

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

ХАЛКЕЧЕВ Руслан Кемалович

**РАЗРАБОТКА КАРКАСНОЙ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНО-МОДЕЛЬНОЙ  
МЕТОДОЛОГИИ ПОСТРОЕНИЯ АСНИ И АСУ ТП В ГОРНОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

*Специальность:*

**05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и  
производствами (промышленность)»**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва 2020

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность и степень разработанности темы исследования

Все возрастающие темпы добычи полезных ископаемых, истощение эксплуатируемых месторождений и конкуренция на мировых минерально-сырьевых рынках требуют разработки новых и совершенствования существующих автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) в горной промышленности. В свою очередь, разработка таких систем невозможна без проведения комплексных научных исследований в области физических процессов горного производства – междисциплинарной науки, занимающейся изучением физических свойств геоматериалов (материалов геологического происхождения) при их взаимодействии с естественными и искусственно создаваемыми полями.

Анализ состояния информационных технологий в области горного дела свидетельствует о том, что в большинстве существующих научных организаций при разработке инноваций в области физических процессов горного производства, пользуются совокупностью пакетов прикладных программ и технических средств, несогласованных между собой ни по форматам данных, ни по интерфейсам взаимодействия. И лишь в некоторых из организаций для повышения качества и снижения трудоемкости научной деятельности разрабатываются и используются автоматизированные системы научных исследований (АСНИ), определяемые как программно-аппаратные комплексы, позволяющие получить новые знания об изучаемых объектах путем планирования, реализации, анализа и управления экспериментальными и теоретическими исследованиями. Анализ тех немногих экземпляров АСНИ, применяемых в области физических процессов горного производства, свидетельствует о том, что при их разработке используется интеграционный подход. В рамках данного подхода построение любой АСНИ осуществляется посредством конфигурации и последующего объединения готовых компонентов программного и технического видов обеспечений. Среди работ, выполненных в рамках интеграционного подхода, особо следует отметить труды Накагавы А.С., Стаффорда Дж.Э., Макдауэлла Р.Д., Де Сильвы Т., Крука М.Дж., Рудольфи Ф., Ачуры З., Рубачи М., Милстеда А.Дж. и др.

К достоинствам интеграционных АСНИ можно отнести их высокую степень гибкости и расширяемости, обусловленную тем, что любой компонент программного и технического видов обеспечения данных систем может быть настроен или потенциально подвергнут замене. Несмотря на все преимущества интеграционного подхода, есть у него ряд недостатков, особенно проявляемых при осуществлении проектов по автоматизации научных исследований в области физических процессов горного производства. Так, в частности программное обеспечение (ПО) АСНИ, реализованное с помощью данного подхода, функционирует в «разнородной» среде, что нередко приводит к появлению большого количества сбоев. Другой недостаток рассматриваемых систем связан с тем, что

при их разработке компоненты математического обеспечения (математические методы и модели) практически не документируются и поставляются исследователям уже реализованными в составе компонентов программного обеспечения, не поддающихся необходимым в процессе исследований изменениям.

Но все же главным недостатком интеграционных АСНИ, и как следствие – разработанных с их помощью АСУ ТП, является низкое качество результатов решения данными системами своих основных функциональных задач: определение деформационных, тепло- и электропроводных свойств; определение внешнего поля напряжения, действующего на породный массив; математическое моделирование разрушения геоматериалов. При этом здесь и далее под функциональной задачей следует понимать любую задачу, связанную с основным назначением функционирования соответствующей конкретной автоматизированной системы или ее части. Существующие АСНИ и АСУ ТП при решении своих основных функциональных задач не учитывают того факта, что для каждого геоматериала существует представительный объем, т.е. минимальный объем, начиная с которого исследуемые объекты обладают природной мультифрактальной структурой, и вследствие этого проявляют свои макроскопические физические свойства. Другими словами, если при использовании экспериментальных и (или) теоретических методов размеры исследуемого геоматериала превышают соответствующую величину представительного объема (которую необходимо определить), то получаемые значения параметров физических свойств будут статистически совпадать, в противном случае – носить приближенный характер, не имея устойчивого среднего. Однако для большинства геоматериалов размеры представительного объема настолько велики, что применение существующих экспериментальных методов приведет к значительным ошибкам в определении параметров физических свойств и моделировании процессов разрушения. Выходом в сложившейся ситуации является применение методологии математического моделирования функциональных задач, проводимой вне рамок существующих теорий и методов, не позволяющих учесть мультифрактальную структуру геоматериалов.

Итак, интеграционный подход к разработке автоматизированных систем (АС) не в состоянии решить проблему автоматизации научной деятельности в области физических процессов горного производства. На первый взгляд для решения рассматриваемой проблемы можно воспользоваться другим подходом, при котором разработка АСНИ производится в рамках единого целостного проекта, включающего анализ, проектирование и последовательную реализацию математического, информационного, программного и технического видов обеспечений системы. Развитию методов такого системно-ориентированного подхода посвящено множество отечественных научных работ, среди которых применительно к разработке АСНИ, следует отметить труды Ветренко М.С., Шотина А.Б., Поезжаловой С.Н., Селиванова С.Г., Сладковского Д.А. и др. Анализ работ в

данном направлении позволяет сделать вывод, что системно-ориентированные АСНИ, несмотря на свою высокую степень проработанности и устойчивости, имеют малую степень расширяемости и повторного использования полученных проектных решений.

