

На правах рукописи



**Манаков Артем Викторович**

**СОВМЕСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ И ФИЛЬТРАЦИОННЫХ  
ПРОЦЕССОВ В ПРИСКВАЖИННОЙ ЗОНЕ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор  
Рудяк Валерий Яковлевич

Официальные оппоненты: Черный Сергей Григорьевич  
доктор физико-математических наук, профессор,  
Институт вычислительных технологий СО РАН,  
лаборатория математического моделирования,  
заведующий;

Киселев Сергей Петрович  
доктор физико-математических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение наук Институт теоретической и  
прикладной науки им. С.А. Христиановича СО РАН,  
лаборатория «Физика многофазных сред»,  
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение  
науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики  
им. А.А. Трофимука Сибирского отделения  
Российской академии наук

Защита диссертации состоится «21» мая 2015 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.06 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте <http://www.nstu.ru>.

Автореферат разослан «    » марта 2015 г

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Фаддеенков Андрей Владимирович

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы** данной диссертации обусловлена, прежде всего, необходимостью решения широкого класса практически важных задач, связанных с исследованием напряженно-деформированного состояния пористой среды и порового давления. В первую очередь здесь можно отметить задачу обеспечения устойчивости процесса бурения через водо-, газо- и нефтеносные пласты, которая требует понимания характера изменения напряжений в пористой среде и порового давления флюида вокруг скважины. Учет перераспределения напряжений и изменения порового давления также важен при добыче нефти и газа, когда обеспечение притока добываемого флюида к скважине, происходит за счет закачивания воды в формацию. Кроме того, анализ напряженно-деформированного состояния фундамента и окружающего массива с учетом течения грунтовых вод и возможного обводнения является важным звеном при проектировании строительных сооружений. При очистке воды и воздуха посредством фильтрования также необходимо понимание характера течения флюида и изменения напряжений пористых мембран для создания фильтров с заданными прочностными свойствами и максимальной эффективностью.

Необходимость решения указанных практических задач мотивировала разработку математических моделей и алгоритмов для описания таких совместных процессов. Основные уравнения математической модели для описания процессов в консолидированной пористой среде (модели пороупругости) были сформулированы в работах М. Био. В нашей стране практические независимо и в то же время основополагающие уравнения для описания процессов в насыщенных пористых средах были сформулированы Я.И. Френкелем.

Сложность возникающих здесь задач приводит к тому, что для совместного моделирования изменения напряженно-деформированного состояния пористой среды и порового давления флюида используются численные методы. Численные решения задач пороупругости с попыткой совместного описания деформирования твердого скелета и течения флюида в пористой среде с помощью метода конечных элементов описаны в работах Р. Сандху, Дж. Норисхада, Р. Льюиса, И. Смита. Важность получения количественной информации столь высока, что численные алгоритмы совместного моделирования появились и в коммерческих пакетах, например, в пакете Abacus. Однако все существующие подходы и алгоритмы совместного моделирования изменения напряженно-деформированного состояния пористой среды и порового давления флюида имеют систематический недостаток, в них не учитывается корка и динамика её роста. Дело в том, что при решении практических задач мы имеем дело не с чистым флюидом, а с содержащим взвешенные твердые частицы, которые при внедрении в пористую среду осаждаются на стенке, образуя так называемую корку. Наличие такой корки необходимо учитывать в большинстве практических приложений в разных областях знаний, например, почвоведение и геофизика, когда через пористую среду протекает не чистый флюид, а суспензия, содержащая твердые частицы. Естественно, что наличие корки должно учитываться в разрабатываемых алгоритмах.

Понимание того что, в оценке устойчивости стенок скважины во время бурения необходимо учитывать проникновение бурового флюида в пористую среду и образование корки встречается в литературе, например в статьях Ал. Авада и Дж. Ванга. Но до сих пор наличие корки учитывалось лишь косвенно, уменьшением перепада давления на стенке скважины. Конечно, такая модель не позволяет получить количественную информацию об изменении напряженно-деформированного состояния и порового давления в окрестности скважины. Таким образом, возникает сложная актуальная задача совместного описания деформирования твердого скелета пористой среды и порового давления вокруг скважины с учетом образования корки. Данная тема имеет и важную фундаментальную составляющую, поскольку требует не только понимания процессов совместного деформирования пористой среды и изменения порового давления, а также разработки аппарата для исследования таких совместных процессов.

После получения количественной информации об изменении напряженно-деформированного состояния пористой среды актуальной задачей является оценка её предельного состояния перед началом разрушения. Предельное состояние насыщенной пористой среды определяется прочностью твердой фазы, для оценки прочности которой используют критерии, разработанные для твердых тел, в частности критерий прочности Кулона-Мора и различные его модификации. Поэтому анализ применимости критерия Кулона-Мора для оценки предельного состояния при различных видах разрушения логически является ключевым звеном в исследовании.

**Целью диссертационной работы** является разработка алгоритма и пакета программ для совместного моделирования деформирования пористой среды и изменения порового давления с учетом образования корки, а также определение предельного состояния пористой среды перед началом разрушения.

Для достижения цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи.

1. На основе метода конечных элементов разработан алгоритм для совместного моделирования изменения порового давления флюида и напряженно-деформированного состояния скелета пористой среды с учетом образования корки.
2. Разработан пакет программ (GeoFluid) для совместного моделирования геомеханических и фильтрационных процессов в прискважинной зоне при технологических операциях на скважине.
3. Выполнен анализ использования критерия Кулона-Мора для критерияльной оценки предельного состояния при хрупком, пластическом и длительном характере разрушения. Разработан алгоритм и создан набор программ для автоматического построения паспорта прочности горной породы по результатам различных сочетаний экспериментов.
4. Проведено совместное моделирование геомеханических и фильтрационных процессов в прискважинной зоне во время бурения и проанализировано влияние образования корки бурового флюида на напряженно-деформированное состояние и поровое давление.

**Методы исследования.** Основу исследования, проведенного в данной диссертационной работе, составляют фундаментальные положения механики пористых сред, а также принципы механики разрушения. В основе разработан-

ного алгоритма совместного моделирования заложен итерационный процесс решения уравнений Био с помощью метода конечных элементов. Уравнения Био состоят из уравнений закона Гука для пористой среды и уравнения нестационарной фильтрации для флюида. В результате конечноэлементной аппроксимации по пространственным координатам и замены производной по времени в уравнении на давление разностной производной по неявной схеме, получается система линейных уравнений для неизвестного давления флюида и перемещений твердой матрицы, для решения которой была составлена итерационная схема. Для учета в моделировании динамики корки, в алгоритме реализован итерационный процесс решения уравнения нестационарной фильтрации флюида с условием третьего рода на корке.

Для анализа изменения напряженно-деформированного состояния в пористой среде и порового давления создан пакет программ, содержащий двух- и трехмерные программы, разработанные на основе метода конечных элементов с использованием объектно-ориентированных средств языка C++. Численное решение системы уравнений реализовано с использованием средств математической библиотеки MKL. Для каждого программного модуля и пакета программ в целом проведено сопоставление результатов моделирования с аналитическими решениями. Показано, что расчетные данные с высокой точностью согласуются с аналитическими решениями для широкого диапазона параметров.

