забое необ- саженной скважины. На ней хорошо видно, как вокруг отверстий образуется систе- ма макротрещин. В случае менее прочных пород может происходить даже разруше- ние породы с выносом в отверстие, рис.16.

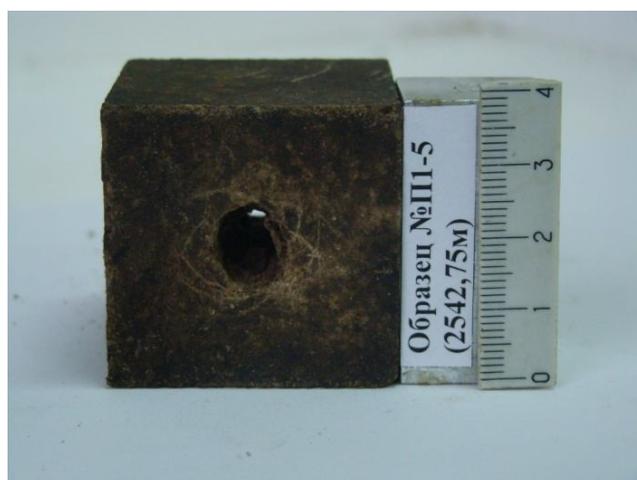


Рис.15. Образование зоны трещин вокруг отверстия, имитирующего скважину в прочной породе



Рис.16. Образование зоны трещин вокруг отверстия, имитирующего скважину в слабой породе

Второй важный момент метода направленной разгрузки пласта – это необходимость поддержания требуемого давления на забое скважины в течение достаточно длительного времени, поскольку процесс трещинообразования постепенно распространяется вглубь пласта. Это связано, во-первых, с перестройкой воронки депрессии в окрестности скважины, и, во-вторых, с тем, что при больших напряжениях горные породы перестают быть упругими и начинают деформироваться во времени («ползти»).

Из изложенного следует, что для выработки оптимальных режимов эксплуатации скважин важно знать, к каким последствиям с точки зрения изменения проницаемости пласта приводят возникающие в пласте напряжения, и какие давления необходимо поддерживать на забое скважины.

Для ответа на этот вопрос был использован тот же подход, что и при решении проблемы устойчивости стволов скважин. На первом этапе рассчитываются напряжения, действующие в окрестности скважины при различных конструкциях ее забоя, и их изменение при изменении давления на забое, на основании чего составляется программа нагружения образцов.

Затем производится прямое моделирование анализируемой ситуации на установке ИСТНН. С этой целью к образцам породы прикладываются рассчитанные напряжения и регистрируется деформация образца в трех направлениях с одновременным измерением проницаемости образца. В результате определяются напряжения, и соответственно давления на забое скважины, при которых в пласте начинается процесс трещинообразования или разрушения.

Таким образом, разработка технологического регламента работ по повышению продуктивности скважин методом направленной разгрузки пласта на конкретном месторождении включает в себя следующие этапы.

1. Испытания кернового материала из коллектора исследуемого месторождения на экспериментальном стенде ИСТНН.

Результатом испытания образцов породы на стенде ИСТНН является определение величины и вида напряжений, которые необходимо создать в породе в призабойной части пласта, чтобы вызвать в ней процесс микро- и макрорастрескивания или разрушения породы, сопровождающийся необратимым увеличением ее проницаемости.

2. Расчет напряжений, возникающих в призабойной зоне пласта при различных конструкциях забоя скважины.

Проведение расчетов на втором этапе адаптации метода направленной разгрузки пласта к условиям конкретного месторождения должно дать ответ на вопрос, каким образом в окрестности скважины можно создать те напряжения, которые, согласно результатам испытаний образцов породы на первом этапе, необходимы для реализации метода направленной разгрузки пласта.

Для вычисления напряженно-деформированного состояния в призабойной зоне пласта использовался пакет программ ANSYS5.7, адаптированный с учетом специфики изучаемой проблемы. Этот пакет программ позволяет на основе метода конечных элементов численно решать пространственные задачи практически любого уровня сложности для исследуемых типов среды и граничных условий.

В качестве примера расчетов на рис.16 – 18 приведены примеры расчета напряжений для трех типичных технологических ситуаций: задача о перфорационном отверстии в виде конуса в необсаженной скважине (рис. 16); задача о двух перфорационных отверстиях в виде конуса в необсаженной скважине (рис.17).