В сложившейся ситуации приобретает актуальность разработка новой каркасной мультифрактально-модельной методологии построения АС, сочетающей в себе достоинства интеграционных и системно-ориентированных подходов. Такая методология, с одной стороны должна основываться на механизмах конфигурирования, а с другой – на разработке и использовании мультифрактальных математических моделей (формирующих соответствующее математическое и информационное виды обеспечения), предназначенных для решения функциональных задач АС в нескольких предметных областях. При этом для достижения большей степени гибкости, расширяемости и повторного использования проектных решений предлагаемая методология должна быть эффективно применимой не только при построении АСНИ, но и при разработке систем класса АСУ ТП, поскольку в соответствии со сферой применения методы решения многих функциональных задач данных систем совпадают.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод об актуальности разработки каркасной мультифрактально-модельной методологии построения АСНИ и АСУ ТП в горной промышленности.

**Цель исследования** – разработать новые формализованные методы и средства построения АСНИ и АСУ ТП вместе составляющие основы каркасной мультифрактально-модельной методологии построения АС.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **задачи**:

- 1) разработка и формализация каркасного метода построения АС;
- 2) разработка теоретических основ мультифрактального математического моделирования функциональных задач определения деформационных, тепло- и электропроводных свойств геоматериалов, а также величины внешнего поля напряжений, действующего на породный массив;
- 3) разработка программного фреймворка (высокоуровневого каркаса ПО) АСНИ и АСУ ТП, функциональные задачи которых связаны с определением напряженно-деформированного состояния, процесса тепло- и электропроводности, а также разрушения различного рода объектов мультифрактальной структуры;
- 4) проектирование и реализация экспертной системы поддержки принятия решений в области построения математических моделей разрушения геоматериалов;
- 5) построение в рамках предложенной методологии АСНИ физических процессов горного производства и АСУ ТП забивки свай в оползнеопасных участках породных массивов.

**Методология и методы исследований.** Для решения поставленных научных задач использованы: математическое моделирование, объектно-ориентированный анализ, проектирование и программирование, информационное моделирование баз данных, методы

искусственного интеллекта.

**Основные научные положения, выносимые на защиту:**

- каркасный метод построения АС, который позволил спроектировать и реализовать программно-технические архитектуры систем посредством конфигурирования взаимосвязанной совокупности классов, получаемых на основе построения математических моделей универсального типа, и отвечающих за решение основных функциональных задач во многих предметных областях;
- теоретические основы мультифрактального моделирования функциональных задач АСНИ и АСУ ТП в горной промышленности, позволяющие в отличие от своих аналогов за счет учета различных видов неоднородностей (газовых и жидкостных включений, границ между структурно-текстурными составляющими) установить количественно адекватные значения эффективных тензорных характеристик (погрешность менее 5%), определяющих деформационные, тепло- и электропроводные свойства геоматериалов, а также установить величину внешнего поля напряжений, действующего на породный массив;
- высокоуровневый программный фреймворк, позволивший разработать устойчивое, гибкое и расширяемое ПО АСНИ и АСУ ТП, функциональные задачи которых связаны с определением напряженно-деформированного состояния, процессов тепло- и электропроводности, моделирования разрушения объектов мультифрактальной структуры и других подзадач административного типа;
- гибридный метод разработки экспертных систем, который решает частично-формализуемые задачи посредством создания базы знаний предметной области на основе эвристик и программных реализаций алгоритмов, а также использования механизма логического вывода, базирующегося на применении взвешенного ориентированного графа;
- АСНИ физических процессов горного производства, предназначенная для разработки количественно адекватных математических моделей, допускающих интеграцию в программное обеспечение АСУ ТП, АСТПП и других систем, применяемых в горной промышленности;
- АСУ ТП забивки свай в оползнеопасных участках породных массивов, основанная на многоуровневой архитектуре ПО, позволяющего в режиме реального времени контролировать и регулировать величину осевой нагрузки на наголовник свай, тем самым снижая риски схода оползня.

**Научная новизна работы состоит:**

- в разработке нового каркасного метода построения АС, заключающегося: в анализе требований, проектировании соответствующего математического и информационного видов обеспечений, и последующей реализации на их основе программно-технической архитектуры, детализация которой посредством механизмов наследования, агрегирования, добавления классов позволяет получить полноценно действующий образец системы;
- в разработке теоретических основ мультифрактального моделирования функциональных

задач АСНИ и АСУ ТП в горной промышленности в виде определения деформационных, тепло- и электропроводных свойств геоматериалов, а также установления величины внешнего поля напряжений, действующего на породный массив;

– во введении нечеткого тензора – нового научного понятия, развивающего методы математического моделирования функциональных задач АСНИ и АСУ ТП в условиях отсутствия достаточно точных знаний о свойствах изучаемых неоднородных анизотропных объектов;

– в разработке высокоуровневого программного фреймворка (каркаса), детализация которого позволяет спроектировать и реализовать программное обеспечение АСНИ, АСУ ТП и других систем, функциональные задачи которых связаны с определением напряженно-деформированного состояния, коэффициентов тепло- и электропроводности объектов мультифрактальной структуры, аутентификации, резервного копирования данных и других административных подзадач;

– в разработке гибридного метода построения экспертных систем, в котором взвешенный ориентированный граф используется в качестве модели формирования рассуждений механизма логического вывода и базы знаний, содержащей в качестве фактов программные реализации алгоритмов (основанных на математических моделях анализа объектов) и эвристические правила;

– в разработке АСНИ физических процессов горного производства, предназначенной для получения новых знаний в виде количественно адекватных математических моделей геоматериалов, при их взаимодействии с естественными и искусственно создаваемыми полями;

– в разработке АСУ ТП забивки свай с целью снижения рисков возникновения оползней, позволяющей в зависимости от напряженно-деформированного состояния геоматериалов, глубины залегания и размеров свай, определять оптимальную величину осевой нагрузки гидравлического молота на сваю, при которой отсутствует излишняя динамическая нагрузка на породный массив.