Для совместного моделирования геомеханических и фильтрационных процессов в прискважинной зоне при технологических операциях на скважине (бурение, гидродинамическое тестирование) разработан программный комплекс с использованием диалоговых форм среды Visual C++.

Для анализа предельного состояния массива горных пород разработана методика построения паспорта прочности по результатам экспериментов (ГОСТ 21153.8-88). В основе методики лежит численное решение системы нелинейных уравнений. С помощью средств программирования Visual Basic, в среде Microsoft Excel созданы программы для автоматического построения паспорта прочности горной породы по результатам экспериментов.

**Научная новизна работы.** Впервые создан алгоритм для совместного моделирования изменения напряженно-деформированного состояния пористой среды и порового давления флюида с учетом динамики образования корки. Разработан программный комплекс для моделирования геомеханических и фильтрационных процессов во время бурения в прискважинной зоне с учетом динамики образования корки бурового флюида на стенке скважины.

Для оценки предельного состояния на основе критерия Кулона-Мора реализована программа автоматического построения паспорта прочности горной породы по результатам двух различных экспериментов. Предложено и обосновано использование критерия Кулона-Мора для оценки длительной прочности.

На основе проведенного моделирования, с помощью созданного пакета программ, установлено, что учет корки бурового флюида особенно важен в случае хорошо проницаемой формации. В этом случае, корка обеспечивает быстрое изолирование формации от скважины, и уменьшает локальные возмущения давления и напряжений вблизи скважины. Учет динамики образования корки позволяет правильно оценить распространение возмущений давления и напряжений вглубь формации в процессе бурения.

**Практическая значимость работы.** Разработанный пакет программ GeoFluid, как и каждый его модуль, может использоваться для решения практических задач, связанных с анализом изменения напряженно-деформированного состояния и порового давления в пористой среде насыщенной флюидом. Примерами таких задач являются обеспечение устойчивости процесса бурения через водо-, газо- и нефтеносные пласты, анализ напряженно-деформированного состояния фундамента и окружающего массива при проектировании строительных сооружений с учетом течения грунтовых вод, расчет напряжений в пористых мембранах при очистке воды и воздуха для создания фильтров с заданными прочностными свойствами и максимальной эффективностью.

Созданная программа автоматического расчета паспорта прочности горной породы по результатам экспериментов имеет практическое применение для анализа предельного состояния горного массива при бурении скважин, а также при решении задач, направленных на обеспечение безопасности горных работ.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Разработанный в диссертации пакет программ GeoFluid для совместного моделирования геомеханических и фильтрационных процессов в прискважинной зоне, с учетом динамики корки бурового флюида, внедрен в компании Baker Hughes и используется при решении прикладных задач.

**Достоверность результатов** подтверждается корректным применением законов теории упругости и теории фильтрации для построения алгоритма совместного моделирования, математического аппарата метода конечных элементов. Кроме того, достоверность результатов моделирования обеспечивается использованием распространённых и апробированных методов, проведённым тестированием и верификацией численных алгоритмов на основе ряда точных аналитических решений, расчётов других авторов и данных экспериментов.

**Личный вклад автора** заключается в разработке итерационного алгоритма для совместного моделирования изменения порового давления флюида и напряженно-деформированного состояния пористой среды с учетом образования корки, создании программного комплекса для совместного моделирования геомеханических и фильтрационных процессов в прискважинной зоне во время бурения с учетом образования корки бурового флюида на стенке скважины, разработке методики и программ автоматического построения паспорта прочности горных пород, анализе применимости критерия Кулона-Мора для описания предельного состояния. Автор принимал также непосредственное участие в подготовке публикаций по теме диссертации.

**Основные положения и результаты, выносимые на защиту.**

- Итерационный алгоритм для совместного моделирования изменения порового давления флюида и напряженно-деформированного состояния пористой среды с учетом образования корки.
- Пакет программ для совместного моделирования геомеханических и фильтрационных процессов в прискважинной зоне во время бурения с учетом образования корки бурового флюида на стенке скважины.
- Методика и набор программ автоматического построения по результатам экспериментов паспорта прочности горной породы, основанного на критерии Кулона-Мора. Результаты влияния механических свойств массива горных пород и давления флюида в скважине на напряженное состоя-

ние прискважинной зоны, с позиции экспериментально обоснованной теории пластичности и учитывающей внутренне трение и дилатансию.

- Результаты сравнительного анализа экспериментальных данных и оценок длительной прочности металлов, основанных на общепринятых критериях и предлагаемом критерии Кулона-Мора.
- Результаты моделирования изменения напряженно-деформированного состояния и порового давления в прискважинной зоне в процессе бурения и гидродинамического тестирования скважины, полученные с использованием созданного пакета программ.

**Апробация работы.** Основные результаты были доложены на 14-ой Всероссийской конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» (10-13 октября, Новосибирск, 2005), 18-ой Всероссийской конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» (6-10 июля, Новосибирск 2009), II Всероссийском семинаре «Фундаментальные основы МЭМС- и нанотехнологий», (6–8 апреля, Новосибирск, 2010), 20-ой Всероссийской конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» (03-06 октября, Новосибирск, 2011), III Всероссийской молодежной научной конференции «Современные проблемы математики и механики» (23-25 апреля, Томск, 2012), IV Всероссийской конференции «Фундаментальные основы МЭМС- и нанотехнологий» (6-8 июня, Новосибирск, 2012).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, из них 3 в журналах, входящих в Перечень ВАК, остальные в сборниках трудов и материалов всероссийских конференций.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка использованных источников (144 наименований). Основной текст работы изложен на 146 страницах, включает 4 таблицы и 44 рисунка.

## Основное содержание работы

**Во введении** приведен критический обзор исследований по рассматриваемой тематике, обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цели и задачи диссертационной работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, обозначены личный вклад автора, научная новизна и практическая значимость работы.

**Первая глава** посвящена разработке итерационного алгоритма для совместного моделирования изменения напряженно-деформированного состояния пористой среды и порового давления флюида с учетом динамики формирования корки.

*В первом параграфе* описана математическая модель деформирования упругих насыщенных флюидом пористых сред, которая лежит в основе разработанного алгоритма. В основе алгоритма лежит общепринятая модель совместного описания деформирования пористой среды и изменения порового давления – модель Био. В этой модели наряду с напряжениями в скелете породы, существует также поровое давление, градиент которого вызывает течение жидкости по межпоровому пространству. Тензор полных напряжений пористой среды связан с поровым давлением  $p$  и напряжениями в твердой матрице  $\sigma_{ij}$  следующим

выражением:  $\sigma_{ij}^f = \sigma_{ij} - \alpha p \delta_{ij}$ , где  $\alpha$  – коэффициент Био–Виллиса,  $\delta_{ij}$  – единичный тензор второго ранга. Связь напряжений и деформаций скелета пористой среды моделируется в рамках линейной теории упругости. Зависимость тензора напряжений твердой матрицы от тензора деформаций  $\varepsilon_{ij}$  в этом случае имеет вид

$$\sigma_{ij} = G\varepsilon_{ij} + G\left(\varepsilon_{ij} + \frac{2\nu}{1-2\nu}\varepsilon\right)\delta_{ij}, \quad i, j = x, y, z, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – объемная деформация (след тензора деформаций),  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $G$  – модуль сдвига, который связан с модулем упругости  $E$  соотношением  $G = E/[2(1+\nu)]$ . Входящий в уравнение (1) тензор деформаций определяется через перемещения  $l_x, l_y, l_z$  вдоль осей  $x, y, z$  стандартным образом:  $\varepsilon_{ij} = (\partial l_i / \partial x_j + \partial l_j / \partial x_i) / 2$ . Выражая тензор напряжений через перемещения твердой матрицы, и подставляя полученное в уравнения равновесия, получаем уравнение для перемещений твердой матрицы.