На каждом из рисунков показаны изолинии интенсивностей касательных напряжений, отложенные в долях от горного давления, соответствуют максимальной депрессии на забое скважины

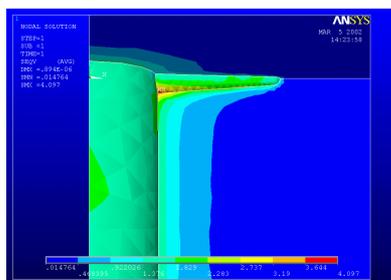


Рис.16. Распределение напряжений в окрестности необсаженной скважины с перфорационным отверстием

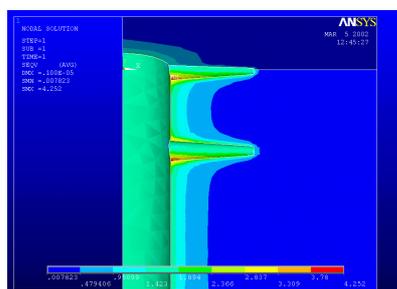


Рис.17. Распределение напряжений в окрестности обсаженной скважины с двумя перфорационными отверстиями

Результатом проведения расчетов является:

- Определение для различных конструкций забоя скважины на данном месторождении уровней депрессий, необходимых для инициации процесса растрескивания породы.

- Определение размеров зоны трещинообразования и его интенсивности в зависимости от давления на забое скважины. Величина этой зоны, помимо давления на забое скважины, зависит от деформационных и прочностных свойств породы, а также от дебита нефти или газа в скважину.

- Оценка на основе выполненных расчетов ожидаемого эффекта от использования метода направленной разгрузки пласта на данном месторождении.

3. Составление технологического регламента проведения работ по методу направленной разгрузки пласта на скважинах конкретного месторождения.

Метод направленной разгрузки пласта прошел опытно-промышленные испытания на нефтяных месторождениях Западной Сибири, Приуралья и Приобья. Всего

было обработано около 20 скважин - при освоении скважин, капитальном ремонте добывающих скважин и капитальном ремонте нагнетательных скважин. Всем испытаниям предшествовало физическое моделирование на установке ИСТНН процесса воздействия на пласт при использовании метода направленной разгрузки пласта и выбор на его основе технологических параметров реализации метода на конкретных скважинах.

Результаты испытания метода направленной разгрузки пласта показали его эффективность, особенно при освоении скважин и повышении приемистости нагнетательных скважин. На необсаженных стволах удавалось достичь 2-4-х кратного увеличения дебита скважин, на обсаженных стволах - 1,5-2 кратного увеличения. Продолжительность сохранения эффекта обычно составляла от нескольких месяцев до года.

Разработанная технология защищена семью российскими патентами и одним евразийским патентом.

В **пятой главе** проведен механико-математический анализ напряженно-деформированных состояний и размера зон разрушения, возникающих в окрестности нефтяной (газовой) скважины при понижении давления на ее забое. Это необходимо для оценки эффективности метода направленной разгрузки пласта, поскольку она напрямую связана с размером возникающих зон трещинообразования. Кроме того, необходимо представлять, какое влияние на указанные параметры оказывает фильтрация нефти из пласта в скважину.

Рассмотрены различные критерии местного разрушения породы. Изучено влияние на величину возникающих напряжений и размер зон разрушения процесса фильтрации нефти (газа) в скважину. Всего было рассмотрено четыре случая: без фильтрации при законе максимальных касательных напряжений; при наличии фильтрации при законе максимальных касательных напряжений; без фильтрации при законе Кулона-Мора; при наличии фильтрации при законе Кулона-Мора. Численные расчеты для радиуса зоны нарушенности с повышенной проницаемостью согласно полученным моделям представлены на рис.18.