**Достоверность и обоснованность** научных положений и результатов исследований подтверждается следующим:

– корректностью применения апробированного математического аппарата: методов математического моделирования трудноформализуемых объектов, теории потенциала, тензорного исчисления, теории псевдодифференциальных операторов, методов нечеткого моделирования систем, теории интегральных уравнений, методов фрактальной и мультифрактальной геометрии, нечеткой теории динамических систем, уравнений в частных производных, понимаемых в смысле обобщенных функций;

– корректностью применения методологий информационных технологий: объектно-ориентированного анализа, проектирования и программирования, унифицированного языка моделирования, искусственного интеллекта;

– согласованием результатов, полученных на основе использования предложенных математических моделей, с данными других исследователей и натурных наблюдений.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

– разработана совокупность взаимосвязанных математических моделей и методов, вместе составляющих теоретические основы мультифрактального математического моделирования функциональных задач АСНИ и АСУ ТП в горной промышленности;

– разработан каркасный метод построения АС, основанный на проектировании и реализации математического, информационного, программного и технического видов обеспечения, предназначенных для решения функциональных задач АСНИ и АСУ ТП в нескольких предметных областях;

– в рамках каркасного метода разработана АСНИ физических процессов горного производства, отличающаяся от своих неполных аналогов высокой степенью гибкости и устойчивости, свойственным системам, функционирующим в рамках единого программного адресного пространства;

– в рамках каркасного метода получена АСУ ТП забивки свай, позволяющая в режиме реального времени поддерживать оптимальную величину осевой нагрузки ударника на наголовник сваи с целью обеспечения устойчивости оползнеопасного участка массива.

#### **Реализация выводов и рекомендаций работы**

Результаты диссертационной работы внедрены: на предприятии ЗАО «Известняк» Джегонасский карьер в части использования АСНИ физических процессов горных работ при решении задач проектирования открытых горных работ и управления технологическими процессами дробления и измельчения известняков, а также АСУ ТП забивки свай при проведении горно-строительных работ; в научно-исследовательской деятельности Высокогорного геофизического института Росгидромета в части АСНИ физических процессов горного производства при определении напряженно-деформированного состояния селе- и лавиноопасных снежных пластов; в деятельности ООО «ЮГЭНЕРГОРЕМОНТ» в части АСУ ТП забивки свай при проведении ремонтно-строительных работ; в деятельности ООО «СНАБ» в части применения АСУ ТП забивки свай при строительстве фундаментов зданий и сооружений.

**Апробация работы.** Основные результаты работы по мере их получения докладывались:

– на девятом Всероссийском симпозиуме по прикладной и промышленной математике. Весенняя и Осенняя сессии (г. Кисловодск – г. Волгоград, 2008г.);

– на тринадцатом Всероссийском симпозиуме по прикладной и промышленной математике. Летняя и Осенняя сессии (г. Петрозаводск – г. Сочи, 2012г.);

– на двадцать седьмой международной конференции «Актуальные проблемы в современной науке и пути их решения» (г. Москва, 2016г.);

– на двадцать пятом международном научном симпозиуме «Неделя горняка – 2017» (г.

Москва, 2017г.).

**Публикации.** Основные результаты работы опубликованы в 60 научных трудах, в том числе 7 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ, 47 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, 6 работ в изданиях, входящих в базы международного цитирования Scopus.

**Структура диссертации.** Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 237 наименований, 4 приложений, включает 3 таблицы, содержит 129 рисунков.

### **Основное содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы, определены цель и задачи исследования, раскрыта научная новизна и перечисляются результаты, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ существующих подходов к автоматизации научных исследований в различных предметных областях, в том числе и физических процессов горного производства. Проведенный анализ позволил сделать вывод о том, что применяемые в настоящее время АСНИ и АСУ ТП в горной промышленности не в состоянии в должной мере решать свои основные функциональные задачи и для их построения требуется новый метод разработки АС.

**Во второй главе** впервые предложен каркасный метод разработки АС. В рамках рассматриваемой работы с целью получения высокоуровневого каркаса ПО АСНИ и АСУ ТП в горной промышленности реализованы первые три стадии предложенного метода.

Каркасный метод с помощью языка UML может быть формализован в следующем виде (рисунок 1). Разработка АС в рамках данного метода осуществляется в рамках итерационной модели жизненного цикла, состоящей из трех этапов: 1) анализ требований; 2) проектирование; 3) реализация и тестирование. Как и в других методах, каждый этап состоит из совокупности стадий, определяющих порядок действий, необходимых для разработки АС. Согласно рисунку 1, разработка АС в рамках каркасного метода делится на стадии левой и правой частей потока управления. Стадии из левой части выполняются первыми и предназначены для разработки высокоуровневого каркаса ПО (программного фреймворка) АС, т.е. каркаса, способного обеспечить решение как служебных, так и основных функциональных задач различных АС, отличающихся как по типу, так и по области применения. Когда такой фреймворк будет разработан, то выполняются стадии, составляющие правую часть потока управления.

