

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 622.27; 004.9; 539.3

ХВЕСЕНЯ
Сергей Сергеевич

**ТЕХНОЛОГИИ РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
И ПОСТРОЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ
МОДЕЛЕЙ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 25.02.08 – Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Минск, 2015

Работа выполнена в Белорусском государственном университете

Научный руководитель

ЖУРАВКОВ Михаил Анатольевич,
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики, Белорусский государственный университет

Официальные оппоненты:

БРОВКА Геннадий Петрович,
доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией физико-химической механики природных дисперсных систем ГНУ «Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси»;

ПЕТРОВСКИЙ Борис Иванович,
доктор технических наук, главный научный сотрудник унитарного предприятия «Институт горного дела»

Оппонирующая организация: ОАО «Белгорхимпром»

Защита состоится 26.06.2015 в 14.00 часов на заседании совета Д 02.05.11 по защите диссертаций при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, 1 корпус, ауд. 202. Телефон ученого секретаря 293-92-18, e-mail: kafgormash@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «25» мая 2015 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 02.05.11,
доктор технических наук, профессор _____ Н.И. Березовский

© Хвесеня С.С., 2015

© Белорусский национальный
технический университет, 2015

ВВЕДЕНИЕ

Развитие экономики Республики Беларусь предусматривает повышение эффективности разработки месторождений полезных ископаемых путем увеличения извлечения запасов из недр, разработки новых технологических схем отработки с учетом безопасности ведения горных работ и уменьшения их вредного влияния на окружающую среду. Вследствие возрастающей роли горнодобывающей промышленности, расширения масштабов подземного строительства, освоения все более сложных для разработки и добычи участков залегания полезных ископаемых, наличие адекватной трехмерной компьютерной (цифровой) геомеханической модели разрабатываемого участка породного массива является безусловной необходимостью. Построение такой модели обеспечивает дальнейшее изучение породной толщи и возможность прогнозирования физических процессов в массивах горных пород при воздействии естественных и техногенных источников возмущений.

Высокая эффективность использования технологий компьютерного моделирования при создании общих трехмерных геологических и на их основе геомеханических моделей породных массивов на современном этапе развития информационных технологий не вызывает сомнений и подчеркивается в огромном количестве публикаций. Многие ученые занимаются общими и прикладными научно-техническими проблемами, и задачами геомеханического моделирования. Среди них, например, Ампилов Ю. П., Андрейко С. С., Анциферов А. В., Ашихмин А. А., Барышников В. Д., Барях А. А., Бровка Г. П., Журавков М. А., Кашников Ю. А., Кислов Н. В., Куренков Н. И., Курленя М. В., Леонов Ю. Г., Миренков В. Е., Назаров Л. А., Назарова Л. А., Оника С. Г., Опарин В. Н., Петровский Б. И., Протосеня А. Г., Резниченко С. С., Смычник А. Д., Шемет С. Ф. и др.

Важным является тот факт, что наличие компьютерных цифровых моделей позволяет перестраивать геологические модели с учетом новых данных, с появлением новых типов геофизической информации, использованием более эффективных специализированных алгоритмов обработки массивов данных первичной информации. Сегодня работу крупных нефтегазодобывающих и горнорудных компаний невозможно представить без активного использования компьютерных специализированных пакетов для обработки данных сейсморазведки и последующего построения цифровых моделей породной толщи. Широкое и повсеместное внедрение технологий и систем математического и компьютерного моделирования привело к тому, что в настоящий момент наличие цифровой геологической модели и фильтрационной модели является обязательным условием при эксплуатации углеводородных месторождений и во многих нефтедобывающих странах это закреплено на законодательном уровне.

Вместе с тем, повсеместное использование и широкая распространенность трехмерного геомеханического моделирования на основе механико-

математического моделирования и компьютерных технологий, абсолютно не свидетельствует о простоте и тривиальности этого процесса. В действительности построение трехмерной компьютерной (цифровой) геомеханической модели участка породного массива представляет собой весьма сложную задачу. Но получаемый результат, а именно построенная цифровая адекватная модель, окупает все вложенные материальные и моральные затраты, позволяя изучать общую трехмерную картину по месторождению в реальном времени, решать различные прикладные задачи, выполнять прогнозирование и оперативно реагировать на различные возникающие проблемы.

Важным условием построения адекватной достоверной комплексной трехмерной геомеханической модели породной толщи является использование всей совокупности горно-геологических, горнотехнологических и геомеханических данных, их структурированность и непротиворечивость. Однако, на сегодня, в большинстве своем, к сожалению, геомеханические данные являются разрозненными и неполными. Кроме того, для их обработки и подготовки к дальнейшему использованию применяются зачастую не столь эффективные алгоритмы, отсутствуют четкие рекомендации к использованию тех либо иных технологий, подходов и алгоритмов к работе с исходными данными. Новой и отличительной характеристикой проведенного исследования и полученных результатов является рассмотрение всех составных компонент геомеханического моделирования в совокупности и неразрывной связи друг с другом.

В соответствие с этим в работе предлагается *решение* важной и актуальной проблемы, состоящей в разработке общего *комплекса* эффективных автоматизированных компьютерных технологий изучения геомеханических процессов и явлений, и решения сложных прикладных задач.

В соответствие с данной комплексной актуальной задачей современной геомеханики основные *цели выполненных исследований* состояли в создании геомеханических компьютерных моделей массивов горных пород и автоматизации технологий изучения геомеханических процессов и явлений. При этом создаваемые геомеханические модели являются актуальными в режиме реального времени, обладают высокой гибкостью для перестроения при изменении исходных данных, а также учитывают весь имеющийся фактический материал исходных данных для рассматриваемой области горного массива.

Для реализации цели исследований проведена разработка алгоритмов и методик для получения эффективных характеристик массивов горных пород, информации в условиях неполноты исходных данных, данных для различных масштабов моделирования и т.д. Результатом работы также является создание программного комплекса, обеспечивающего реализацию процесса создания автоматизированных технологий изучения геомеханических процессов и явлений и решения прикладных задач, причем, если непосредственно для конечно-элементного моделирования и некоторых видов визуализации использовались готовые решения (пакеты конечно-элементного моделирования, библиотеки работы с графикой), то для всех остальных пунктов процесса произведено ис-

следование возможностей и разработка как алгоритмов, так и непосредственно программного решения. В работе приводится описание каждого модуля программного комплекса, их возможности и эффективность, и примеры решаемых задач. Даются практические рекомендации по применению разработанного прикладного комплекса. Все это в совокупности позволяет удовлетворять современным запросам и требованиям геотехников, геологов, маркшейдеров, проектировщиков, горняков, позволяя получать еще более реальную картину горного массива, а также несмещенные оценки и выводы в значительно более автоматическом режиме.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Активное использование технологий компьютерного моделирования в геомеханике развивается по нескольким направлениям. Наиболее «научоемкими» и имеющими очень широкий спектр приложений представляются такие направления, как *построение трехмерных компьютерных цифровых геомеханических моделей породных массивов*, а также *изучение и прогнозирование физических процессов в массивах горных пород* при воздействии естественных и техногенных источников возмущений.

Построение трехмерной компьютерной (цифровой) геомеханической модели участка породного массива представляет собой нетривиальную очень сложную задачу, что отмечается в современной научно-технической литературе.

При рассмотрении участков инженерно-технического освоения подземного пространства и добычи полезного ископаемого тип последнего и способ его извлечения являются главными факторами, определяющими основные физические процессы, которые необходимо изучать в первую очередь. Так, для углеводородов это, как правило, процессы многофазной подземной фильтрации, а при добыче твердых полезных ископаемых подземным шахтным способом это динамика распределения горного давления, процессы разрушения массивов горных пород в окрестности подземных сооружений и др. Популярность компьютерного моделирования при создании трехмерных моделей породного массива, обусловлена, в частности, появлением новых типов геофизической информации.

Следует подчеркнуть, что цифровые геологические модели и модели для изучения физических процессов в породной толще тесным образом взаимосвязаны. Так, пространственное распределение физических параметров строится на основе структурно-геологической модели. Вместе с тем, при интерпретации результатов моделирования физических процессов очевидным образом проявляются несовпадения результатов моделирования с реальными наблюдениями, что приводит к необходимости уточнения и перестройки геологической модели. Поэтому структурно-геологические модели и модели для изучения геомеханических и связанных с ними физических процессов можно рассматривать как *интеллектуальное ядро моделирования*.

При добыче минеральных ресурсов шахтным способом структурный и функциональный *состав ядра моделирования имеет определенную специфику*, что обусловлено в первую очередь тем, что в процессе эксплуатации таких месторождений приоритетным является моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) породного массива с учетом его структурных и прочностных особенностей, а также технологических схем отработки полезных продуктивных слоев. То есть в этом случае ядро моделирования включает цифровую геологическую модель (ЦГМ) и модели НДС породного массива.