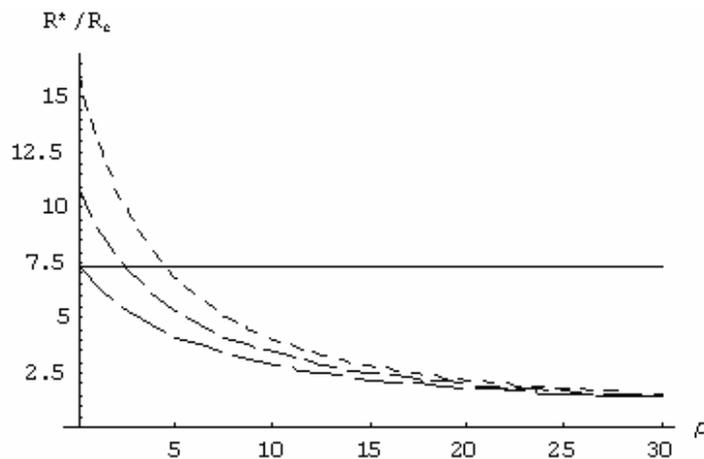


Рис.18. Радиус зоны разрушения в зависимости от угла внутреннего трения  $\rho$  для разных значений относительного депрессии на забое скважины  $\Delta p_c / p_0$  ( $\Delta p_c$ -понижение давления в скважине,  $p_0$  - давление в пласте)

- сплошная линия– без фильтрации, при условии Треска,  $\Delta p_c / p_0 = 1$ ;
- пунктирная линия (длинные штрихи)–без фильтрации при законе Кулона-Мора,  $\Delta p_c / p_0 = 1$ ;
- пунктирная линия (средние штрихи)–при наличии фильтрации при законе Кулона-Мора,  $\Delta p_c / p_0 = 0,5$ ;
- пунктирная линия (короткие штрихи)– при наличии фильтрации при законе Кулона-Мора,  $\Delta p_c / p_0 = 0$ ;

Один из важных выводов, который можно сделать на основании проведенного анализа, состоит в том, что с увеличением градиента давления, вызывающего приток флюида (газа) в скважину, увеличивается величина зоны разрушения.

Рассмотрено влияние сжимаемости флюида (газа) и зависимости его вязкости от давления на распределение давления флюида и напряжений в окрестности скважины. Показано, что при определенных условиях фильтрация нефти или газа может оказывать значительное влияние на величину зон нарушенности породы в окрестности скважин.

На рис.19 представлена зависимость градиента давления на контуре скважины (отнормированного к градиенту давления при отсутствии зависимости параметров от давления) от относительной депрессии для различных значений обобщенного параметра сжимаемости.

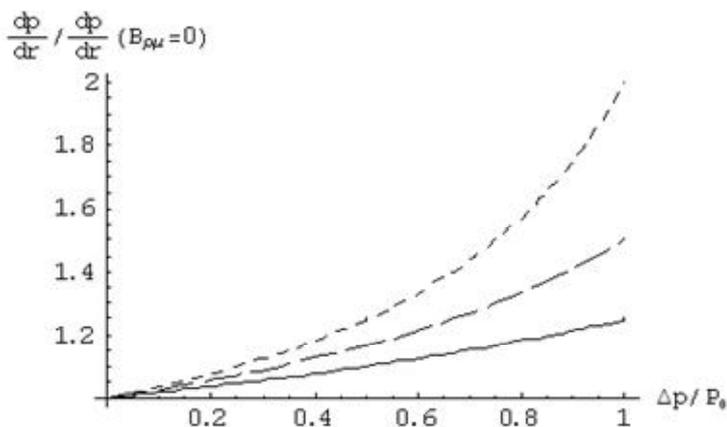


Рис.19. Зависимость градиента давления на контуре скважины (отнормированного к градиенту давления при отсутствии зависимости параметров от давления) от относительной депрессии для различных значений обобщенного параметра сжимаемости

Расчеты показали, что в зависимости от деформационных и прочностных характеристик горных пород радиус зоны трещинообразования с повышенной проницаемостью составляет от двух до более десятка калибров скважины. Выполненный анализ необходим для оценки эффективности использования метода направленной разгрузки пласта на конкретном месторождении.

**В заключении** перечислены основные результаты работы.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

Разработана методика определения на испытательной системе трехосного независимого нагружения ИСТНН деформационных, прочностных и фильтрационных характеристик горных пород (в том числе анизотропных), используемых при определении параметров устойчивости стволов нефтяных и газовых скважин.

Разработан новый подход к решению геомеханических проблем, связанных с деформированием и разрушением горных пород в окрестности нефтяных и газовых скважин под действием возникающих в них напряжений. При его использовании математическое моделирование при ответе на вопрос о деформировании и разрушении горной породы под действием приложенных напряжений заменяется прямым моделированием этих процессов на испытательной системе ИСТНН. Это позволяет избежать принятия приближенных и упрощающих предположений относительно деформационных и прочностных свойств изучаемых горных пород и дать не только качественный, но и количественный ответ на поставленные вопросы.