Итак, в случае отсутствия высокоуровневого каркаса осуществляется этап анализа требований. Он заключается в формулировании концепции и требований к функциональным задачам высокоуровневого каркаса ПО АС. Далее, осуществляется первая стадия проектирования, предназначенная для разработки математических моделей,

являющихся основой для эффективного выполнения функциональных задач АС в отдельно взятой области применения.

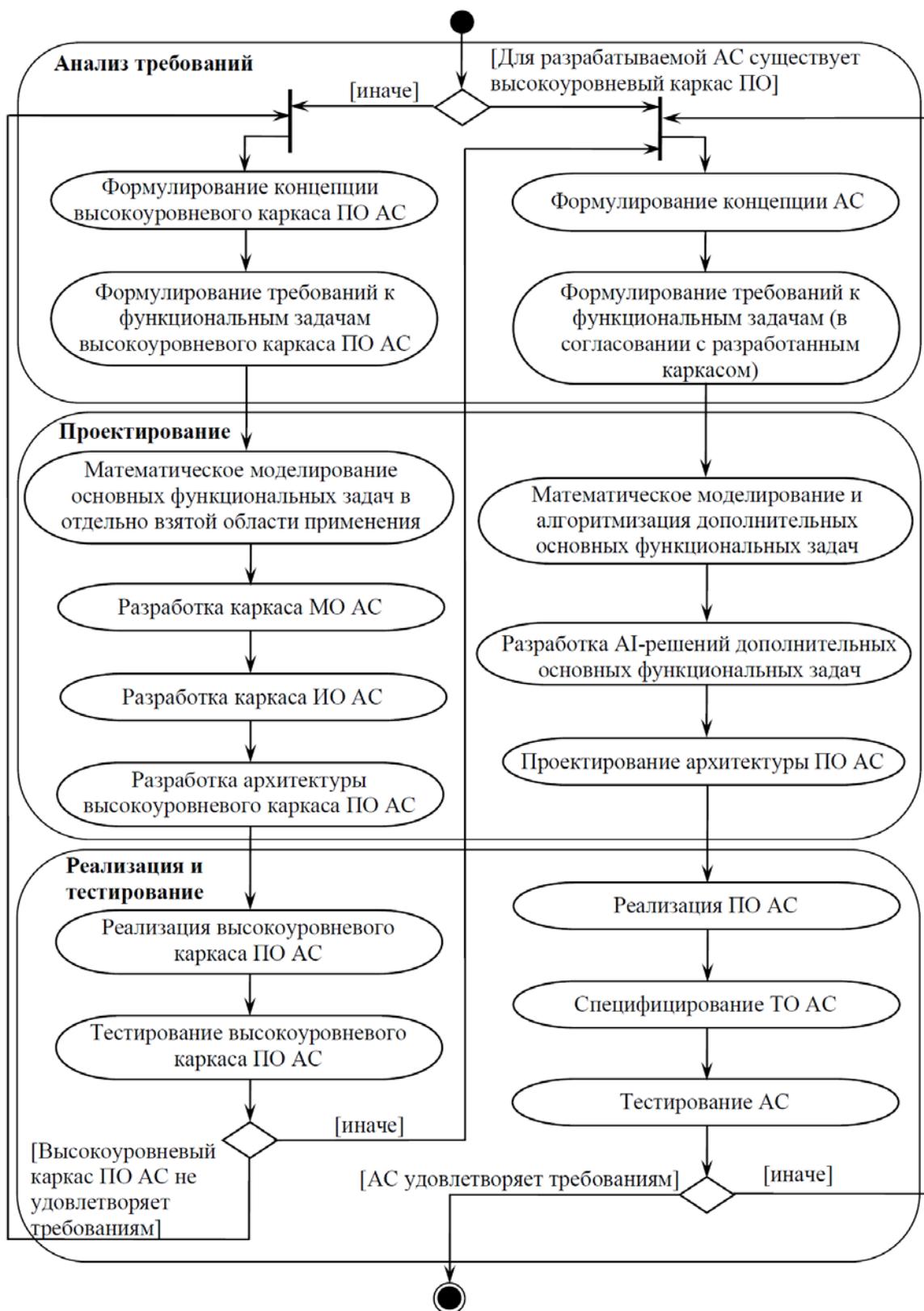


Рисунок 1 – Каркасный метод разработки АС

После этого на базе построенных математических моделей (образующих полученные

теоретические основы) с помощью методов обобщения и алгоритмизации разрабатываются соответствующие математическое и информационное виды обеспечения, предназначенные для решения функциональных задач АС в нескольких областях применения. Далее на их основе разрабатывается, реализуется и тестируется архитектура высокоуровневого каркаса ПО, представляющего собой совокупность взаимосвязанных пакетов классов, образующих остов для дальнейшей разработки ПО АС. В результате реализации данных стадий осуществляется проверка полученных результатов, а именно: соответствует ли полученный высокоуровневый каркас ПО АС ранее сформулированным требованиям. Если такого соответствия не обнаружено, то стадии, представленные в левой части потока управления (рисунок 1), выполняются еще раз. При этом некоторые из промежуточных стадий могут быть пропущены. И так повторяется до тех пор, пока не будет получен высокоуровневый каркас ПО АС, удовлетворяющий требованиям разработчика. В итоге, когда высокоуровневый программный фреймворк будет получен, осуществляется переход к выполнению стадий, представленных в правой части потока управления. Первые две из них предназначены для формулирования концепции и функциональных требований АС. При этом описание требований осуществляется в контексте взаимодействия сущностей системы (подсистем, программных объектов и др.) с разработанным программным фреймворком. Далее, для тех функциональных задач, что не покрываются программным фреймворком, необходимо осуществить их математическую формализацию и (или) разработать соответствующие решения в сфере искусственного интеллекта. Именно поэтому после этапа анализа требований в состав предлагаемого метода включены стадии «Математическое моделирование и алгоритмизация дополнительных основных функциональных задач» и «Разработка AI-решений дополнительных основных функциональных задач», по своему смысловому содержанию относящиеся к этапу проектирования. Также необходимо отметить, что в некоторых проектах по разработке АС одна из данных стадий может отсутствовать. После этого посредством механизмов наследования и агрегации, а также последовательного добавления классов производится расширение функциональности каркаса, что в итоге приводит к проектированию и реализации архитектуры полноценно действующего экземпляра ПО АС. И в заключение, на основе реализованной программной архитектуры производится специфицирование технического обеспечения (ТО) разрабатываемой системы и ее последующее тестирование.