Роль моделирования особенно возрастает в настоящее время, когда условия добычи полезных ископаемых существенно изменяются. Так, все более актуальной является задача изучения и разработки участков породных массивов, находящихся на больших глубинах, со сложными геологическими условиями и т.д. При этом детальной информации о геологическом строении на момент начала разработки, как правило, не существует и в процессе разработки необходимо постоянно уточнять ЦГМ объекта. Прирост минеральной ресурсной базы в настоящее время можно обеспечить только за счет разработки участков породных массивов, которые ранее были отнесены к низко рентабельным (в силу больших глубин залегания полезного пласта, либо сложных геологических условий и т.д.). В качестве примера могут служить новые участки месторождения калийных солей, которые в настоящий момент или в перспективе начинают обрабатывать ОАО «Беларуськалий». Эти участки (Нежинский, Краснослободский, Березовский) характеризуются большими глубинами залегания полезных ископаемых, крутыми углами падения продуктивных слоев, имеются осложнения с обеспечением необходимой водозащитной пачки и др. Как правило, новые участки месторождений полезных ископаемых недостаточно изучены и их геологическое строение постоянно уточняется в процессе разработки.

Поэтому *проблема разработки эффективных автоматизированных компьютерных комплексов и систем* для изучения геомеханических процессов и явлений, решения сложных прикладных задач *является актуальной задачей* на современном этапе развития наук. При этом, одной из приоритетных и первичных задач является разработка процедур расчета эффективных геомеханических характеристик массивов горных пород и построения численных (компьютерных) геомеханических моделей массивов горных пород с учетом нарушений, особенностей породной толщи, а также топологии и параметров выработанного пространства.

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами. Диссертационная работа выполнялась в рамках ГПНИ «Информатика и космос», задание «Разработка научных основ и компьютерных технологий для создания систем мониторинга и оперативного моделирования сопряженных геомеханических и геофильтрационных процессов на основе спутниковой информации с целью повышения эффективности разработки и эксплуатации ме-

сторождений, прогнозирования и предотвращения техногенных катастроф в регионах интенсивного освоения подземного пространства» (№ГР20112598, рук. М.А. Журавков, БГУ, 2011-2015); ГПИИ «Конвергенция», задание «Разработать математические модели и методы решения новых классов краевых задач механики сплошных сред применительно к актуальным современным проблемам науки и техники» (№ГР20113045, рук. М.А. Журавков, БГУ, 2011-2015).

Результаты исследований использовались при выполнении следующих прикладных научно-исследовательских работ:

«Провести исследования, разработать общую компьютерную базу данных горно-геологической, горнотехнической, геофизической информации по Старобинскому месторождению калийных солей и обеспечить ее ведение». №ГР20082799, рук. М.А. Журавков, БГУ, 2008-2009;

«Провести исследования и обеспечить развитие автоматизированной системы геолого-маркшейдерского сопровождения горных работ, разработка новых подсистем и модулей в связи с передачей подсистемы ведения электронных планов горных работ в промышленную эксплуатацию». Договор №ГР20092375, рук. М.А. Журавков, Минск, БГУ, 2009-2011;

«Провести исследования, разработать специализированное программное обеспечение для работы с общей компьютерной базой горно-геологических, геофизических данных по Старобинскому месторождению, создать отдельные модули для решения прикладных задач». №ГР20101459, рук. М.А. Журавков, Минск, БГУ, 2010-2013;

«Выполнить комплексные модельные исследования в рамках организации мониторинга геодинамических процессов, протекающих в приразломных зонах Краснослободского тектонического нарушения». №ГР20112377, рук. М.А. Журавков, Минск, БГУ, 2011-2013;

«Выполнить моделирование и анализ комплексных исследований в рамках мониторинга динамики Северного и Центрального тектонических нарушений с целью изучения влияния горных работ на их активность». №ГР20114263, рук. М.А. Журавков, Минск, БГУ, 2011-2013;

«Выполнить модельные исследования процессов деформирования подрабатываемого массива горных пород и распространения зон нарушения сплошности для условий Петриковского месторождения». №ГР20130070, рук. М.А. Журавков, Минск, БГУ, 2012-2013;

«Провести исследования, обеспечить развитие и разработать новые подсистемы и модули общей корпоративной компьютерной системы геолого-маркшейдерского сопровождения и проектирования горных работ, в связи с расширением функциональности системы, подключением новых задач». №ГР20122010, рук. М.А. Журавков, Минск, БГУ, 2012-2014;

«Изучить напряженно-деформированное состояние труднообрушаемой кровли и нагруженность призабойного пространства в нижних лавах при слоевой выемке Третьего пласта с несущей способностью крепи 400, 600, 800, 1000 и 1200 кН/м², с оставлением и без оставления межпанельных целиков в селек-

тивной лаве № 38-н рудника 2 РУ и валовой лаве № 13-н-2 рудника ЗРУ». №ГР20141698, рук. М.А. Журавков, Минск, БГУ, 2014-2015.

Цель и задачи исследования. Основная цель исследований диссертационной работы состояла в установлении, на основе проведения комплексных исследований, закономерностей для получения эффективных геомеханических характеристик массивов горных пород, определении сложностей и поиске решений при построении численных (компьютерных) геомеханических моделей массивов горных пород с учетом нарушений, особенностей породной толщи, а также топологии и параметров выработанного пространства. Необходимые составляющие компоненты для обеспечения основной цели исследования включают в себя создание и адаптацию соответствующих методик, подходов, процедур и алгоритмов.

В соответствии с основной целью исследований в диссертационной работе решены следующие задачи:

1) исследованы современные подходы при построении конечно-элементных моделей массивов горных пород и получении эффективных геомеханических характеристик массивов горных пород, на основании которых выделены основные сложности при проведении моделирования и получении эффективных характеристик горных пород;

2) для выделенных сложностей при проведении конечно-элементного моделирования и получении эффективных характеристик горных пород предложены соответствующие решения;

3) предложены методики и алгоритмы построения конечно-элементных геологических и геомеханических моделей с учетом наличия структурных особенностей (трещины, флуктуации, разломы, замещения и т.п.); предложенные алгоритмы реализованы в программных модулях для построения соответствующих моделей;

4) разработаны алгоритмы первичной обработки физико-механической информации, восстановления пропущенных данных, расчета эффективных характеристик массивов горных пород с учетом масштабных переходов и эффектов; на основе данных алгоритмов разработаны соответствующие программные модули;

5) предложены и реализованы алгоритмы по верификации конечно-элементных моделей породных массивов;

6) разработан программный комплекс, объединяющий в себе созданные модули хранения, обработки и анализа геомеханической информации, подготовки и построения структурных геологических и геомеханических моделей породных массивов, моделирования и обработки результатов геомеханического моделирования, работающий с широким спектром внешних приложений, в частности, такими, как ГИС «MapManager», Tochnog, Ansys и др.

7) выполнены исследования и проведен анализ современных систем структурированного хранения информации и управления данными, на основе чего осуществлен и обоснован выбор конкретного хранилища геомеханиче-

ской информации; в соответствии с выбранным хранилищем (базой данных) разработана структура хранения информации и выполнена программная реализация схемы хранения информации.

Объектом исследования являются геомеханические параметры горных пород и породных массивов, геомеханические процессы в массивах горных пород с учетом естественных и техногенных факторов влияния.

Предмет исследования – процесс обработки геомеханических данных и построения конечно-элементных геомеханических моделей породных массивов с учетом факторов различной природы и масштабных переходов, разработка автоматизированных компьютерных модулей в соответствии с предложенными алгоритмами.

Научная новизна и значимость полученных результатов состоит в разработке и систематизации комплекса действий при решении сложных прикладных геомеханических задач. В частности, сформулирован и детально исследован в совокупности и в каждой составляющей компоненте комплекс необходимых программных функциональных требований (хранение, первичная обработка, восстановление пропущенных данных, осреднение и оценка значений, масштабный переход, учет структурных особенностей и осложнений, моделирование, верификация, 2D- и 3D-визуализация, анализ, получение результатов, мониторинг и прогнозирование) для успешного выполнения геомеханического моделирования и решения сложных прикладных задач, ориентированных на использование геомеханической информации, как в режиме реального времени, так и на определенный исследуемый момент времени. Рассмотрение и создание такого комплекса в совокупности является главным достоинством и значимостью проведенной работы, поскольку существование разрозненных и отдельных составных частей при решении комплексных прикладных геомеханических задач ведет к сложностям при получении корректной исходной информации, выполнении самого процесса моделирования, корректировке построенных моделей и соответственно приводит к смещенным результатам, выводам и оценкам. В рамках функциональности предложенного программного комплекса, объединяющего в себе процедуры хранения, обработки и анализа геомеханической информации, подготовки и построения структурных геологических и конечно-элементных геомеханических моделей породных массивов, моделирования и обработки результатов геомеханического моделирования выполнены детальные исследования существующих алгоритмов задач каждого составного элемента общего комплекса. В соответствии с этим выработаны свои собственные алгоритмы, либо адаптированы и усовершенствованы с точки зрения функциональности и скорости работы с учетом современных информационных возможностей алгоритмы, предложенные в научно-технической литературе. Предложены подходы к расчету эффективных геомеханических характеристик горных пород, а также построения численных геомеханических моделей массивов горных пород с учетом нарушений, особенностей породной толщи и топологии с учетом параметров вырабо-

танного пространства. В соответствии со сформулированными требованиями и алгоритмами созданы программные модули и в целом прикладной программный комплекс, реализующий заявленную функциональность под единой объединенной оболочкой пользователя с возможностью интегрирования с существующими ГИС- и САПР-пакетами, системами конечно-элементного моделирования.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов заключается в возможности использования результатов исследования при выполнении прикладных научно-исследовательских и проектных работ, инженерных расчетов, что позволяет повысить качество и скорость выполняемых исследований, их эффективность, наглядность получаемых результатов, интегрировать множество отделов в совместную работу в системе и, конечно, сократить затраты на проведение дополнительных исследований и исключить дублирование решения одних и тех же задач в разных отделах.