$$G\Delta \mathbf{l} + \frac{G}{1-2\nu} \nabla \nabla \cdot \mathbf{l} - \alpha \nabla p = 0. \quad (2)$$

Чтобы замкнуть полученную систему уравнений, необходимо записать еще уравнение на поровое давление  $p$ , которое выводится из уравнения сохранения массы флюида.

$$S_\varepsilon \frac{\partial p}{\partial t} + \alpha \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \frac{k}{\mu} \nabla^2 p = 0, \quad (3)$$

где  $\mu$  – коэффициент вязкости флюида,  $k$  – проницаемость пористой среды  $S_\varepsilon$  – удельный коэффициент флюидоотдачи, равный  $S_\varepsilon = \alpha / (K_u B)$ , где  $K_u$  – модуль объемного сжатия образца при недренированных условиях,  $B$  – коэффициент Скемптона.

Моделирование изменения напряженного состояния пористой среды и порового давления при фильтрации через неё флюида с твердыми частицами, как уже указывалось, требует учета формирования корки. Предполагается, что в начальный момент происходит проникновение твердых частиц в поры вблизи поверхности, образуется внутренняя корка, глубина которой  $h_d$ , а её проницаемость изменяется с заданной зависимостью по глубине и достигает своего минимума  $k_d$  на стенке скважины. В качестве основной модели формирования внешней корки, взята двухпараметрическая модель несжимаемой корки, содержащая основные особенности динамики образования и смыва. Внешняя корка (в дальнейшем просто корка) начинает расти на стенке скважины: толщина корки  $h_c(t)$ , а проницаемость –  $k_c$ . Изменение толщины корки на поверхности описывается уравнением



$$dh_c/dt = au|_{r=r_c} - \tau, \quad (4)$$

в котором  $u(r,t)|_{r=r_c} = \mathbf{v}_b \cdot \mathbf{n}|_{r=r_c}$  – скорость фильтрации на границе корки. Здесь  $\mathbf{n}$  – вектор внешней (направленный внутрь пористой среды) нормали к поверхности, через которую проникает флюид,  $\mathbf{v}_b$  – скорость флюида,  $a = \delta(1+\delta)/(1-\varphi_c)$ , где  $\varphi_c$  – пористость корки, а  $\delta$  – доля твердых частиц во флюиде. Уменьшение толщины корки обусловлено её смывом, и описывается функцией  $\tau \geq 0$ . Если  $\tau = 0$ , то сдирания корки не происходит. Функция смыва корки  $\tau$  может быть найдена по касательному напряжению на поверхности корки и её характеристикам устойчивости. В разработанном алгоритме, считается, что смыв пропорционален продольной скорости флюида:  $\tau = \gamma w$ , где  $w = \mathbf{v}_b \cdot \mathbf{m}$  ( $\mathbf{m}$  – единичный вектор вдоль оси скважины),  $\gamma$  – некоторая постоянная.

Скорость фильтрации флюида в пористой среде направленная, по нормали к поверхности, через которую проникает флюид, связана с толщиной корки, формирующейся на стенке скважины, соотношением

$$\frac{k}{\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial n} \right) \Big|_{r_w} = u|_{r_w} = \frac{k_c [p_b - p_w(t)]}{\mu r} \ln^{-1} \left[ \frac{r_w}{r_w - h_c(t)} \right], \quad (5)$$

где  $r_w$  – радиальная координата скважины,  $p_b$  и  $p_w$  – соответственно давление флюида на входе и на стенке пористой среды. При решении плоской задачи с учетом динамики корки, вместо выражения (5) используется линейная модель корки.

Для проникновения флюида в пористую среду его давление должно быть больше чем давления флюида в формации, т.е.  $p_b > p_w(t)$ . С учетом этого уравнение (4) принимает вид

$$dh_c/dt = \frac{a k_c [p_b - p_w(t)]}{\mu (r_w - h_c(t))} \ln^{-1} \left( \frac{r_w}{r_w - h_c(t)} \right) - \gamma w. \quad (6)$$

Таким образом, в рамках данной модели поставленная задача сводится к совместному решению уравнений (2), (3) и (6). Для получения решения уравнения (2) необходимо задать граничные условия, а для уравнения (3) поставить начально-краевую задачу.

Во втором параграфе описан алгоритм совместного решения уравнений (2), (3) и (6). Уравнения (2), (3) для неизвестных перемещений, порового давления решаются методом конечных элементов. Решение задачи порупругости (решения уравнений (2) и (3)) с помощью метода конечных элементов впервые было сделано в работах Д. Кристиана и Р. Сандху, затем этот подход получил свое развитие в работах Дж. Букера и О. Зенкевича. Алгоритм совместного решения уравнений (2), (3), (6), построенный в настоящей диссертации, является итерационным (смотри рисунок 1).

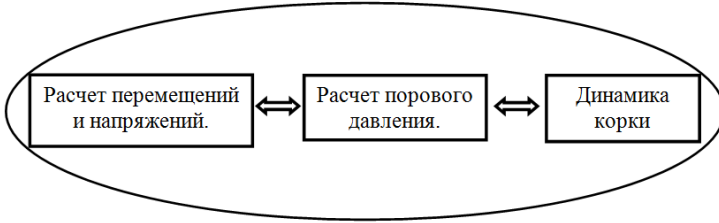


Рисунок 1 – Схема построения итерационного алгоритма

Для уравнения (2) итерационный процесс совместного решения уравнений (2) и (3) схематично записывается так

$$\hat{\mathbf{K}} \left[ \mathbf{I}^{n+1} \right]^s - \hat{\mathbf{H}} \left[ \mathbf{p}^{n+1} \right]^{s-1} = 0, \quad (7)$$

где  $\hat{\mathbf{K}}, \hat{\mathbf{H}}$  – соответствующие дифференциальные операторы,  $s$  – индекс итерационного шага, а  $n$  – шаг по времени. Так как решение уравнений ищется в приращениях от начального состояния пористой среды, то давление (избыток давления) на нулевом шаге по времени равно нулю  $\left[ \mathbf{p}^0 \right] = 0$ . Нулю будут равны и перемещения на этом шаге  $\left[ \mathbf{I}^0 \right] = 0$ . Для вычисления перемещений на первой итерации ( $s=1$ ) на  $(n+1)$ -ом временном шаге давление берется с предыдущего временного шага  $\left[ \mathbf{p}^{n+1} \right]^0 = \left[ \mathbf{p}^n \right]$ . Уравнение (7) решается с учетом поставленных граничных условий. Перемещения  $\left[ \mathbf{I}^{n+1} \right]^s$ , полученные из решения (7) используются при решении уравнения (3).