Воспользовавшись предложенным каркасным методом, были реализованы первые две его стадии. В результате были сформулированы цели и общее описание программного фреймворка АСНИ и АСУ ТП в горной промышленности, а также установлены требования к его интерфейсам и функциям.

Рассмотрим реализацию третьей стадии предложенного каркасного метода – математическое моделирование основных функциональных задач в отдельно взятой области применения (в нашем случае – горной промышленности). Реализация данной

стадии в рамках рассматриваемой работы сводится к разработке математических моделей, составляющих теоретические основы мультифрактального математического моделирования функциональных задач определения деформационных, тепло- и электропроводных свойств геоматериалов, а также установления величины внешнего поля напряжений, действующего на породный массив. Ключевой особенностью данных моделей является то, что для их построения предложим новый метод мультифрактального математического моделирования, позволяющий за счет учета реальной структуры исследуемых объектов добиться большей количественной адекватности получаемых результатов. Этот метод заключается в построении для объекта функциональной задачи (в нашем случае – геоматериала) мультифрактальной модели, представляющей собой совокупность связанных между собой математических моделей фрактальных сред. При этом каждая из данных сред описывает фракталы, входящие в состав моделируемого объекта функциональной задачи.

Разработаем математические модели, составляющие теоретические основы мультифрактального моделирования функциональных задач АСНИ и АСУ ТП в части определения деформационных свойств геоматериалов. Первой из них является мультикомпонентная математическая модель минерала относительно деформационных свойств, представляющая собой набор взаимодействующих друг с другом компонентных моделей, согласованных по функциям и форматам данных, предназначенных для определения эффективных свойств минералов в различных деформационных состояниях. Разработаем компонентную математическую модель минерала в упругом состоянии. Минерал при этом является геоматериалом мультифрактальной структуры и состоит из вплотную прилегающих друг к другу зерен. Сопоставим минералу трехмерную неограниченную анизотропную упругую сплошную среду со случайно-ориентированными в пространстве неоднородностями в областях  $V$ , которые соответствуют зернам.

Обозначим через  $\overset{(m)}{C}$  тензор модулей упругости эллипсоида, который является случайной величиной. Здесь и далее буквенно-числовое сочетание, заключенное в скобки над тензорной величиной, является пометой, а не индексом, и указывает на семантическое значение данной величины. Поместим в матрицу с упругими свойствами, равными

усредненным значениям  $\langle \overset{(m)}{C} \rangle$ , указанные эллипсоидальные неоднородности. В результате получим модель сплошной среды для рассматриваемого минерала, которую назовем сплошной средой со структурой. Тогда полученную среду с неоднородностями

следует характеризовать тензором модулей упругости  $\overset{(m)}{C}(\mathbf{x}) = \langle \overset{(m)}{C} \rangle + \overset{(lm)}{C} V(\mathbf{x})$ , где  $\mathbf{x}(x_1, x_2, x_3)$  – точка среды;  $V(\mathbf{x})$  – характеристическая функция области  $V$ ;

$\overset{(lm)}{C} = \overset{(m)}{C} - \langle \overset{(m)}{C} \rangle$  – случайный четырехвалентный тензор, постоянный в пределах каждой неоднородности и меняющийся скачком на границе эллипсоидов. В результате  $\overset{(m)}{C}(\mathbf{x})$

является кусочно-постоянной положительно-определенной функцией, имеющей разрыв на границе эллипсоидальных неоднородностей. Обозначим через тензоры  $\varepsilon^{(0m)}(x)$  и  $\varepsilon^{(m)}(x)$  соответственно непрерывное внешнее поле деформаций в матрице и кусочно-непрерывное поле деформаций в среде с неоднородностями при заданных внешних силах.

Рассматриваемая среда описывается следующими системами уравнений, понимаемых в смысле обобщенных функций:

1) уравнения равновесия в перемещениях:

$$\partial_j [C^{ijkl}(x) \partial_k u_l(x)] = -f^i(x), \quad u_l(x) \rightarrow u_l^{(0m)}(x) \text{ при } x \rightarrow \infty, \quad (1)$$

где  $\partial_{(k} u_{l)}(x) = \varepsilon_{kl}^{(0m)}(x)$ ,  $f^i(x)$  – внешние силы;

2) кинематические уравнения:

$$\varepsilon_{ij}^{(m)}(u) = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \quad (2)$$

3) определяющие уравнения:

$$\sigma_{ij}^{(m)} = C^{ijkl} \varepsilon_{kl}^{(m)}, \quad rot_{ijkl} \varepsilon_{kl}(x) = 0, \quad \langle \sigma_{ij} \rangle = C^{ijkl} \langle \varepsilon_{kl} \rangle. \quad (3)$$