Результаты исследований возможно использовать при решении ежедневных прикладных задач геологов (масштабные переходы при рассмотрении глобальной модели месторождения и локальных участков, построение геоклонов, комбинированных геоклонок, построение профиля по произвольной трассе в 2D и 3D и т.д.), проектировщиков (проектирование и планирование горных работ в соответствии с наглядной комплексной трехмерной моделью месторождения, выбор главного направления, направлений и т.д.), горняков (определение мест установки и шага установки крепи на выбранной глубине в соответствие с построенными полями распределения физико-механических значений и др.) и т.д.

Результаты исследований могут быть использованы при чтении специальных курсов студентам факультетов геомеханического и механико-математического профиля, студентам специализаций, связанных с компьютерным моделированием геомеханических процессов, горной механики, геофизики и геологии.

Новыми результатами, выносимыми на защиту, являются:

1. Комплекс подходов, методик для эффективных автоматизированных компьютерных технологий изучения геомеханических процессов и явлений, построения конечно-элементных моделей породных массивов с учетом структурных особенностей, наличия особых зон и подземных выработок, и решения сложных прикладных задач.
2. Подходы к получению эффективных геомеханических характеристик породных массивов, верификации конечно-элементных геомеханических цифровых моделей породных массивов, построению геомеханических моделей породных массивов различных масштабных уровней.
3. Полученные результаты решения прикладных задач при использовании предложенных подходов, методик, процедур и алгоритмов.

Личный вклад соискателя. Представленные в работе новые научные результаты получены автором лично. Научный руководитель М.А. Журавков

принимал участие в постановке задач и обсуждении полученных результатов. Результаты, принадлежащие соавторам совместных научных исследований, не вошли в данную диссертационную работу.

Апробация результатов диссертации. Материалы диссертации докладывались на следующих международных и республиканских научных конференциях: 2-я Международная научно-техническая конференция «Горная геология, геомеханика и маркшейдерия» (Донецк, Украина, 2009), Международный форум-конкурс молодых ученых «Проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, Россия, 2010, 2011), IV International Geomechanics Conference «Theory and practice of geomechanics for effectiveness the mining production and construction» (Varna, Bulgaria, 2010), VI Международный симпозиум по трибофатике (Минск, Беларусь, 2010), 11-th International multidisciplinary scientific geoconference and expo SGEM 2011 (Albena, Bulgaria, 2011), XX International symposium on mine planning and equipment selection «MPES 2011» (Almaty, Kazakhstan, 2011), V International Geomechanics Conference «Theory and practice of geomechanics for effectiveness the mining production and construction» (Varna, Bulgaria, 2012), Моделирование и компьютеринг в механических и мехатронных системах (Минск, Беларусь, 2012, 2013), XX Всероссийская конференция с участием иностранных ученых «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» (Новосибирск, Россия, 2013), VI International Geomechanics Conference «Theory and practice of geomechanics for effectiveness the mining production and construction» (Varna, Bulgaria, 2014).

Опубликованность результатов. Основные положения диссертации опубликованы в 21 работе, в том числе 9 статей в научных журналах согласно перечню ВАК (1,15 авторского листа), 2 статьи в научных журналах и сборниках научных трудов, 10 статей в материалах конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав основного текста, заключения, списка использованных источников, публикаций соискателя и приложения. Объем рукописи составляет 155 страниц, включая 140 страниц основного текста, 112 иллюстраций на 37 страницах, 8 таблиц на 2 страницах, список библиографических источников из 102 наименований на 8 страницах, список публикаций соискателя на 3 страницах, 1 приложение на 4 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе рассматривается базовая компонента успешного геомеханического моделирования – корректная информационная основа. Непосредственно уделяется внимание особенностям подготовки и обработки, хранения и использования геоданных для построения компьютерных структурных геологических и геомеханических моделей. В качестве средства для обеспечения хранения и безопасности сохранности первичных и полученных в результате определенных вычислений горно-геологических и горнотехнических данных рассматриваются современные возможности баз данных и систем управления базами данных [1, 2, 12, 13, 17]. В главе выполнен анализ и сравнение имею-

щихся промышленных решений для хранения информации и осуществлен аргументированный выбор конкретной базы данных и системы управления для нее. Уделено внимание проектированию логических существенных структур для хранения горно-геологической и горнотехнической информации. На основании изучения и анализа совокупности задач, составляющих систему геомеханического обеспечения горных работ, выделены основные компоненты исходной информации.

Также в данной главе сформулированы основные функциональные требования и необходимые возможности прикладного обеспечения для геомеханического моделирования, на основании которых в последующих главах предложены алгоритмы и разработаны программные решения для большинства из рассмотренных функциональных требований.

В главе даны рекомендации по первоначальной обработке и визуализации исходной информации (этап контроля качества первичных "сырых" данных), которые необходимо использовать на этапе предварительного контроля данных, еще до их непосредственного поступления в программное хранилище. Данный подход позволяет избежать лишних действий по проверке корректности информации непосредственно в хранилище, что уменьшает и временные затраты, и избавляет от хранения некорректных данных. Каждая из проверок первичных данных реализована в разработанном программном комплексе. В рамках первоначальной обработки первичной информации рассмотрены возможности по сравнению средних величин и дисперсий при сравнении экспериментальных результатов различных серий (выборок), определению надежности и представительности средних значений для серий измерений и показаны возможности по вычислению погрешностей и определению надежности использования средних значений выборок для корректного вычисления количественных характеристик показателей свойств горных пород [17, 18].

Во второй главе содержится описание и реализация программных компонент общего разработанного программного комплекса по анализу и обработке физико-механических характеристик горных пород и массивов, используемых для построения геомеханических моделей. В главе рассматривается различные аспекты общей проблемы анализа и обработки массивов данных исходной информации физико-механических параметров горных пород. Выделяется важная особенность массивов горных пород в отношении оценивающих их показателей – неоднородность. Описываются разработанные оригинальные и адаптированные алгоритмы обработки физико-механических и других сопутствующих характеристик горных пород и массивов применительно к пластовым месторождениям полезных ископаемых [2, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

Так, *рассмотрен алгоритм*, позволяющий определять влияние литологических компонент на определенные физико-механические и химические параметры горных пород. Алгоритм включает в себя последовательность выполнения следующих этапов:

1) расчет процентного содержания выбранного литологического описания горных пород на каждом из совокупности интервалов в рамках всей глубины скважины (т.е. определяется набор интервалов с фиксированным значением шага, который задается и регулируется при помощи соответствующего поля программного модуля вдоль всей скважины и вычисление для каждого из таких интервалов значений рассматриваемой характеристики);

2) выбор значений определенного физико-механического или химического параметра вдоль всей глубины скважины;

3) масштабирование двух наборов значений, полученных на первом и втором этапах алгоритма на одну шкалу измерений при помощи совмещения максимальных значений для первого и второго этапов как совпадающих значений в новых условных единицах измерения и дальнейшим переводом всех значений первого и второго этапа в новые единицы измерения относительно соответствующих максимальных значений каждого из этапов;

4) совмещение получаемых результатов на одном графическом представлении, определение зависимости или независимости рассматриваемых характеристик, где зависимые в той или иной мере физико-механические и химические характеристики от литологического описания проявляются через превышение значений содержания в новых условных единицах, получаемых на третьем шаге алгоритма, выбранной литологической единицы описания над значениями выбранной физико-механической или химической характеристики вдоль глубины скважины (пример графического представления приведен на рисунках 1 и 2, где красным цветом отображено содержание литологической компоненты вдоль всей скважины с выбранным интервальным шагом, а зеленым – физико-механический (или химический) параметр, и, очевидно, из приведенных графических представлений, что рассматриваемые характеристики зависят).