Расписав временную производную по неявной схеме уравнение (3) в операторном виде принимает вид:

$$S_\varepsilon \left[ \mathbf{p}^{n+1} \right]^s + \Delta t \hat{\mathbf{L}} \left[ \mathbf{p}^{n+1} \right]^s = S_\varepsilon \left[ \mathbf{p}^n \right] - \hat{\mathbf{U}} \left( \left[ \mathbf{I}^{n+1} \right]^s - \left[ \mathbf{I}^n \right] \right), \quad (8)$$

где  $\hat{\mathbf{L}}, \hat{\mathbf{U}}$  – соответствующие дифференциальные операторы,  $\left[ \mathbf{p}^n \right]$  и  $\left[ \mathbf{I}^n \right]$  – вычисленные на  $n$ -ом шаге по времени давление и перемещения,  $\left[ \mathbf{I}^{n+1} \right]^s$  – перемещения найденные из решения уравнения (7). Уравнение (8) решается с учетом граничных условий поставленных на давление.

В случае рассмотрения задачи с учетом роста корки, в граничном условии на поверхности, через которую проникает флюид, в выражении на скорость фильтрации (5) присутствует еще неизвестная на временном шаге  $(n+1)$  – толщина корки  $\left[ \mathbf{h}_c^{n+1} \right]^s$ . Поэтому для получения давления  $\left[ \mathbf{p}^{n+1} \right]^s$  организован второй итерационный процесс по индексу  $m$  совместного решения уравнений (8) и (6). Тогда, уравнение (8) вместе с граничным условием (5) для неизвестного давления на  $m$ -ой итерации принимает вид

$$\begin{cases} S_\varepsilon [\mathbf{p}^{n+1}]_m^s + \Delta t \hat{\mathbf{L}} [\mathbf{p}^{n+1}]_m^s = S_\varepsilon [\mathbf{p}^n] - \hat{\mathbf{U}}([\mathbf{1}^{n+1}]^s - [\mathbf{1}^n]) \\ \left. \frac{k}{\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial n} \right)_m \right|_{r_w} = \frac{k_c \left( [\mathbf{p}_b] - [\mathbf{p}_w^{n+1}]_m^s \right)}{\mu r_w} \ln^{-1} \left[ \frac{r_w}{r_w - [\mathbf{h}_c^{n+1}]_{m-1}^s} \right]. \end{cases} \quad (9)$$

Расписав временную производную по неявной схеме, уравнение (6) с учетом итерационных коэффициентов, примет вид:

$$[\mathbf{h}_c^{n+1}]_m^s - [\mathbf{h}_c^n] = \frac{k_c \Delta t \left( [\mathbf{p}_b] - [\mathbf{p}_w^{n+1}]_m^s \right)}{\mu \left( r_w - [\mathbf{h}_c^{n+1}]_m^s \right)} \ln^{-1} \left[ \frac{r_w}{r_w - [\mathbf{h}_c^{n+1}]_m^s} \right] - \Delta t \gamma w \quad (10)$$

где  $[\mathbf{h}_c^n]$  – вычисленная на  $n$ -ом шаге по времени толщина корки.

Для решения (9) на первой итерации по  $m$ , толщина корки  $[\mathbf{h}_c^{n+1}]_0^s$  берется равной значению, полученному в ходе итерационного решения уравнений (7) и (9) на  $(s-1)$  итерации  $[\mathbf{h}_c^{n+1}]_0^s = [\mathbf{h}_c^{n+1}]_0^{s-1}$ . Для  $s=1$  толщина корки берется с предыдущего временного шага  $[\mathbf{h}_c^{n+1}]_0^1 = [\mathbf{h}_c^n]$ . В начальный момент времени толщина корки равна нулю  $[\mathbf{h}_c^0] = 0$ .

Найденное из решения (9) давление  $[\mathbf{p}_w^{n+1}]_m^s$ , используется для нахождения толщины корки  $[\mathbf{h}_c^{n+1}]_m^s$  из уравнения (10). Уравнение (10) является трансцендентным уравнением для  $[\mathbf{h}_c^{n+1}]_m^s$ . Решая итерационно уравнения (9) и (10) до достижения невязки по давлению между итерациями заданной точности, получим толщину корки и давление флюида. Найденное давление  $[\mathbf{p}^{n+1}]^s$  используется затем при решении уравнения (7) на следующем  $s+1$  итерационном шаге, т.е. находятся перемещения  $[\mathbf{1}^{n+1}]^{s+1}$ . Выход в итерационном процессе решения уравнений (7) и (9) производится при достижении невязки по перемещениям между итерациями заданной точности. В итоге итерационного решения уравнений (7), (9) и (10) находим перемещения твердой матрицы, изменение давления флюида и толщину корки на  $(n+1)$ -ом временном шаге.

Решение уравнения на смещения в скелете (7) и динамической задачи фильтрации (8) проводилось методом конечных элементов в формулировке Галёркина. В работе выписаны основные выражения для поверхностных и объ-

емных интегралов для расчета коэффициентов матриц системы линейных уравнения на перемещения и поровое давление.

*Третий параграф* посвящён верификации алгоритма. Тестирование составных модулей пакета программ, а также совместного алгоритма проводилось на соответствующих аналитических решениях. Тестовые расчеты, представленные в диссертации, выполнялись для задач в двумерной геометрии, использовались конечные элементы первого порядка аппроксимации – треугольники с тремя узлами в вершинах.

Тестирование модуля расчета перемещений и напряжений проводилось на задаче об определении напряжений вокруг круглого отверстия с внутренним давлением в пластинке бесконечного радиуса. Для теста модуля расчета порового давления решена задача о плоскорадиальном фильтрационном потоке в сжимаемой среде. Связка модуля расчета порового давления и определения толщины корки тестировалась на полученном аналитическом решении для радиальной задачи фильтрации сквозь несжимаемую пористую среду с учетом образования корки. Для тестирования алгоритма совместного моделирования использовались аналитическое решение одномерной задачи Терцаги, а также аналитические формулы, используемые для описания совместного изменения напряженного состояния и порового давления вокруг круглой скважины в простейших случаях. Важным этапом верификации работы алгоритма совместного моделирования было сравнение результатов расчета с экспериментальными данными.

На конечном этапе верификации пакета программ было получено точное соответствие результатов моделирования изменения напряжений и порового давления с учетом динамики корки двумя версиями программ (2D и 3D) для задачи, допускающей использование свойства симметрии. Во всех случаях результаты тестирования пакета программ, как с точными аналитическими решениями, так и с результатами экспериментов показали хорошее согласование, что доказывает его пригодность для моделирования деформационных и фильтрационных процессов в пористой среде с точностью до 2–3% на достаточно грубых сетках. Во всех случаях точность растет с ростом числа узлов используемых сеток.

*В четвёртом параграфе* описана структура пакета программ. На основе разработанного в диссертации алгоритма, создан пакет программ GeoFluid для моделирования изменения напряженно-деформированного состояния твердого скелета и давления флюида в пористой среде. В зависимости от поставленной задачи использование GeoFluid позволяет получать готовые программы, комбинируя соответствующие программные модули. Традиционно пакет вычислительных программ состоит из трех частей: препроцессора, решателя и постпроцессора. В пакете GeoFluid каждая из этих частей может быть использована как отдельная программа. Связь между программами осуществляется с помощью файлов с заданной структурой. Каждая из частей комплекса GeoFluid разработана в среде Visual Studio на языке C++.