Данная система уравнений непосредственно не допускает решения, необходимо преобразование. Система (1) с помощью тензорной функции Грина сводится к интегральному уравнению:

$$\varepsilon_{ij}^{(1m)} + \int_V^{(0m)} K_{ijkl}(x-x') C^{klmn} \varepsilon_{mn}^{(1m)}(x') dx' = - \int_V^{(0m)} K_{ijkl}(x-x') C^{klmn} \varepsilon_{mn}^{(0m)}(x') dx', \quad (4)$$

где  $K_{ijkl}(x-x') = -[\partial_i \partial_l G_{jk}(x-x')]_{(ij)(kl)}$ ,  $G = \left( -\nabla \langle C \rangle \nabla \right)^{-1}$  – тензорная функция

Грина матрицы,  $\nabla$  – градиент по  $x$ ; подынтегральные выражения имеют сингулярность в нуле и в бесконечности, поэтому требуется регуляризация.

Используя теорему Эскина Г.И. о псевдодифференциальном операторе с нулевой степенью однородности, было получено решение уравнения (4) для поля деформаций

внутри изолированного включения  $\varepsilon^{(im)}$  в области  $V$ , наведенного постоянным внешним полем деформаций  $\varepsilon^{(0m)}$ :

$$\varepsilon^{(im)} = \left( \mathbf{I} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{C} \right)^{-1} \varepsilon^{(0m)}, \quad (5)$$

где  $\mathbf{I}$  – единичный четырехвалентный тензор;  $\mathbf{B} = \frac{1}{4\pi} \int_{S_1}^{(0m)} \mathbf{K}(Ak) dS$ ;  $A$  – тензор,

определяющий невырожденное аффинное преобразование трехмерного пространства;

$\mathbf{K}^{(0m)}(k)$  – преобразование Фурье-ядра  $K_{ijkl}^{(0m)}(x-x')$ ;  $S_1$  – поверхность единичной сферы в Фурье-пространстве.

Для учета взаимодействия неоднородностей и влияния его на поле деформаций внутри включения разработан комплексный метод самосогласованного поля, который применительно к рассматриваемой задаче, может быть сформулирован следующим образом: 1) каждое из включений любой конкретной реализации случайного поля неоднородностей рассматривается как изолированное эллипсоидальное включение в

матрице; 2) поле деформаций  $\boldsymbol{\varepsilon}^{(Em)}$ , в котором находится каждое из включений, складывается из собственного поля  $\boldsymbol{\varepsilon}^{(Cm)}$  как изолированной неоднородности, внешнего поля  $\boldsymbol{\varepsilon}^{(0m)}$  и поля, наведенного окружающими неоднородностями  $\boldsymbol{\varepsilon}^{(Nm)}$ . Поскольку необходимо задаться некоторой аппроксимацией поля  $\boldsymbol{\varepsilon}^{(Em)}$ , то будем считать, что оно постоянно.

В рамках данного метода получено следующее выражение для подсчета эффективного тензора модуля упругости  $\mathbf{C}^{(efm)}$  минерала в упругом состоянии:

$$\mathbf{C}^{(efm)} = \langle \mathbf{C}^{(m)} \left( \mathbf{I} + \mathbf{V} \cdot \mathbf{C}^{(lm)} \right)^{-1} \rangle \cdot \langle \left( \mathbf{I} + \mathbf{V} \cdot \mathbf{C}^{(lm)} \right)^{-1} \rangle^{-1}. \quad (6)$$

Используя предложенный метод математического моделирования, получена компонентная математическая модель минерала при упругопластическом деформировании, которая сводится к уравнению относительно приращения полной деформации. Решая это интегральное уравнение с применением разработанного комплексного метода самосогласованного поля, получено выражение для эффективного тензора модулей упругости минерала при упругопластическом деформировании, но при постоянном количестве необратимо движущихся дислокаций.

В минералах, которые, как правило, трещиноваты и имеются поверхностные дефекты, на структурном уровне протекают одновременно два противоположных процесса: зарождение и гибель движущихся дислокаций. Под действием напряжений идет зарождение и движение дислокаций, которые сталкиваясь с трещинами, могут поглощаться, а с поверхностными дефектами (границы зерен) прекращать свое движение. При этом постоянство количества необратимо движущихся дислокаций достигается равенством числа зарождающихся и поглощающихся дислокаций. Данная динамика дислокаций, полученное выражение, а также введение нового научного понятия «нечеткий тензор» являются основой для последующих компонентных математических моделей, определяющих эффективные упругие константы минерала в оставшихся взаимоисключающих деформированных состояниях: упругопластическом с упрочнением, близком к идеально-

пластическому, нечетком упругопластическом с упрочнением, нечетком близком к идеально-пластическому и нечетком пограничном.

Разработаем мультифрактальную математическую модель минерала с наполненными флюидом порами относительно деформационных свойств. Минерал с наполненными флюидом порами обладает мультифрактальной структурой и состоит из вплотную прилегающих друг к другу зерен, в каждом из которых находится пора, наполненная газом (или жидкостью) под давлением. Сопоставим рассматриваемому геоматериалу две вложенных одна в другую и связанных между собой фрактальные среды, которые вместе как целое представляют мультифрактальную сплошную среду. Первая из них, назовем ее минеральной фрактальной средой, является трехмерной сплошной средой со случайными неоднородностями, соответствующими зернам. А вторая – минеральная фрактальная среда с порами, представляет собой трехмерную сплошную среду с эффективными деформационными свойствами первой фрактальной среды со случайным полем эллипсоидальных неоднородностей в виде наполненных флюидом пор, разнесенных в пространстве. Таким образом, разрабатывая для каждой из данных фрактальных сред свою математическую модель, в результате получим мультифрактальную математическую модель минерала с наполненными флюидом порами относительно деформационных свойств.