Создана механико-математическая модель устойчивости стволов наклонных и горизонтальных скважин при их проводке и эксплуатации, в основе которой лежит положение, что основным фактором, влияющим на устойчивость стволов скважин, является анизотропия прочностных и деформационных свойств горных пород, в которых осуществляется проводка скважин. Ее разработка необходима для моделирования явления на установке ИСТНН и выработки программы нагружения образцов, адекватной реальной ситуации проводки скважин.

Выполнено прямое моделирование на установке ИСТНН на основе разработанной математической модели процесса бурения и эксплуатации наклонно направленных и горизонтальных скважин, в том числе и на депрессии.

Разработаны методики экспериментального определения на установке ИСТНН параметров бурения наклонных и горизонтальных скважин и методики определения допустимых депрессий при их эксплуатации.

Разработаны методики определения допустимых депрессий при бурении нефтяных и газовых скважин (в том числе горизонтальных) на основании результатов одноосных испытаний образцов горных пород.

Развитый подход апробирован на конкретных месторождениях для определения оптимальных параметров бурения скважин.

Разработаны физические основы нового способа повышения продуктивности нефтяных и газовых скважин – метода направленной разгрузки пласта.

На его основе разработана технология реализации метода направленной разгрузки пласта на скважинах нефтяных месторождений.

Проведены опытно-промысловых испытания метода направленной разгрузки пласта по разработанной технологии на ряде нефтяных месторождений. Результаты показали эффективность разработанного метода, особенно при освоении скважин и повышении приемистости нагнетательных скважин.

Решена задача о распределении напряжений, возникающих в окрестности нефтяной (газовой) скважины с учетом процесса фильтрации нефти (газа) и зависимости их вязкости и плотности от давления;

На основе полученного решения выполнен анализ размеров зон разрушения, возникающих в окрестности нефтяной (газовой) скважины при понижении давления на ее забое, для различных критериев местного разрушения породы;

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах, первые 15 из списка входят в перечень ВАК:

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Христианович С.А., Коваленко Ю.Ф. Об измерении давления газа в угольных пластах// ФТПРПИ. 1988. № 3.
2. Христианович С.А., Коваленко Ю.Ф. Об величии нефтеотдачи нефтяных пластов// Нефтяное хозяйство. 1988. № 6.
3. Христианович С.А., Коваленко Ю.Ф. Об упругом режиме эксплуатации нефтяного месторождения// ФТПРПИ. 1990. №1.
4. Коваленко Ю.Ф. О механизме разрушения кернов из коллекторов нефтяных месторождений//ФТПРПИ. 1990. №3
5. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Одинцев В.Н. Механика гидрогазоимпульсного воздействия на трещиновато-пористую породу при скважинной гидродобыче // ФТПРПИ. 1995. № 6.
6. Харламов К.Н., Коваленко Ю.Ф., Карев В.И., Усачев Е.А. О необходимости учета прочностных характеристик горных пород при определении оптимального пространственного положения скважины // Бурение и нефть. 2008. № 10. С.18 - 21.
7. Климов Д.М., Тер-Саркисов Р.М, Чигай С.Е., Коваленко Ю.Ф., Рыжов А.Е. Определение прочностных характеристик пород Штокмановского ГКМ и оценка рисков выноса песка при его разработке//Газовая промышленность. 2010. № 11.
8. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф. Геомеханика нефтяных и газовых скважин//Вестник Нижегородского ун-та им. Н.И.Лобачевского. 2011. №4. ч.2. с.448-450.
- 9.. Христианович С.А., Коваленко Ю.Ф., Карев В.И. и др. Способ вскрытия продуктивного пласта. – Патент РФ № 2110664 от 10.05.1998.
10. Коваленко Ю.Ф., Кулинич Ю.В., Карев В.И. и др. Способ вызова или увеличения притока флюида в скважинах. - Патент РФ № 2163666 27.02.2001.
11. Коваленко Ю.Ф., Кулинич Ю.В., Карев В.И. и др. Способ освоения скважин. – Патент РФ № 2179239 от 10.02.2002.
12. Коваленко Ю.Ф., Кулинич Ю.В., Карев В.И. и др. Способ ремонта скважин. – Патент РФ № 2188317 от 27.08.2002.

13. Коваленко Ю.Ф., Кулинич Ю.В., Карев В.И. и др. Способ освоения скважин. – Евразийский патент № 003452 от 26.06.2003.