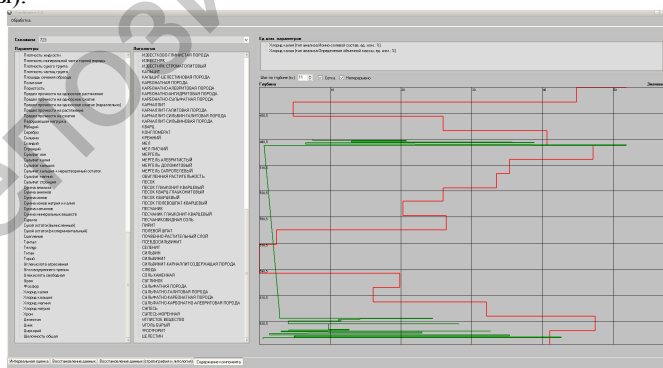


Рисунок 1. – Интерфейс модуля содержание компонента

$$\gamma_j(x_{kj}) = \begin{cases} \frac{1}{x_{kj}}, & \text{при } x_{kj} > 0 \\ 0, & \text{при } x_{kj} = 0 \end{cases} \quad \forall j, J_{нз} - \text{множество столбцов с пропущенными} -$$

ными данными, J_3 – множество столбцов, элементы которых заполнены полнотью.

Детальная поэтапная последовательность алгоритма приводится в диссертационной работе. Пример проведенной процедуры восстановления данных для параметров «предел прочности на одноосное растяжение» и «предел прочности на одноосное сжатие» приведен на рисунках 3 и 4. Рассматривается случай, когда в исходных данных пропущены значения предела прочности на одноосное сжатие для глубин 598.6–599.2 м. Результатом восстановления параметра является значение 72.06, причем реальное значение на этом интервале составляет 71.63, что весьма показательно с точки зрения корректности и адекватности процедуры восстановления.

Следующий из предложенных алгоритмов заключается в рассмотрении литологической и стратиграфической однородности как компоненты восстановления, т.е. определения значений физико-механических и геофизических параметров горных пород и структур по данным близлежащих скважин на основании литологического и стратиграфического описаний. Алгоритм предусматривает наличие структурированной литологической и стратиграфической информации для определенной скважины (назовем ее №1), но при этом отсутствие (или не полное определение) для нее физико-механических и геофизических параметров. Вместе с тем, известны физико-механические и геофизические параметры по скважинам, близлежащим к скважине №1. На основании имеющейся информации по близлежащим скважинам возможно выполнение процесса определения физико-механической и геофизической информации для скважины №1. Для этого используются значения соответствующих параметров близлежащих скважин в рамках идентичных литологической и стратиграфической характеристик.

Опишем предлагаемую процедуру восстановления данных для скважины №1. Собственно компоненты для замещения рассчитываются по формуле:

$$k_i = \frac{\sum_{j=1}^n p_j x_{ij}}{m}, \quad i = \overline{1, m}, \quad \text{где } j - \text{индекс идентичного описания на множестве}$$

рассматриваемых скважин; i – индекс описания рассматриваемых компонент (напр. глина, песок и др.); p_j – коэффициент, определяющий вклад каждой j -й компоненты (весовой коэффициент); x_{ij} – значение физико-механической характеристики; m – суммарный вес всех компонент, участвующих в расчете; k_i – компонента, которая будет использоваться для заполнения значений скважины №1. Важным при выборке x_{ij} является то, что при расчетах исполь-

зуются не все исходные значения x_{ij} , а лишь те, которые удовлетворяют заданному критерию статистической проверки данных (например, критерий Шовене, критерий Стьюдента и др.).

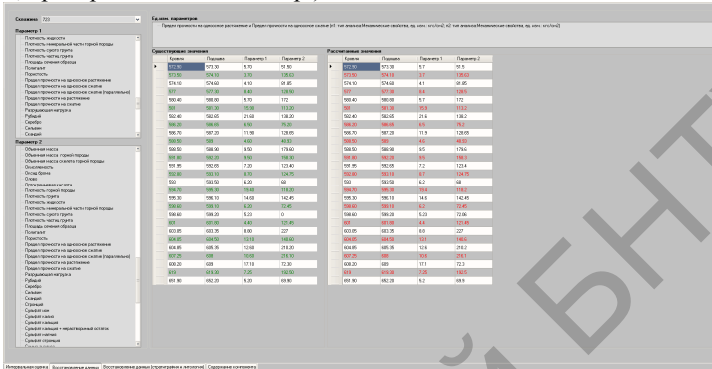


Рисунок 3. – Интерфейс пользователя модуля восстановления данных

С восстановленные значения				Исходные значения			
Критерий	Параметр	Параметр 1	Параметр 2	Критерий	Параметр	Параметр 1	Параметр 2
572.90	573.30	51.50	5.70	572.90	573.30	51.5	5.7
573.50	574.10	135.63	3.70	573.50	574.10	135.63	3.7
574.10	574.60	81.85	4.10	574.10	574.60	81.85	4.1
577	577.30	128.50	8.40	577	577.30	128.5	8.4
580.40	580.80	172	5.70	580.40	580.80	172	5.7
581	581.30	113.20	15.30	581	581.30	113.2	15.3
582.40	582.65	138.20	21.60	582.40	582.65	138.2	21.6
585.20	585.65	75.20	6.50	585.20	585.65	75.2	6.5
586.70	587.20	128.65	11.80	586.70	587.20	128.65	11.8
588.50	589	43.30	4.6	588.50	589	43.33	4.6
588.90	588.90	179.60	9.50	588.90	588.90	179.6	9.5
591.80	592.20	158.30	9.50	591.80	592.20	158.3	9.5
591.95	592.65	123.40	7.20	591.95	592.65	123.4	7.2
592.80	593.10	124.75	6.20	592.80	593.10	124.75	6.2
593	593.50	68	6.20	593	593.50	68	6.2
594.70	595.30	119.20	19.40	594.70	595.30	119.2	19.4
595.30	596.10	142.45	14.6	595.30	596.10	142.45	14.6
596.60	595.20	0	5.23	596.60	595.20	72.96	5.23
596.70	597.20	128.65	11.80	596.70	597.20	128.65	11.8
598	599.10	72.45	6.2	598	599.10	72.45	6.2
601	601.60	121.45	4.4	601	601.60	121.45	4.4
603.05	603.95	227	8.80	603.05	603.95	227	8.8
604.05	604.50	140.60	13.10	604.05	604.50	140.6	13.1
604.95	605.35	210.20	12.60	604.95	605.35	210.2	12.6
607.25	608	216.10	10.60	607.25	608	216.1	10.6
608.20	609	72.30	17.10	608.20	609	72.3	17.1
619	619.30	192.50	7.25	619	619.30	192.5	7.25
651.90	652.20	69.90	5.20	651.90	652.20	69.9	5.2

595.30	596.10	142.45	14.60	595.30	596.10	142.45	14.6
598.60	599.20	0	5.23	598.60	599.20	72.06	5.23
598.60	599.10	72.45	6.20	598.60	599.10	72.45	6.2

Рисунок 4. – Результат работы модуля восстановления данных

На рисунках 5 и 6 приведены примеры результатов восстановления данных по пределу прочности на одноосное сжатие для определенной скважины. Интервал значений (по глубине) по этому физико-механическому параметру в рамках данной скважины в результате вычислений был значительно расширен с интервала 572.9–652.2м. до интервала 492.53–663.6м. То есть первоначальный интервал известных значений увеличен более, чем в 2 раза.

Секционные значения			Расчетные значения		
Глубина	Плотность	Давление	Глубина	Плотность	Давление
102,00	171,30	111,00	102,00	162,80	110,20
102,50	174,10	116,61	102,50	165,0	110,20
103,00	174,40	117,46	103,00	166,5	110,20
103,50	177,30	120,90	103,50	169,4	110,20
104,00	180,00	123,00	104,00	170,5	110,20
104,50	180,30	123,30	104,50	170,9	110,20
105,00	182,40	126,20	105,00	171,6	111,13
105,50	184,00	128,00	105,50	172,0	111,13
106,00	186,70	130,90	106,00	173,2	111,13
106,50	188,00	132,00	106,50	173,5	111,13
107,00	190,00	135,00	107,00	174,4	111,13
107,50	192,00	138,00	107,50	174,4	111,13
108,00	192,00	138,00	108,00	174,4	111,13
108,50	192,00	138,00	108,50	174,4	111,13
109,00	192,00	138,00	109,00	174,4	111,13
109,50	192,00	138,00	109,50	174,4	111,13
110,00	192,00	138,00	110,00	174,4	111,13
110,50	192,00	138,00	110,50	174,4	111,13
111,00	192,00	138,00	111,00	174,4	111,13
111,50	192,00	138,00	111,50	174,4	111,13
112,00	192,00	138,00	112,00	174,4	111,13
112,50	192,00	138,00	112,50	174,4	111,13
113,00	192,00	138,00	113,00	174,4	111,13
113,50	192,00	138,00	113,50	174,4	111,13
114,00	192,00	138,00	114,00	174,4	111,13
114,50	192,00	138,00	114,50	174,4	111,13
115,00	192,00	138,00	115,00	174,4	111,13
115,50	192,00	138,00	115,50	174,4	111,13
116,00	192,00	138,00	116,00	174,4	111,13
116,50	192,00	138,00	116,50	174,4	111,13
117,00	192,00	138,00	117,00	174,4	111,13
117,50	192,00	138,00	117,50	174,4	111,13
118,00	192,00	138,00	118,00	174,4	111,13
118,50	192,00	138,00	118,50	174,4	111,13
119,00	192,00	138,00	119,00	174,4	111,13
119,50	192,00	138,00	119,50	174,4	111,13
120,00	192,00	138,00	120,00	174,4	111,13