Математическая модель минеральной фрактальной среды полностью совпадает с разработанной выше мультикомпонентной математической моделью минерала относительно деформационных свойств.

Разработаем математическую модель минеральной фрактальной среды с порами. Построение такой модели полностью зависит от того, описываются ли деформационные свойства минеральной фрактальной среды четкими или нечеткими эффективными упругими константами. В случае, когда эффективные тензоры модулей упругости и упругих податливостей минеральной фрактальной среды имеют четкий вид, то в рамках разработанных методов математического моделирования и комплексного метода самосогласованного поля для эффективного тензора модулей упругости минеральной фрактальной среды с порами  $\mathbf{C}^{(efmp)}$  получим:

$$\mathbf{C}^{(efmp)} = \mathbf{C}^{(efm)} + \left\langle \frac{(ELmp)}{V} \mathbf{C}^{(1mp)} \left( \mathbf{I} + \mathbf{H} \cdot \mathbf{C}^{(1mp)} \right)^{-1} \right\rangle \left( \mathbf{I} - \mathbf{H} \left\langle \frac{(ELmp)}{V} \mathbf{C}^{(1mp)} \left( \mathbf{I} + \mathbf{H} \cdot \mathbf{C}^{(1mp)} \right)^{-1} \right\rangle \right)^{-1}, \quad (7)$$

где  $\mathbf{H}^{(mp)} = \frac{1}{4\pi} \int_{S_1}^{(mp)} \mathbf{K} (Ak) dS$ ;  $\frac{(ELmp)}{V}$  и  $\frac{(BVmp)}{V}$  – соответственно объем эллипсоида и объем

блока Вороного в минеральной фрактальной среде с порами;  $\mathbf{C}^{(1mp)} = p_0 \mathbf{I} - \mathbf{C}^{(efm)}$ ;  $p_0$  – первоначальное давление в поре.

Рассмотрим второй случай – эффективный тензор модулей упругости минеральной фрактальной среды имеет нечеткий вид. В этом случае деформационные свойства минерала с наполненными флюидом порами будут определяться нечетким эффективным тензором

модулей упругости  $\tilde{\mathbf{C}}^{(efmp)}(t)$ , имеющим следующий вид:

$$\tilde{\mathbf{C}}^{(efmp)}(t) = \bigcup_{i=1}^{h\left(\tilde{\mathbf{C}}^{(efm)}(t)\right)} \left( \mu_C^* \left( \mathbf{C}_{[i]}^{(efmp)}(t) \right), \mathbf{C}_{[i]}^{(efmp)}(t) \right), \quad (8)$$

$$\text{где } \mu_C^* \left( \mathbf{C}_{[i]}^{(efmp)}(t) \right) = \mu_C^* \left( \mathbf{C}_{[i]}^{(efm)}(t) \right); \quad \mathbf{C}_{[i]}^{(efmp)}(t) = \mathbf{C}_{[i]}^{(efm)}(t) + \left\langle \frac{(ELmp)}{V} \mathbf{C}_{[i]}^{(1mp)}(t) \left( \mathbf{I} + \mathbf{H}_{[i]}^{(mp)}(t) \cdot \mathbf{C}_{[i]}^{(1mp)}(t) \right)^{-1} \right\rangle \times$$

$$\times \left( \mathbf{I} - \mathbf{H}_{[i]}^{(mp)}(t) \left\langle \frac{(ELmp)}{V} \mathbf{C}_{[i]}^{(1mp)}(t) \left( \mathbf{I} + \mathbf{H}_{[i]}^{(mp)}(t) \cdot \mathbf{C}_{[i]}^{(1mp)}(t) \right)^{-1} \right\rangle \right)^{-1}; \quad h\left(\tilde{\mathbf{C}}^{(efm)}(t)\right) - \text{функция, определяющая}$$

количество упорядоченных пар в нечетком множестве  $\tilde{\mathbf{C}}^{(efm)}(t)$ ; квадратные скобки с индексом у тензоров указывают на порядок (номер) пары в соответствующих упорядоченных нечетких множествах.

Используя разработанный метод мультифрактального моделирования, была построена мультифрактальная математическая модель минерала с флюидными включениями относительно деформационных свойств. Она состоит из математических моделей трех фрактальных сред: минеральной, минеральной с порами и минеральной с включениями. Модели первых двух фрактальных сред полностью совпадают с ранее разработанными – мультикомпонентной математической моделью минерала и мультифрактальной математической моделью минерала с наполненными флюидом порами.