В конце параграфа, в качестве примера, пре- и постпроцессора, приведены формы ввода данных для решения прикладных задач программного комплекса 3DGFMC, входящего в пакет GeoFluid, и предназначенного для совместного трехмерного моделирования геомеханических и фильтрационных процессов в прискважинной зоне во время бурения с учетом динамики корки

**Вторая глава** посвящена анализу возникновения возможного разрушения на основе критерия Кулона-Мора при хрупком, пластическом и длительном характере разрушения.

В первом параграфе для определения предельного состояния горной породы при хрупком разрушении на основе критерия Кулона-Мора, разработана методика построения паспорта прочности по результатам экспериментов. В основе критерия прочности Кулона-Мора лежит гипотеза Мора о зависимости предельного касательного напряжения  $\tau$  от среднего нормального напряжения  $\sigma$  и гипотеза Кулона о том, что эта зависимость обусловлена внутренним трением в твердом теле. Графическая интерпретация условия прочности Кулона-Мора наглядна и дает возможность оценивать опасность того или иного напряженного состояния простым вписанием круга этого состояния в диаграмму, пример которой приведен на рисунке 2.

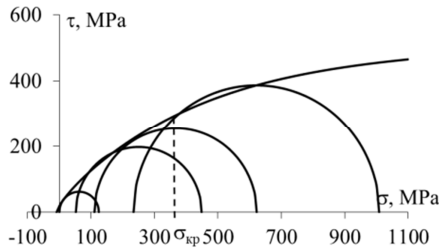


Рисунок 2 – Диаграмма Кулона-Мора

На диаграмме строятся круги предельных напряженных состояний, центры которых находятся от начала координат на расстоянии равном  $\sigma = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ , а радиусы равны  $\tau = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ , где  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ . Если круг исследуемого состояния пересекает общую огибающую к кругам, такая комбинация напряжений вызовет разрушение. На диаграмме (рисунок 2)  $\sigma_{кр}$  соответствует значению предельного нормального напряжения при разрушении. М.М. Протодяконов на основе анализа экспериментальных данных пришел к выводу о существовании единой формы огибающих для горных пород, которая имеет следующий вид:

$$\tau = \tau_{\max} \left[ 1 + \left( \frac{a}{\sigma + \sigma_0} \right)^2 \right]^{\frac{3}{8}}. \quad (11)$$

где  $\tau_{\max}$ ,  $\sigma_0$ ,  $a$  – параметры, определяемые из результатов экспериментов.

На основе уравнения (11), был создан государственный стандарт ГОСТ 21153.8-88, в котором прописана методика построения огибающей по результатам испытаний образцов горных пород. На практике такую огибающую называют паспортом прочности горной породы и используют для определения предельного состояния среды до разрушения, согласно существующему государственному стандарту. Методика, предлагаемая в государственном стандарте, содержит неточность в определении предельного сопротивления срезу и, кроме

того, в ней предлагается использовать табличные данные для построения паспорта, что, несомненно, влечет неточности при построении огибающей.

Для автоматизации процесса построения паспорта прочности, разработана методика, в основе работы которой, лежит численное решение системы нелинейных уравнений методом последовательных приближений. На основе предложенной методики, разработаны и реализованы расчетные программы в среде Microsoft Excel, для построения паспорта прочности по 2 результатам экспериментов: одноосное сжатие и растяжение, одноосное сжатие и сжатие с боковым давлением, либо сжатие с боковым давлением с разными соотношениями осевой и боковой нагрузки.

Во втором параграфе приведены примеры построения паспорта прочности для различных горных пород. Построенный паспорт прочности имеет следующий формат: таблица с данными (см. табл. 1) и график паспорта прочности. В качестве примера, приведен результат построения паспорта прочности для мрамора по двум экспериментам на сжатие с боковым давлением с разными соотношениями осевой и боковой нагрузки. Для построения паспорта прочности, во вторую строку таблицы записывается тип породы, значения осевых нагрузок при разрушении и коэффициент пропорциональности между осевым и боковым давлением, поддерживаемый в ходе эксперимента. Затем пользователь нажимает кнопку «Построить паспорт», после чего в автоматическом режиме рассчитываются параметры необходимые для построения огибающей вида (11).

Таблица 1 – Расчетная таблица построения паспорта прочности

Построить паспорт						
Образец горной породы	Сжатие с боковым давлением, МПа	$d_1 =$		Сжатие с боковым давлением, МПа	$d_2 =$	
		$\sigma_{бок}/\sigma_{осевое}$			$\sigma_{бок}/\sigma_{осевое}$	
Мрамор	167.6	0.069		192.9		0.116
Таблица						
	K	l	$\sigma$	$\tau$	$\phi$	$C_0$
Вид нагружения			МПа	МПа	град.	МПа
Гидрост. растяж.-е	0.00	0.00	-32.21	0.00	90.00	~
Чистый сдвиг	0.07	0.10	-19.06	18.33	46.14	38.15
Растяжение-Сжатие	0.18	0.20	-0.33	35.26	38.80	35.53
	0.29	0.28	18.39	49.00	33.88	36.66
	0.39	0.34	37.12	60.56	29.59	39.50
Одноосное сжатие	0.50	0.40	55.84	70.35	25.64	43.56
	0.62	0.45	77.57	79.80	21.46	49.32
Трехосное сжатие	0.75	0.50	99.30	87.53	17.79	55.67
	0.87	0.53	121.03	93.83	14.67	62.16
	0.99	0.56	142.76	98.98	12.07	68.45
	1.12	0.59	164.49	103.19	9.95	74.35
	1.24	0.60	186.21	106.65	8.23	79.74
	1.36	0.62	207.94	109.52	6.84	84.60
	1.48	0.63	229.67	111.90	5.71	88.93
	1.61	0.65	251.40	113.89	4.80	92.78
Предельное сопротивление сдвигу, МПа (расчет по паспорту)					$\tau_0 =$	26.45
Предел прочности на растяжение, МПа (расчет по паспорту)					$\sigma_{расч.} =$	30.12
Параметры паспорта		$\sigma_0 =$	32.21		$a =$	176.36

По полученному виду огибающей (11), в таблицу помещаются точки пресечения огибающей с кругами Мора для различных видов напряженного состояния в безразмерных координатах  $(K, I)$  и в системе  $(\sigma, \tau)$ , угол внутреннего трения  $\varphi$  и коэффициент сцепления  $C_0$ . Табличные значения  $(\sigma, \tau)$  соответствуют предельному напряженному состоянию и являются точками для паспорта прочности – предельной огибающей аналогичной, приведенной на рисунке 2. Используя рассчитанный паспорт прочности, можно вычислить пределы прочности для основных типов экспериментов: одноосное растяжение, чистый сдвиг; также предусмотрен блок расчета прочности горной породы в различных условиях объемного нагружения (вариация коэффициента пропорциональности  $d$ ). В последней строке таблицы приводятся рассчитанные параметры паспорта прочности, которые используются в программном комплексе 3DGFMC для анализа предельного состояния массива горной породы.