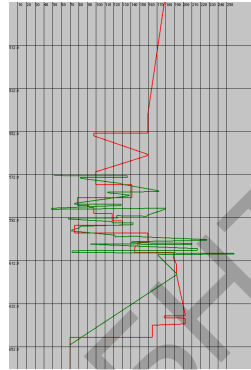


Рисунок 5. – Результат работы модуля по восстановлению данных (стратиграфия и литология), табличное и графическое отображение

Верификация корректности полученных расчетных данных была выполнена на основе использования полученных впоследствии («доисследованных») данных. На рисунке 6 приведены результаты сравнения вычисленных и реальных «доисследованных» значений на одной из скважин. В графе 14 геokolонки сплошной линией отображены реальные значения, а пунктирной – расчетные. Результаты сравнения вычисленных, согласно разработанной процедуре, и реальных значений, полученных экспериментально, позволяют говорить о высокой точности и достаточной степени надежности определения рассчитываемых результатов.

Далее в главе описан алгоритм, предназначенный для расчета эффективных характеристик массивов горных пород на основе построения интервалов («вилкок»), в пределах которых находятся истинные значения характеристик. В диссертации разработаны программные процедуры определения эффективных характеристик породных массивов блочно-слоистой структуры при использовании подходов Фойгта-Рейса и принципа Хашина-Штрикмана. Пример результатов вычислений приведен на рисунке 7.

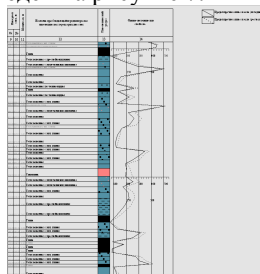


Рисунок 6. – Совмещенное представление рассчитанных и реальных значений физико-механического параметра

<i>Отчет</i>			
Результаты округления:			
По Хашику-Штракману:			
8.87E+08	≤	Модуль сдвига	≤ 8.90E+08
1.02E+09	≤	Коэффициент объемного расширения	≤ 1.02E+09
2.05E+09	≤	Модуль Юнга	≤ 2.08E+09
0.16	≤	Коэффициент Пуассона	≤ 0.164
По Файтсу-Рейсу:			
8.77E+08	≤	Модуль сдвига	≤ 9.01E+08
9.88E+08	≤	Коэффициент объемного расширения	≤ 1.04E+09
1.93E+09	≤	Модуль Юнга	≤ 2.20E+09
0.144	≤	Коэффициент Пуассона	≤ 0.179

Рисунок 7. – Результат расчета эффективных характеристик

И, наконец, в данной главе приводятся *процедуры учета масштабного фактора* при переходе от значений физико-механических параметров образцов к массивам.

В третьей главе приводится описание основных элементов общей процедуры построения конечно-элементных геомеханических моделей массивов с учетом баз данных исходной информации. Выделены основные группы источников информации для построения конечно-элементных моделей массивов горных пород, среди которых: геологические данные разведочных скважин, структурные карты основных стратиграфических горизонтов, данные по физико-механическим свойствам составляющих пород, цифровые планы горных работ, данные скважин подземного бурения, данные замеров мощностей. Рассмотрены особенности и алгоритмы построения конечно-элементных моделей массивов горных пород в областях наличия особых зон (в окрестности макротрещин и разломов) [3, 6, 7, 10, 11, 19, 21]. Разработанный алгоритм построения конечно-элементной модели породной толщи в районе разлома включает процедуры:

1. Построение согласованной структурной модели на основе сейсмических данных (пример на рисунке 8).

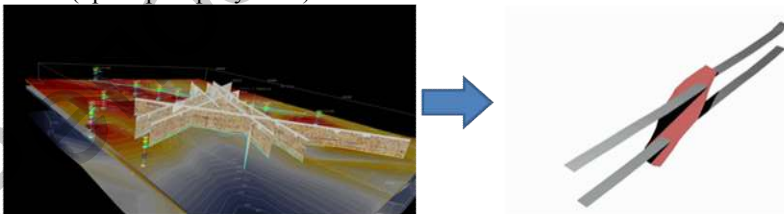


Рисунок 8. – Построение согласованной структурной модели

2. Построение конечно-элементной модели на основе структурной модели (показано, что для моделирования возможности скольжения в области разлома лучше использовать сетку из треугольных призм, чем октаэдральную, которая не приспособлена для моделирования процесса скольжения), рисунок 9. Также важным является факт реализации процесса «склейки» вершин, т.е. создания

«двойников» узлов для поверхности скольжения, обеспечивающих получение двух поверхностей на разломе.

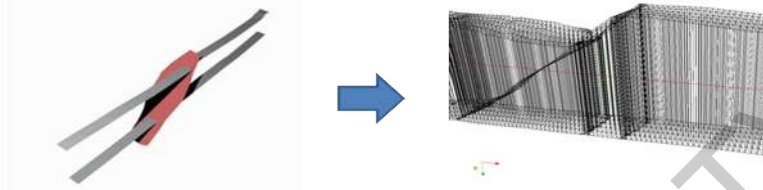


Рисунок 9. – Построение конечно-элементной модели

3) Добавление к модели верхнего и нижнего слоя конечных элементов для корректного задания граничных условий (рисунок 10).

В главе приведены примеры реализации предложенных методик и алгоритмов для конкретных участков Старобинского месторождения калийных солей.



Рисунок 10. – Конечно-элементная модель, пригодная для геомеханического моделирования в районе разлома

В данной главе кроме того рассматриваются методики верификации конечно-элементных моделей, в частности:

1) определение граничных условий и ориентации массива горных пород с использованием данных натурных исследований по деформациям (метод позволяет интегрально учесть совокупность экспериментальных данных);

2) оценка вариации внешних нагрузок (определение внешних нагрузок по данным скважинных измерений относительных смещений стенок скважины в неоднородной среде).

Для первой из упомянутых методик, в соответствии с подходом, предложенным в работе (Назаров, Л. А. Определение полей напряжений и деформаций в породном массиве на основе решения обратных задач / Л. А. Назаров, Л. А. Назарова, Э. П. Шурина // ФТПРПИ. – 2001. – №1. – С. 41-49), разработан алгоритм и его программная реализация, позволяющие наиболее оптимальным образом построить граничные условия и выполнить ориентацию области породной толщи так, чтобы при известных физических свойствах среды на глубине h поле деформаций коррелировало (наилучшим образом было сопоставимо) с экспериментальными данными. В диссертации приведены при-

меры выполненных расчетов с реальными физико-механическими параметрами для массивов горных пород Старобинского месторождения.

Схема реализации второй из упомянутых методик приведена на рисунке 11. Данный подход позволяет найти вариацию внешних нагрузок и, следовательно, как предупреждать об изменении напряженно-деформированного состояния изучаемого участка массива горных пород, так и осуществлять изменение конечно-элементной модели рассматриваемого участка. В главе приведен пример полного решения прикладной задачи в соответствии с данной методикой.

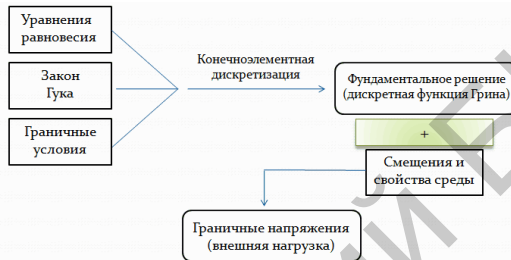


Рисунок 11. – Общая схема верификации для оценки вариации внешних нагрузок

В четвертой главе поэтапно описан и проведен процесс построения конечно-элементных моделей массивов горных пород различного масштаба, с учетом различных структурных особенностей [3, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 19, 20, 21]. В результате построены несколько крупномасштабных и локальных моделей массивов горных пород. На основании проведенного моделирования и полученных результатов сделаны практические выводы, показывающие возможности, актуальность и необходимость использования полноценного конечно-элементного моделирования при исследовании горных пород, для безопасного ведения горных работ и добычи полезных ископаемых, а также решения задач геомеханики.