14. Коваленко Ю.Ф., Кулинич Ю.В., Карев В.И. и др. Способ обработки нагнетательной скважины. – Патент РФ № 2213852 от 10.10.2003.

15. Карев В.И., Климов Д.М., Коваленко Ю.Ф. и др. Способ обработки призабойной зоны скважины. – Патент РФ № 2285794 от 20.10.2006.

16. Коваленко Ю.Ф., Карев В.И. Метод георыхления – Новый подход к проблеме повышения продуктивности скважин // Технологии ТЭК. 2003. № 1. С. 31-35.

17. Климов Д.М., Коваленко Ю.Ф., Карев В.И. Реализация метода георыхления для увеличения приемистости нагнетательной скважины // Технологии ТЭК. 2003. № 4. С. 59-64.

18. Христианович С.А., Коваленко Ю.Ф., Кулинич Ю.В., Карев В.И. Увеличение продуктивности нефтяных скважин с помощью метода георыхления // Нефть и газ Евразия, 2000, № 2, - с. 90-94.

19. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Негомедзянов В.Р., Харламов К.Н. Исследование и прогнозирование устойчивости горных пород в горизонтальных скважинах баженовских отложений, бурящихся в условиях депрессии // Технологии ТЭК. 2004. № 5. С. 18-23.

20. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Кулинич Ю.В., Прихно М.А. Определение деформационных и прочностных свойств горных пород применительно к баженовским отложениям // Технологии ТЭК. 2005. № 3. С. 17-21.

21. Климов Д.М., Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б. Математическое и физическое моделирование разрушения горных пород при проходке наклонно-направленных скважин // Технологии ТЭК. 2006. № 5. С.22-27.

22. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф. Зависимость проницаемости призабойной зоны пласта от депрессии и конструкции забоя для различных типов горных пород // Технологии ТЭК. 2006. № 6. С.59 -63.

23. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф. Развитие модели фильтрации газа в газонасыщенных угольных пластах.- Труды VIII международной научной школы "Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных

породах и выработках". Симферопольский государственный университет. 1998. С.57-58.

24. Христианович С.А., Коваленко Ю.Ф., Кулинич Ю.В., Карев В.И. Увеличение продуктивности нефтяных скважин с помощью метода георыхления // Нефть и газ Евразия. 2000. № 2. С. 90-94.

25. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Кулинич Ю.В., Христианович С.А. Взаимовлияние деформационных и фильтрационных процессов в коллекторах нефтяных и газовых месторождений и создание новых технологий // Тезисы докл. на VIII Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике. Пермь. 2001. С.309-310.

26. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б. Математическое и физическое моделирование разрушения горных пород в окрестности наклонно направленных нефтяных и газовых скважин с учетом анизотропии упругих и прочностных свойств пород // Тезисы докл. на IX Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике. Нижний Новгород. 2006.

27. Климов Д.М., Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б. Математическое и физическое моделирование устойчивости наклонных и горизонтальных скважин в анизотропных породах. Препринт ИПМех РАН № 879, 2008, 24 с.

28. Климов Д.М., Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б. Об устойчивости наклонных и горизонтальных нефтяных и газовых скважин. В Сб. Актуальные проблемы механики. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 2009. С.455-469.

29. Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б., Галанин А.А. Анализ напряженного состояния и разрушения породы в окрестности нефтяной скважины. Препринт ИПМех РАН № 919, 2009, 36 с.

30. Климов Д.М., Карев В.И., Коваленко Ю.Ф. Роль напряжений в формировании эксплуатационных свойств скважин. В Сб. Актуальные проблемы механики. Механика деформируемого твердого тела.– М.: Наука, 2009. С.470-476.

31. Коваленко Ю.Ф., Харламов К.Н., Усачев Е.А. Устойчивость скважин Среднего Приобья. 2011.- Тюмень-Шадринск, 2011. 174 с.

32. Karev V., Kovalenko Yu. Triaxial loading system as a tool for solving problems of oil and gas production // The 12th International Congress on Rock Mechanics (Beijing, October 18-21, 2011).

Коваленко Юрий Федорович

Геомеханика нефтяных и газовых скважин

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Подписано к печати «\_\_»\_\_\_\_\_2011 г. Заказ №. Тираж 100 экз.

---

Отпечатано на ризографе Учреждения Российской академии наук  
Института проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН

119526 Москва, пр. Вернадского, 101, кор. 1