Проведя сравнение определения, с помощью построенного паспорта прочности, предельного состояния при сложном нагружении различных горных пород стоит отметить, что для одного типа горной породы, построенная огибающая хорошо описывает прочность, а для другого могут конструктивно отличаться. Поэтому следует внимательно относиться к указанной в ГОСТе паспортной зависимости, учитывая, что не для каждого вида горной породы паспорт прочности, построенный по результатам нескольких экспериментов, достоверно может описать прочностные характеристики в условиях объемного напряженного состояния. Для анализа влияния параметров в паспортной зависимости, рекомендованной ГОСТом, в расчетных таблицах предусмотрена опция изменения параметров уравнения огибающей, а также использование логарифмической и прямолинейной формы огибающей. Это дает возможность использовать широкий спектр зависимостей, проанализировав которые можно построить действительный паспорт прочности для данной горной породы, наиболее достоверно описывающий предельное состояние.

*В третьем параграфе* с позиции экспериментально обоснованной теории пластичности, учитывающей внутренне трение и дилатансию, решена задача о перераспределении напряжений в прискажинной зоне в зависимости от начального напряженного состояния, давления в скважине и упругопластических свойств горной породы. Дело в том, что на больших глубинах, после проведения в массиве скважины или выработки, происходит перераспределение напряжений, приводящее к образованию неупругой ослабленной зоны пластических деформаций. Размеры и форма этой зоны будут зависеть от упругопластических свойств горной породы и от напряженного состояния в нетронутом массиве. Рассмотрение таких задач с учетом поправок и уточнений к классическим теориям изложено, например, в работах П.Ф. Гнирка, Е.М. Шемякина, А.М. Линькова, Р. Риснеса, А.Н. Ставрогина, А.М. Алимжанова, однако подробного анализа зон пластического состояния проведено не было.

В диссертации, используя упругопластическую модель твердого тела с условием пластичности Кулона-Мора, распределении напряжений вокруг скважины при пластических деформациях для более широкого круга возможных ситуаций, исследованы возможные случаи сочетания полной и неполной пластичности, в зависимости от значения внутреннего давления, в каждом из слу-

чаев указан механизм пластического деформирования. Анализ решений также показывает, что при повышении коэффициента сцепления и угла внутреннего трения граница зон пластичности приближаются к стенке скважины.

В четвертом параграфе приведено сравнение оценок длительной прочности по существующим критериям, а также предлагаемому критерию Кулона-Мора с результатами экспериментов на длительное нагружение. Как правило, уравнения теорий ползучести основаны на определенном варианте теории пластичности, а критерии длительной прочности на теории прочности материала. Это обстоятельство связано с тем, что к моменту опубликования первых работ по техническим теориям ползучести (Удквист, Бейли, Содерберг, Дейвенпорт и Надаи, 1935-1938 г.) уже были сформулированы уравнения классических теорий пластичности и основные технические теории прочности. С точки зрения традиционных представлений критерий Кулона-Мора получил широкое распространение для грунтов и горных пород. По-видимому, этим обстоятельством и можно объяснить тот факт, что в настоящее время он не применяется в исследованиях по длительной прочности металлов. Если для напряженного состояния главные оси занумерованы так, что:  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ , то критерий прочности Кулона-Мора при длительной работе материала можно записать в следующей форме:

$$\sigma_{e5} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cos \varphi} + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \operatorname{tg} \varphi. \quad (12)$$

Для сопоставления различных критериев длительной прочности, в диссертации проанализированы результаты экспериментов И.И. Трунина и В.П. Сдобырева, в которых определяется длительная прочность тонкостенных цилиндрических образцов при их нагружении растягивающей силой и крутящим моментом. Для каждого из критериев среднеквадратическое отклонение экспериментальных точек от прямолинейной зависимости определяется соотношением:

$$\Delta_j = \sqrt{D_j}, \quad D_j = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\sigma_{ej}^i - \sigma_{ej}(t_i))^2, \quad j = 1-5, \quad (13)$$

где  $D_j$  ( $j = 1-5$ ) – дисперсия расстояний экспериментальных точек от соответствующих линейных зависимостей длительной прочности по критериям Каца, Сдобырева, Лебедева, Трунина и Кулона-Мора. В таблице 2 представлены результаты обработки опытных данных с позиции различных критериев длительной прочности. Для каждого из критериев приводится относительное среднеквадратическое отклонение  $\Delta_j / \Delta$ , где  $\Delta = \min_j \Delta_j$ .

Таблица 2 – Относительное среднеквадратическое отклонение результатов опытов от линейной зависимости по различным критериям

Материал	$\Delta_1/\Delta$	$\Delta_2/\Delta$	$\Delta_3/\Delta$	$\Delta_4/\Delta$	$\Delta_5/\Delta$
Сталь– 1X18H12T	3.86	3.25	1.31	1.28	1.00
Сталь– 15X1M1Ф	3.38	2.35	1.34	1.21	1.00
Сплав– ЭИ437Б	1.39	2.31	1.13	1.00	1.03



Сравнивая результаты, приведенные в таблице 2, видно, что для критерия  $\sigma_{e5}$  получено наименьшее среднеквадратическое отклонение экспериментальных точек для стали аустенитного класса (1X18H12T) и перлитной стали (15X1M1Ф), поэтому в этом случае можно констатировать, что критерий длительной прочности Кулона-Мора, имея ясный физический смысл, лучше, чем другие перечисленные критерии, согласуется с опытными данными. Развивая предложенное использование критерия Кулона-Мора для оценки длительной прочности, А.М. Коврижных выписаны уравнения ползучести, основанные на дилатансионно-сдвиговой теории пластичности. Направления разрушения, полученные по этим уравнениям, правильно предсказывают появление продольных трещин, наблюдаемых в экспериментах на одноосное сжатие призматических образцов соляных пород в условиях ползучести. Проведенное сравнение теоретических и экспериментальных результатов при длительном нагружении различных материалов в условиях ползучести, по-видимому, позволяет на основе критерия Кулона - Мора правильно определять и предельные напряжения и направления разрушения.

**Третья глава** диссертации посвящена применению разработанного алгоритма совместного моделирования геомеханических и фильтрационных процессов для решения практических задач.

В *первом параграфе* выполнено моделирование и проведен анализ изменения порового давления и напряженного состояния прискважинной зоны во время бурения хорошо и слабо проницаемой пористой среды, с учетом и без учета образования корки бурового флюида на стенке скважины. В качестве хорошо проницаемой формации выбран песчаник Вега с проницаемостью 190 мД и плотностью 2000 кг/м<sup>3</sup>. Деформационные и пороупругие характеристики песчаника следующие: модуль сдвига  $G = 6$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0.2$ , коэффициент Био-Виллиса  $\alpha = 0.79$ , удельный коэффициент флюидоотдачи  $S_e = 0.08$  ГПа<sup>-1</sup>. Рассмотрим изменение напряжений и порового давления при бурении вертикальной скважины радиусом  $r_w = 0.1$  м в формации на глубине 200 м. Бурение ведется с использованием флюида на водной основе с вязкостью  $\mu = 1$  сП, с концентрацией твердых частиц  $\delta = 6\%$ . Вскрытие формации происходит с превышением давления над пластовым 40 атм. В начальный момент вскрытия формации происходит проникновение твердых частиц в поры вблизи стенки скважины, образуется внутренняя корка толщиной 0.02 м с проницаемостью 1 мД. В процессе проникновения бурового флюида в формацию на стенке скважины формируется внешняя корка с пористостью 0.3 и абсолютной проницаемостью 10<sup>-3</sup> мД. Для простоты предполагалось, что смыв отсутствует.