В главе подробно рассмотрены составные элементы разработанного прикладного программного комплекса для обработки, хранения и работы с геоданными и геомеханической информацией, и построению компьютерных геомеханических моделей областей породного массива. Описана основная функциональность и элементы данного комплекса: загрузчик-обработчик исходной информации, визуализатор и модуль управления исходной информацией, модуль восстановления пропущенных значений, модуль расчета эффективных характеристик массивов горных пород, модуль поиска корреляций, модуль построения глубинных полей распределения для выбранного специалистом параметра, модуль триангуляции и объединения поверхностей, модуль трехмерной визуализации и построения профилей, модуль экспорта геометрии и соответствующих физико-механических параметров для конечно-элементного моделирования. Особое внимание уделено модулю построения глубинных

полей распределения химических и физико-механических параметров, который представляет собой очень важный с прикладной точки зрения и дающий значительный эффект при использовании модуль, в частности, для определения мест и шага установки крепи. Его основная задача заключается в построении полной таблицы исходной информации (вычисление пропущенных данных в первоначальной таблице исходной информации) по множеству заранее определенных скважин детальной разведки путем поиска эквивалентностей, на основе методик восстановления пропущенных значений, расчета эффективных характеристик породных массивов и поиска корреляций для каждой скважины детальной разведки с пропусками и формирования в соответствии с положением скважин и выбранными глубинами новых структурированных данных для выбранного параметра с последующей возможностью построения полей распределения значений. Схема работы модуля представлена на рисунке 12.

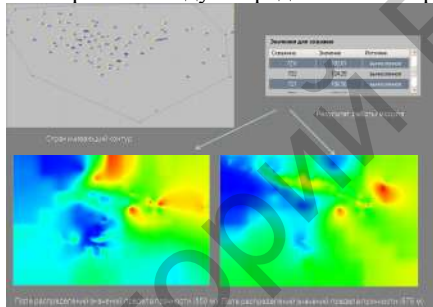


Рисунок 12. – Схема работы модуля построения глубинных полей распределения параметров и характеристик массивов горных пород

В этой главе также содержатся примеры интеграции разработанного комплекса с ГИС «MapManager», конечно-элементными пакетами *Tochnog*, *Ansys*. В качестве примера взаимодействия с ГИС «MapManager» и решения прикладных задач описано решение задачи получения полей распределения значений физико-механических параметров по глубине с последующим построением полноразмерной трехмерной модели. Графическое отображение результата приведено на рисунке 13.

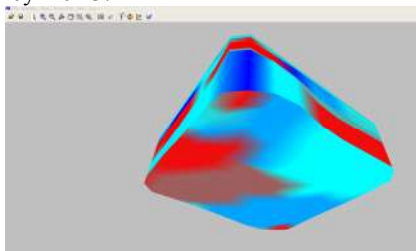


Рисунок 13. – Распределение предела прочности по глубине

Взаимодействие с конечно-элементными пакетами *Tochnog*, *Ansys* базируется на использовании построенной структурной компьютерной модели (подготовка входных файлов с геометрией и физико-механическими характеристиками) для дальнейшего конечно-элементного моделирования и решения задач геомеханики. В результате большого количества численных экспериментов установлено, что применительно к массивам калийных пород, с достаточной для прикладного использования точностью, для описания поведения массива можно использовать модель трансверсально-изотропного вязкоупругого деформируемого твердого тела. В этом случае состояние массива горных пород определяется заданием пяти констант: $E_p, \nu_p, E_{pz}, \nu_{pz}, G_{zp}$, где E_p, ν_p – модуль Юнга и коэффициент Пуассона в горизонтальной плоскости (или плоскости изотропии), а E_z, ν_{zp}, G_{zp} – модуль Юнга, коэффициент Пуассона и модуль сдвига в вертикальном направлении.

Построение конечно-элементных геомеханических моделей породных массивов выполняется на основе описанной механико-математической модели поведения среды с учетом особенностей строения исследуемого участка массива и топологии выработанного пространства. При этом, в зависимости от масштабности модели выбирается тот или иной подход обработки физико-механических данных. Пример подготовленной крупномасштабной конечно-элементной модели с выработанным пространством в области разлома приведен на рисунке 14.

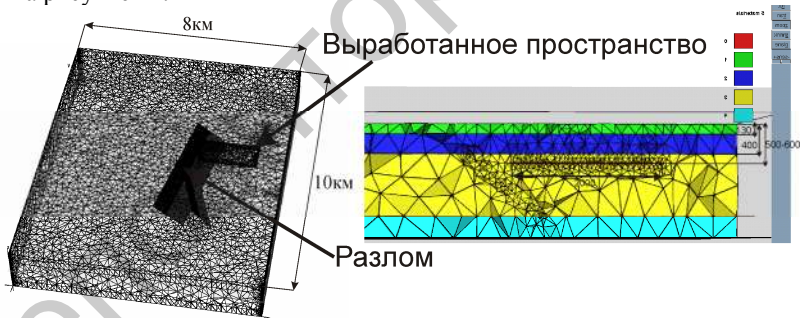


Рисунок 14. – Конечно-элементная модель массива с выработанным пространством в области разлома

Таким образом, в главе объединяются все предложенные в рамках диссертационной работы разработки с непосредственным применением их на практике с конкретными примерами, демонстрируя при этом преимущества использования разработанного программного комплекса сбора, обработки, хранения и анализа геомеханической информации, ее подготовки для построения геомеханической модели массивов горных пород и непосредственного построения конечно-элементной геомеханической модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты. В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

1. В соответствии с концепцией рассмотрения всех составных компонент геомеханического моделирования в совокупности и неразрывной связи друг с другом, осуществлено решение важной и актуальной проблемы, состоящей в разработке общего комплекса эффективных автоматизированных компьютерных технологий изучения геомеханических процессов и явлений [1, 2, 12, 13, 14].

2. Исследованы и обобщены современные подходы при построении конечно-элементных моделей массивов горных пород [3, 6] и получении эффективных геомеханических характеристик массивов горных пород [2, 13, 16, 17], на основании которых выделены основные сложности при проведении моделирования и получении эффективных характеристик горных пород, для которых предложены решения, *позволяющие* успешно осуществлять геомеханическое моделирование и *определять* эффективные характеристики горных пород [7, 8, 9, 10, 11, 13, 15, 16, 17, 18].

3. Сформулирован и детально исследован в совокупности и в каждой составляющей компоненте комплекс необходимых функциональных требований (хранение, первичная обработка, восстановление пропущенных данных, осреднение и оценка значений, масштабный переход, учет структурных особенностей и осложнений, моделирование, верификация, 2D- и 3D-визуализация, анализ, получение результатов, мониторинг и прогнозирование) *обеспечивающий* успешное выполнение геомеханического моделирования и решение сложных прикладных задач, ориентированных на использование геомеханической информации, и *позволяющий* проводить геомеханическое моделирование как в режиме реального времени, так и на определенный исследуемый момент времени [1, 2, 4, 5, 7, 19, 20, 21].

4. В рамках функциональных возможностей предложенного комплекса, *отличающегося* объединением и интеграцией в себе процедур хранения, обработки и анализа геомеханической информации, подготовки и построения структурных геологических и конечно-элементных геомеханических моделей породных массивов, моделирования и обработки результатов геомеханического моделирования, выполнены детальные исследования назначения и необходимых возможностей составных элементов общего комплекса. В соответствии с этим выработаны свои собственные подходы, либо адаптированы и усовершенствованы с точки зрения функциональности и скорости работы с учетом современных информационных возможностей алгоритмы, предложенные в научно-технической литературе [2, 13, 16, 17].

5. В соответствии со сформулированными требованиями создан прикладной комплекс, имеющий модульную структуру, *реализующий* заявленную функциональность под единой объединенной оболочкой управления с воз-

возможностью интеграции с существующими ГИС- и САПР-пакетами, системами конечно-элементного моделирования.

6. Проведено решение важных прикладных задач, таких как построение крупномасштабных и локальных конечно-элементных моделей разрабатываемых участков месторождения полезного ископаемого с учетом влияния различных факторов, осложняющих проведение моделирования [3, 7, 9, 20, 21]; построение полей распределений физико-механических параметров на определенной глубине для выбора места и шага установки крепи; проведение верификации построенных конечно-элементных геомеханических моделей на основании новых измеряемых и получаемых данных и др. с использованием предложенных подходов, методик, процедур и алгоритмов, *показана* эффективность использования разработанного комплекса.

7. Элементы созданного комплекса сбора, обработки, хранения и анализа геомеханической информации, ее подготовки для построения геомеханических моделей массивов горных пород и непосредственно построения конечно-элементных геомеханических моделей использованы при выполнении новых прикладных исследований для ОАО «Беларуськалий».

Рекомендации по практическому использованию результатов в диссертации.

Полученные в рамках диссертационной работы результаты могут быть использованы в работе предприятий и учреждений, связанных с горнодобывающей деятельностью. Результаты исследований возможно использовать при решении текущих прикладных задач геологов (масштабные переходы при рассмотрении глобальной модели месторождения и локальных участков, построение геоколонок, комбинированных геоколонок, построение профиля по произвольной трассе в 2D и 3D и т.д.); проектировщиков (проектирование и планирование горных работ в соответствии с наглядной комплексной трехмерной моделью месторождения, выбор главного направления, иных направлений и т.д.); горняков (определение мест установки и шага установки крепи на выбранной глубине в соответствии с построенными полями распределения физико-механических значений и др.) и т.д.

Результаты исследований могут быть использованы при чтении специальных курсов студентам факультетов горного, геомеханического и механико-математического профиля, студентам специализаций, связанных с компьютерным моделированием геомеханических процессов, горной механики, геофизики и геологии.

Научные результаты диссертации используются в учебном процессе Белорусского государственного университета при чтении специальных курсов студентам специальностей «Механика и математическое моделирование» механико-математического факультета и «География (геоинформационные системы)» географического факультета. Результаты научных исследований были использованы при выполнении научно-исследовательских прикладных дого-

воров для ОАО «Беларуськалий», ОАО «Белгорхимпром», ЗАО «СИПРсОП» [Приложение А].

Систематизированные материалы исследований включены в базу данных «Вещественный состав пород и руд» (свидетельство о регистрации № 1381101803).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных рецензируемых журналах

1. Журавков, М. А. Информационные базы данных корпоративной системы геомеханического мониторинга как основа для моделирования геомеханических процессов / М. А. Журавков, О. Л. Коновалов, С. С. Хвесеня // Геоинформатика. – 2009. – № 4. – С. 35-42.

2. Журавков, М. А. Подготовка базы данных физико-механических характеристик для построения конечно-элементных моделей породной толщи / М. А. Журавков, О. Л. Коновалов, С. С. Хвесеня // Горная механика. – 2009. – № 4. – С. 15-27.

3. Журавков, М. А. Построение интегрированных конечно-элементных моделей массивов горных пород и подходы к их верификации / М. А. Журавков, О. Л. Коновалов, С. С. Хвесеня // Горная механика и машиностроение – 2010. – № 3. – С. 27-40.

4. Журавков, М. А. Основные требования к построению цифровой геологической модели породного массива / М. А. Журавков, О. Л. Коновалов, А. В. Круподеров, С. С. Хвесеня // Известия вузов. Горный журнал. – 2014. – № 2. – С. 56-62.

5. Журавков, М. А. Исходные данные для построения цифровой геологической модели породного массива / М. А. Журавков, О. Л. Коновалов, А. В. Круподеров, С. С. Хвесеня // Известия вузов. Горный журнал. – 2014. – № 3. – С. 40-47.

6. Журавков, М. А. Основные этапы построения компьютерной модели породной толщи / М. А. Журавков, О. Л. Коновалов, А. В. Круподеров, С. С. Хвесеня // Известия вузов. Горный журнал. – 2014. – № 4. – С. 75-81.

7. Журавков, М. А. Примеры цифровых трехмерных геологических моделей породных массивов с нарушениями / М. А. Журавков, О. Л. Коновалов, А. В. Круподеров, С. С. Хвесеня // Известия вузов. Горный журнал. – 2014. – № 5. – С. 56 – 62.

8. Журавков, М. А. Основные моменты математического моделирования для исследования НДС массивов горных пород / М. А. Журавков, О. Л. Коновалов, А. В. Круподеров, С. С. Хвесеня // Известия вузов. Горный журнал. – 2014. – № 7. – С. 67 – 73.

9. Журавков, М. А. Использование компьютерного моделирования на конкретных участках отработки полезных ископаемых на основе построенных трехмерных геомеханических моделей породного массива / М. А. Журавков, О. Л. Коновалов, А. В. Круподеров, С. С. Хвесеня // Известия вузов. Горный журнал. – 2014. – № 8. – С. 62 – 70.

Статьи в научных журналах и сборниках научных трудов

10. Журавков, М. А. Построение моделей для исследования сопряженных гидрогеомеханических процессов с учетом неоднородности среды / М. А. Журавков, О. Л. Коновалов, А. В. Круподеров, С. С. Хвесеня // Теоретическая и прикладная механика: международный научно-технический сборник. Выпуск 27 / Белорусский национальный технический университет; редкол.: А. В. Чигарев (гл. ред.) [и др.]. Минск, 2012. – С. 111-116.

11. Журавков, М. А. Естественное напряженное состояние горного массива вблизи сочленения Кривичского и Листопадовичского тектонических нарушений / М.А. Журавков, О.Л. Коновалов, А.В. Круподеров, С.С. Хвесеня // Теоретическая и прикладная механика: международный научно-технический сборник. Выпуск 28 / Белорусский национальный технический университет; редкол.: А. В. Чигарев (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2013. – С. 52-58.

Материалы конференций

12. Журавков, М. А. Создание и работа с корпоративными базами данных горно-геологической и горнотехнической информации по Старобинскому месторождению калийных солей / М. А. Журавков, О. Л. Коновалов, Д. В. Барбиков, С. И. Славашевич, А. А. Войтик, А. В. Шашевский, С. С. Хвесеня // Наукові праці УкрНДМІ : сборник трудов 2-й Международной научно-технической конференции «Горная геология, геомеханика и маркшейдерия», посвященной 80-летию УкрНИМИ, Донецк, Украина, 6-8 октября 2009 г. / УкрНими, редкол.: А.В. Анциферов (отв. редактор) [и др.]. – Донецк, 2009. – Ч.1. – С. 144-149.

13. Журавков, М. А. Подготовка базы данных физико-механических характеристик для моделирования геомеханических процессов/ М.А. Журавков, О.Л. Коновалов, С.С. Хвесеня // Рабочие материалы международного форумаконкурса молодых ученых «Проблемы недропользования», Санкт-Петербург, Россия, 21-23 апреля 2010 г. / Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г. В. Плеханова (технический университет); Л.С. Синьков (пред.) [и др.]. – СПб., 2010. – С. 158-160.

14. Zhuravkov, M. A. Geomechanical monitoring data as a basis for geomechanical processes modeling [Электронный ресурс] / М. А. Zhuravkov, S. S. Hvesenya // Proc. of IV International Geomechanics Conference, Varna, Bulgaria, 3-6 June, 2010 / Scientific and technical union of mining, geology and metallurgy; ed. Nikolai Nikolaev (chairman) [and others]. – Varna, 2010. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

15. Zhuravkov, M. A. Databases of geomechanical monitoring as a basis for geomechanical processes modeling/ М. А. Zhuravkov, S. S. Hvesenya // Труды VI Международного симпозиума по трибофатике МСТФ 2010, Минск, Беларусь, 25 октября – 1 ноября 2010 г. : в 2 т. / Белорусский государственный университет; редкол.: М. А. Журавков (пред.) [и др.]. – Минск, 2010. – Т. 2. – С. 263-267.

16. Журавков, М. А. Расчет физико-механических характеристик горных пород на основе сопутствующих геологических данных/ М. А. Журавков, С. С. Хвесеня // Рабочие материалы международного форума-конкурса молодых ученых «Проблемы недропользования», Санкт-Петербург, Россия, 20-22 апреля 2011 г. / Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова (технический университет); редкол.: Л. С. Синьков (пред.) [и др.]. – СПб., 2011. – С. 163-165.

17. Журавков, М. А. Подготовка и обработка первичных данных при геомеханическом моделировании [Электронный ресурс] / М. А. Журавков, С. С. Хвесеня // XX Международный симпозиум по планированию горных работ и выбору оборудования MPES 2011, Алматы, Казахстан, 12-14 октября, 2011 г. / Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан; редкол. Raj K. Singhal (пред.) [и др.]. – Алматы, 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

18. Zhuravkov, M.A. Methods of processing and analysis of physical and mechanical characteristics in the geomechanical modeling / M. A. Zhuravkov, S. S. Hvesenya // Proc. of V International Geomechanics Conference, Varna, Bulgaria, 18-21 June, 2012 / Scientific and technical union of mining, geology and metallurgy; ed. Nikolai Nikolaev (chairman) [and others]. – Varna, 2012. – P. 28-35.

19. Журавков, М. А. О построении трехмерных геомеханических моделей массивов горных пород в областях с нарушениями / М. А. Журавков, А. В. Круподеров, О. Л. Коновалов, С. С. Хвесеня // Труды XX Всероссийской конференции с участием иностранных ученых «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли», Новосибирск, Россия, 7-11 октября, 2013 г. / Институт горного дела сибирского отделения РАН; редкол. В. Н. Опарин (пред.) [и др.]. – Новосибирск, 2013. – С. 202-207.

20. Zhuravkov, M.A. 3D-geological model creation on the base of source geological data / M. A. Zhuravkov, A. V. Krupoderov, O. L. Konovalov, S. S. Hvesenya // Proc. of VI International Geomechanics Conference, Varna, Bulgaria, 24-28 June, 2014 / Scientific and technical union of mining, geology and metallurgy; ed. Nikolai Nikolaev (chairman) [and others]. – Varna, 2014. – P. 29-37.