В случае, когда бурение ведется с превышением давления над гидростатическим пластовым, проникновение бурового флюида в пласт вызывает повышение давления  $p$  и напряжения  $\sigma_{\theta\theta}$  в прискважинной зоне. На рисунке 3 приведено распределение давления  $p$  и напряжения  $\sigma_{\theta\theta}$  для двух промежутков времени:  $t=0.1$  секунды (кривые 1 и 3) и  $t = 1$  минуте (кривые 2 и 4). На графике по оси абсцисс откладывается расстояние от скважины, нормированное на радиус скважины. Кривые 1 и 2 соответствуют случаю, когда при моделировании не

учитывается образование корки на стенке скважины. Как видно из рисунка возмущение давления флюида со временем распространяется от скважины в формацию. Кривые 3 и 4 отображают распределение давления, когда в моделировании учитывается образование корки бурового флюида на стенке скважины.

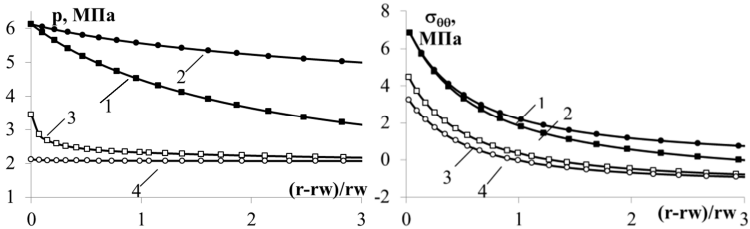


Рисунок 3 – Распределение давления флюида  $p$  и напряжения  $\sigma_{\theta\theta}$

К моменту времени равному 0.1 секунды образовавшаяся корка уменьшает давление флюида на стенке скважины почти вдвое. Спустя минуту толщина корки составляет 0.2 мм (рисунок 4, кривая 1) и она практически полностью изолирует формацию от скважины, давление выходит на начальное гидростатическое.

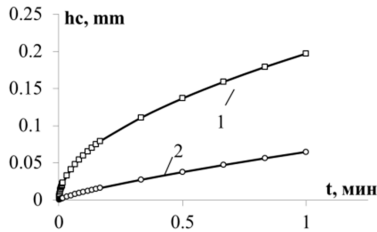


Рисунок 4 – Изменение толщины корки  $h_c$  со временем

Рост давления в прискважинной зоне вызывает изменение напряжения в скелете, что может привести к возникновению зон трещиноватости. Возникновение трещин, связано с превышением растягивающего нормального напряжения в окружном направлении  $\sigma_{\theta\theta}$  на стенке скважины над пределом прочности на растяжение. Поэтому, для анализа устойчивости стенок скважины, на рисунке 3 приведен график напряжения  $\sigma_{\theta\theta}$  в скелете. Положительные значения на оси ординат – это область растягивающих напряжений. Образование корки в начальный момент уменьшает растягивающее напряжение  $\sigma_{\theta\theta}$  на стенке скважины более чем на 30 %. Если наличие корки не учитывать, то напряжение  $\sigma_{\theta\theta}$  со временем растет вглубь формации – это означает, что растет зона потенциального трещинообразования.

Для слабопроницаемого песчаника Weber с проницаемостью 1 мД повышение давление в прискважинной зоне, вызванное проникновением бурового флюида, также приводит к изменению напряжений. Однако эти изменения происходят в основном в ближайшей окрестности скважины, а со временем распространение возмущений давления и напряжений вглубь формации происходит

медленнее, по сравнению с хорошо проницаемой формацией. Влияние корки на распределения давления и напряжений в этом случае слабое, это связано с тем, что в слабопроницаемую формацию проникает меньше бурового флюида, поэтому корка на стенке скважины растет медленнее (рисунок 4, кривая 2), к первой минуте бурения её толщина равна 0.05 мм. Тем не менее, и в этом случае корка со временем изолирует формацию от поступления бурового флюида и препятствует росту растягивающего напряжения  $\sigma_{\theta\theta}$  вглубь формации.

Во втором параграфе представлены результаты моделирования, изменения напряжений и порового давления в прискважинной зоне во время бурения скважины в массиве, изначально находящемся в состоянии геостатического сжатия.

Как показали результаты проведенного моделирования, в момент вскрытия формации напряжения в окрестности скважины превышают критерий прочности Кулона-Мора, поэтому могут образоваться вывалы размером до радиуса скважины, что может заклинить буровой инструмент и вызвать остановку бурения. Добавление в буровой флюид частиц мелкой фракции, и вследствие этого образование внутренней корки помогает предотвратить рост возмущений напряжения и порового давления вглубь формации и способствует обеспечению устойчивости на момент прохождения долота. После прохождения долота давление в межтрубном пространстве падает до нескольких десятков атмосфер и на стенке скважины начинает образовываться внешняя корка бурового флюида, она практически полностью изолирует формацию от дальнейших возмущений, поэтому давление флюида выравнивается и выходит на начальное гидростатическое. Напряженное состояние пористой среды в прискважинной зоне становится стабильным и устойчивым.

В третьем параграфе приведены результаты моделирования изменения напряженно-деформированного состояния прискважинной зоны и порового давления во время гидродинамического тестирования скважины на разрыв двухпакерным прибором. На рисунке 5, приведена расчетная область решаемой задачи. Цифрой 1 обозначены пакеры прибора, изолирующие от бурового флюида в скважине, рабочий отдел прибора по цифрой 2. Основные уравнения задачи в такой постановке (2), (3).

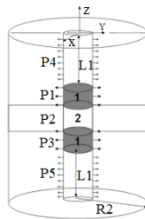


Рисунок 5 – Расчетная область моделирования изменения напряжений и порового давления во время гидродинамического тестирования скважины

Внешняя граница расчетной области отнесена на большое расстояние от скважины, поэтому перемещения скелета на ней нулевые:  $\mathbf{I}|_{r=R_2} = 0$ . В начальный момент времени в формации и в дальнейшем на внешней границе расчет-

ной области возмущения давления предполагаются равными нулю. На верхней  $z = 0$  и нижней  $z = -L$  горизонтальных границах расчетной области поставлено условие отсутствия перемещений по  $z$ . На поверхности скважины касательная составляющая вектора напряжений равна нулю, а нормальная, в зависимости от координаты  $z$  равна давлению в скважине (смотри рисунок 5):  $P_1, P_3$  – давление в пакерах,  $P_4, P_5$  – давление бурового флюида в скважине. Моделирование проведено для случая, хорошо проницаемого резервуара с проницаемостью 190 мД. В ходе работы прибора, в течении 5 минут давление в тестовом интервале  $P_2$  повышается с гидростатического 83.6 МПа до 95.48 МПа.

На рисунке 6 приведено распределение порового давления  $p$  и напряжения  $\sigma_{\theta\theta}$  на стенке скважины в зависимости от относительной глубины  $h$  для расчетной области. Тестовый интервал находится между отметками 2 и 3. Номера кривых соответствуют промежуткам времени: 1 – 30 секунд, 2– 150 секунд, 3– 300 секунд. Для сравнения, на графиках представлены результаты, полученные по статической модели пороупругости (кривая 4).

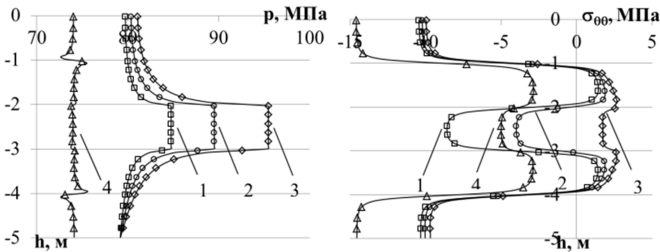


Рисунок 6 – Профили давления  $p$  и напряжения  $\sigma_{\theta\theta}$  близи стенки скважины

Поле давления флюида, полученное по статической пороупругой модели, качественно дает неправильную картину порового давления. Наличие в моделировании динамики нагружения тестового интервала позволяет отследить изменение распределения напряжения  $\sigma_{\theta\theta}$  во времени. Возрастание напряжения  $\sigma_{\theta\theta}$  вызвано повышением давления в тестовом интервале прибора и проникновением бурового флюида в формацию. Как видно из рисунка 6 статическая модель пороупругости не позволяет правильно предсказать наличие растягивающих тангенциальных напряжений при гидродинамическом тестировании.

## Заключение.

Диссертация посвящена разработке алгоритма совместного моделирования деформационных и фильтрационных процессов в пористой среде. В отличие от существующих, разработанный алгоритм совместного моделирования изменения порового давления и напряженно-деформированного состояния пористой среды позволяет учесть динамику корки, образующейся при фильтрации флюида, содержащего твердые частицы. На основе разработанного алгоритма с помощью метода конечных элементов реализован пакет программ GeoFluid, содержащий в себе трехмерные и двухмерные модули моделирования. Двумерные

программы отличаются более простой структурой и быстродействием, что позволяет получить за короткое время качественные и количественные результаты в задачах, допускающих симметрию по одному из направлений. Результаты тестирования программ и сопоставления работы алгоритма, как с точными аналитическими решениями, так и с результатами экспериментов показали его пригодность для описания совместных деформационных и фильтрационных процессов в пористой среде.

В диссертационной работе проведен анализ применения критериального подхода для оценки предельного состояния на основе критерия Кулона-Мора при хрупком, пластическом и длительном характере разрушения. Для оценки предельного состояния перед разрушением разработана и программно реализована методика построения паспорта прочности горной породы ГОСТ 21153.8-88 по различным сочетаниям результатов экспериментов на растяжение, одноосное сжатие и сжатие с боковым давлением. Созданная программа автоматического расчета паспорта прочности горной породы по результатам экспериментов имеет практическое применение для анализа предельного состояния горного массива при бурении скважин, а также при решении задач, направленных на обеспечение безопасности горных работы.

С использованием, разработанного в диссертации, пакета программ проведено совместное моделирование геомеханических и фильтрационных процессов в прискважинной зоне при технологических операциях на скважине (бурение, гидродинамическое тестирование). На основе проведенного совместного моделирования показано, что для оценки изменения напряжений и порового давления в прискважинной зоне во время бурения при прохождении пористых интервалов необходимо в моделировании учитывать динамику корки. Во время бурения проницаемой пористой среду корка обеспечивает быстрое изолирование формации, и уменьшает локальные возмущения давления и напряжений вблизи скважины. Учет динамики образования корки позволяет правильно оценить распространение возмущений давления и напряжений вглубь формации в процессе бурения.

## **Основные публикации по теме диссертации**

**Научные публикации в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных журналов и изданий, определенный Высшей аттестационной комиссией при Минобрнауки России**

1. Манаков, А.В. Построение паспортов прочности по опытным данным / А.В. Манаков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – № 11. – С. 93–95.
2. Коврижных, А.М. Длительная прочность металлов и уравнения ползучести, основанные на критерии Кулона - Мора / А.М. Коврижных, В.Д. Барышников, А.В. Манаков, А.Ф. Никитенко // Прикладная механика и техническая физика. – 2007. – Т. 48. – №6. – С. 115-123.
3. Манаков, А.В. Алгоритм совместного моделирования процессов фильтрации и геомеханики в прискважинной зоне / А.В. Манаков, В.Я. Рудяк // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2012. – Т. XV. – № 1(49). – С. 53–65.

### **Статьи в других научных изданиях**

4. Манаков, А.В. Анализ влияния давления в скважине и упругопластических свойств горной породы на напряженное состояние прискважинной зоны / А.В. Манаков // Труды НГАСУ. – Новосибирск: НГАСУ. – 2013. – Т. 16. – № 1 (55). – С. 44-59.

5. Манаков, А.В. Анализ взаимовлияния порового давления и напряжений в формации при гидродинамическом тестировании / А.В. Манаков, А.В. Серяков, В.Я. Рудяк // Труды НГАСУ. – Новосибирск: НГАСУ. – 2013. – Т. 16. – № 1 (55). – С. 113-121.

### **Статьи в трудах конференций**

6. Манаков, А.В. Предельное напряженно-деформированное состояние горного массива вокруг выработок / А.В. Манаков // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: труды научной конференции с участием иностранных ученых. – Новосибирск: Ин-т горного дела Н.А. Чинакала СО РАН. – 2005. – С. 388-394.

7. Манаков, А.В. Влияние глинистой корки на напряжения вокруг скважины во время бурения / А.В. Манаков, В.Я. Рудяк // Фундаментальные основы МЭМС- и нанотехнологий. – Новосибирск: НГАСУ. – 2010. – Вып. 2. – С. 96-98.

8. Манаков, А.В. Совместное моделирование процессов геомеханики и фильтрации при измерении проницаемости формации / А.В. Манаков, В.Я. Рудяк // Фундаментальные основы МЭМС – и нанотехнологий. Вып. 3: III Всероссийский семинар. – Новосибирск: НГАСУ. – 2011. – С.98-100.

9. Манаков, А.В. Совместное моделирование процессов геомеханики и фильтрации в прискважинной зоне во время бурения / А.В. Манаков, А.В. Серяков, В.Я. Рудяк // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: труды конференции с участием иностранных ученых. – Новосибирск: Ин-т горного дела Н.А. Чинакала СО РАН. – 2011. – С. 383-388.

10. Манаков, А.В. Моделирование фильтрационных и геомеханических процессов в прискважинной зоне / А.В. Манаков // Современные проблемы математики и механики: материалы докладов III Всероссийской молодежной научной конференции. – Томск: Изд-во Том. ун-та. – 2012. – С. 338-342.

11. Манаков, А.В. Оценка напряженного состояния прискважинной зоны при гидродинамическом тестировании формации / А.В. Манаков, А.В. Серяков, В.Я. Рудяк // Фундаментальные основы МЭМС – и нанотехнологий: доклады IV Всероссийской конференции. – Новосибирск: НГАСУ. – 2012. – С. 356-361.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный  
университет (Сибстрин)  
630008, Новосибирск, ул. Ленинградская, 113

---

Отпечатано мастерской оперативной полиграфии  
НГАСУ (Сибстрин)

Тираж *100* экз. Заказ № *95*