21. Zhuravkov, M. A. 3D-geomechanical model creation on the base of massif geological model / M. A. Zhuravkov, O. L. Konovalov, A. V. Krupoderov, S. S. Hvesenya, S. I. Bogdan, S. I. Slavashevich // Proc. of VI International Geomechanics Conference, Varna, Bulgaria, 24-28 June, 2014 / Scientific and technical union of mining, geology and metallurgy; ed. Nikolai Nikolaev (chairman) [and others]. – Varna, 2014. – P. 38-45.

РЭЗІЮМЭ

Хвясеня Сяргей Сяргеевіч

Тэхналогіі разліку эфектыўных характарыстык і пабудовы кампютарных геамеханічных мадэляў масіваў горных парод

Ключавыя словы: геамеханіка, апрацоўка і аднаўленне зыходных дадзеных, распрацоўка праграмнага забяспячэння, базы дадзеных, канечна-элементнае мадэляванне, разломы, парушэнні, механіка-матэматычнае мадэляванне.

Аб'ект даследавання: геамеханічныя параметры горных парод і пародных масіваў, геамеханічныя працэсы ў масівах горных парод з улікам натуральных і тэхнагенных фактараў уплыву.

Мэта работы: устанавленне, на аснове правядзення комплексных даследаванняў, заканамернасцяў для атрымання эфектыўных геамеханічных характарыстык масіваў горных парод, вызначэнне складанасцяў і пошук рашэнняў пры пабудове лікавых (кампютарных) геамеханічных мадэляў масіваў горных парод з улікам парушэнняў, асаблівасцяў пароднай тоўшчы, а таксама тапалогіі і параметраў выпрацаванай прасторы.

У працы вырашаны наступныя задачы:

1) даследаваны сучасныя падыходы пры пабудове канечна-элементных мадэляў масіваў горных парод і атрымання эфектыўных геамеханічных характарыстык масіваў горных парод, на падставе якіх вылучаны асноўныя складанасці пры правядзенні мадэлявання і атрымання эфектыўных характарыстык горных парод, для якіх прапанаваны адпаведныя рашэнні;

2) для вылучаных складанасцяў пры канечна-элементнамадэляванні і атрымання эфектыўных характарыстык горных парод прапанаваны рашэнні;

3) прапанаваны метадыкі і алгарытмы пабудовы канечна-элементных геалагічных і геамеханічных мадэляў з улікам наяўнасці структурных асаблівасцяў (расколіны, флуктуацыі, разломы, замяшчэнні і да т.п.); прапанаваныя алгарытмы рэалізаваны ў праграмных модулях для пабудовы адпаведных мадэляў;

4) распрацаваны алгарытмы першаснай апрацоўкі фізіка-механічнай інфармацыі, аднаўлення прапушчаных дадзеных, разліку эфектыўных характарыстык масіваў горных парод з улікам маштабных пераходаў і эфектаў; на аснове дадзеных алгарытмаў распрацаваны адпаведныя праграмныя модулі;

5) прапанаваны і рэалізаваны алгарытмы па верыфікацыі канечна-элементных мадэляў пародных масіваў;

6) распрацаваны праграмны комплекс, які аб'ядноўвае ў сабе пабудаваныя модулі захоўвання, апрацоўкі і аналізу геамеханічнай інфармацыі, падрыхтоўкі і пабудовы структурных геалагічных і геамеханічных мадэляў пародных масіваў, мадэлявання і апрацоўкі вынікаў геамеханічнага мадэлявання, які працуе з шырокім спектрам знешніх праграм, у прыватнасці такімі, як ГІС «MapManager», Tochnog, Ansys і інш.;

7) выкананы даследаванні і праведзены аналіз сучасных сістэм структураванага захоўвання інфармацыі і кіравання дадзенымі, на гэтай аснове здзейснены і абгрунтаваны выбар канкрэтнага сховішча для геамеханічнай інфармацыі; у адпаведнасці з выбраным сховішчам распрацавана структура захоўвання інфармацыі і выканана праграмная рэалізацыя схемы захоўвання інфармацыі.

РЕЗЮМЕ

Хвесеня Сергей Сергеевич

Технологии расчета эффективных характеристик и построения компьютерных геомеханических моделей массивов горных пород

Ключевые слова: геомеханика, обработка и восстановление исходных данных, разработка программного обеспечения, базы данных, конечно-элементное моделирование, разломы, нарушения, механико-математическое моделирование.

Объект исследования: геомеханические параметры горных пород и породных массивов, геомеханические процессы в массивах горных пород с учетом естественных и техногенных факторов влияния.

Цель работы: установление, на основе проведения комплексных исследований, закономерностей для получения эффективных геомеханических характеристик массивов горных пород, определение сложностей и поиск решений при построении численных (компьютерных) геомеханических моделей массивов горных пород с учетом нарушений, особенностей породной толщи, а также топологии и параметров выработанного пространства.

В работе решены следующие задачи:

1) исследованы современные подходы при построении конечно-элементных моделей массивов горных пород и получении эффективных геомеханических характеристик массивов горных пород, на основании которых выделены основные сложности при проведении моделирования и получении эффективных характеристик горных пород, для которых предложены соответствующие решения;

2) для выделенных сложностей при конечно-элементном моделировании и получении эффективных характеристик горных пород предложены решения;

3) предложены методики и алгоритмы построения конечно-элементных геологических и геомеханических моделей с учетом наличия структурных особенностей (трещины, флуктуации, разломы, замещения и т.п.); предложенные алгоритмы реализованы в программных модулях для построения соответствующих моделей;

4) разработаны алгоритмы первичной обработки физико-механической информации, восстановления пропущенных данных, расчета эффективных характеристик массивов горных пород с учетом масштабных переходов и эффектов; на основе данных алгоритмов разработаны соответствующие программные модули;

5) предложены и реализованы алгоритмы по верификации конечно-элементных моделей породных массивов;

6) разработан программный комплекс, объединяющий в себе созданные модули хранения, обработки и анализа геомеханической информации, подготовки и построения структурных геологических и геомеханических моделей породных массивов, моделирования и обработки результатов геомеханического моделирования, работающий с широким спектром внешних приложений, в частности, такими, как ГИС «MapManager», Tochnog, Ansys и др.;

7) выполнены исследования и проведен анализ современных систем структурированного хранения информации и управления данными, на основе чего осуществлен и обоснован выбор конкретного хранилища геомеханической информации; в соответствии с выбранным хранилищем разработана структура хранения информации и выполнена программная реализация схемы хранения информации.

SUMMARY

Hvesenya Sergey

Technologies of effective characteristics calculation and creation of rock massifs geomechanical computer models.

Key words: geomechanics, initial data processing and recovery, software development, databases, finite element modeling, faults, disturbances, mechanics and mathematical simulation.

Object of research: geomechanical parameters of rocks and rock massifs, geomechanical processes in rock massif based on natural and man-made influences.

The purpose of work: establishment on the basis of comprehensive research, regularity for obtaining the effective geomechanical characteristics of rocks, detection difficulties and finding solutions for creation numerical (computer) geomechanical models of rocks with the disturbances, rock strata features, and also topology and parameters of worked-out area.

The following problems have been solved:

1) modern approaches for the finite element models of rock massifs creation and getting effective geomechanical characteristics of rocks are investigated, on this base the main difficulties are carried out during the simulation and calculation of effective characteristics of rock massifs;

2) for dedicated difficulties in finite element modeling and calculation of effective characteristics of rocks solutions are suggested;

3) methods and algorithms for finite element geological and geomechanical models creation with regard to the presence of structural features (cracks, fluctuations, faults, replacements, etc.) are proposed; the appropriate software plug-ins are implemented for corresponding models creation;

4) algorithms for initial physical and mechanical data processing, missing data recovery, the calculation of the effective characteristics of rocks with taking into account scale transformations and effects are developed; the appropriate software plug-ins are implemented on these basis;

5) algorithms for rock massifs finite element models verification are proposed and implemented;

6) software package that combines built-in modules for storage, processing and analysis of geomechanical data, preparing and creation structural geological and geomechanical models of rock massifs, modeling and analyzing the results of geomechanical modeling, working with wide range of external applications, in particular such as GIS «MapManager», Tochnog, Ansys, etc. are developed;

7) investigations and analysis of modern structured data storage and data management systems are completed, based on these the justified choice of the specific database for geomechanical information was done; in accordance with the selected database, information storage structure is designed and implemented in the created information storage system.

Научное издание

ХВЕСЕНЯ
Сергей Сергеевич

**ТЕХНОЛОГИИ РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
И ПОСТРОЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ
МОДЕЛЕЙ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 25.02.08 – Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Подписано в печать 19.05.2015. Формат 60x84 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,27. Тираж 70. Заказ 393.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г.Минск.