Математическая модель последней минеральной фрактальной среды с включениями сводится к следующему уравнению:

1) Если эффективный тензор модулей упругости минеральной фрактальной среды с порами имеет четкий вид, то

$$\mathbf{C}^{(efmv)} = \mathbf{C}^{(efmp)} + \left\langle \frac{(ELmv)}{V} \mathbf{C}^{(1mv)} \left( \mathbf{I} + \mathbf{Z} \cdot \mathbf{C}^{(1mv)} \right)^{-1} \right\rangle \cdot \left( \mathbf{I} - \mathbf{Z} \left\langle \frac{(ELmv)}{V} \mathbf{C}^{(1mv)} \left( \mathbf{I} + \mathbf{Z} \cdot \mathbf{C}^{(1mv)} \right)^{-1} \right\rangle \right)^{-1}, \quad (9)$$

где  $\mathbf{C}^{(1mv)} = p_0 \mathbf{I} - \mathbf{C}^{(efmp)}$ ;  $\mathbf{Z} = \frac{1}{4\pi} \int_{S_1}^{(mv)} \mathbf{K}(Ak) dS$ , при  $A=1$ ;  $\mathbf{K} = -def \mathbf{G} def$ ;  $\mathbf{G}$  – тензорная

функция Грина минеральной матрицы с порами (трехмерной сплошной среды с эффективными деформационными свойствами  $\mathbf{C}^{(efmp)}$ );  $V$  и  $V^{(BVmv)}$  – соответственно объем эллипсоида и объем блока Вороного в минеральной фрактальной среде с

включениями.

2) Если эффективный тензор модулей упругости минеральной фрактальной среды с порами задан в нечеткой форме, то

$$\overset{(efmv)}{\tilde{\mathbf{C}}}(t) = \overset{h}{\left( \overset{(efmp)}{\tilde{\mathbf{C}}}(t) \right)} \bigcup_{i=1} \left( \mu_C^* \left( \overset{(efmv)}{\mathbf{C}}_{[i]}(t) \right), \overset{(efmv)}{\mathbf{C}}_{[i]}(t) \right), \quad (10)$$

$$\text{где } \mu_C^* \left( \overset{(efmv)}{\mathbf{C}}_{[i]}(t) \right) = \mu_C^* \left( \overset{(efmp)}{\mathbf{C}}_{[i]}(t) \right); \overset{(efmv)}{\mathbf{C}}_{[i]}(t) = \overset{(efmp)}{\mathbf{C}}_{[i]}(t) + \left\langle \frac{\overset{(ELmv)}{V}}{\overset{(BVmv)}{V}} \overset{(1mv)}{\mathbf{C}}_{[i]}(t) \left( \mathbf{I} + \overset{(mv)}{\mathbf{Z}}_{[i]}(t) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \overset{(1mv)}{\mathbf{C}}_{[i]}(t) \right)^{-1} \right\rangle \left( \mathbf{I} - \overset{(mv)}{\mathbf{Z}}_{[i]}(t) \left\langle \frac{\overset{(ELmv)}{V}}{\overset{(BVmv)}{V}} \overset{(1mv)}{\mathbf{C}}_{[i]}(t) \left( \mathbf{I} + \overset{(mv)}{\mathbf{Z}}_{[i]}(t) \cdot \overset{(1mv)}{\mathbf{C}}_{[i]}(t) \right)^{-1} \right\rangle \right)^{-1}; \overset{h}{\left( \overset{(efmp)}{\tilde{\mathbf{C}}}(t) \right)} - \text{функция,}$$

определяющая количество упорядоченных пар в нечетком множестве  $\overset{(efmp)}{\tilde{\mathbf{C}}}(t)$ .

Применяя разработанный метод моделирования к горной породе мультифрактальной структуры, состоящей из вплотную прилегающих друг к другу минералов с флюидными включениями, была получена следующая мультифрактальная математическая модель горной породы относительно деформационных свойств:

$$\overset{(eftgp)}{\mathbf{C}} = \overset{(efdgp)}{\mathbf{C}} + \left\langle \frac{\overset{(ELtgp)}{V}}{\overset{(BVtgp)}{V}} \overset{(1tgp)}{\mathbf{C}} \left( \mathbf{I} + \overset{(tgp)}{\mathbf{H}} \cdot \overset{(1tgp)}{\mathbf{C}} \right)^{-1} \right\rangle \left( \mathbf{I} - \overset{(tgp)}{\mathbf{H}} \left\langle \frac{\overset{(ELtgp)}{V}}{\overset{(BVtgp)}{V}} \overset{(1tgp)}{\mathbf{C}} \left( \mathbf{I} + \overset{(tgp)}{\mathbf{H}} \cdot \overset{(1tgp)}{\mathbf{C}} \right)^{-1} \right\rangle \right)^{-1}, \quad (11)$$

где  $\overset{(1tgp)}{\mathbf{C}} = \overset{(efmv)}{\mathbf{C}} - \overset{(efdgp)}{\mathbf{C}}$ ;  $\overset{(tgp)}{\mathbf{H}} = \frac{1}{4\pi} \int_{S_1} \overset{(tgp)}{\mathbf{K}}(Ak) dS$ ;  $\overset{(tgp)}{\mathbf{K}} = -def \overset{(dgp)}{\mathbf{G}} def$ ;  $\overset{(dgp)}{\mathbf{G}}$  – тензорная

функция Грина двухминеральной горно-породной матрицы (трехмерной сплошной среды с

эффективными деформационными свойствами  $\overset{(efdgp)}{\mathbf{C}}$ );  $\overset{(ELtgp)}{V}$  и  $\overset{(BVtgp)}{V}$  – соответственно объем эллипсоида и объем блока Вороного в трехминеральной горно-породной

фрактальной среде;  $\overset{(tgp)}{\mathbf{K}}(k)$  – преобразование Фурье-ядра  $K_{ijkl}(x-x')$ ;  $\overset{(tgp)}{\mathbf{C}} = \overset{(efdgp)}{\mathbf{C}} +$

$$+ \left\langle \frac{\overset{(ELdgp)}{V}}{\overset{(BVdgp)}{V}} \overset{(1dgp)}{\mathbf{C}} \left( \mathbf{I} + \overset{(dgp)}{\mathbf{Z}} \cdot \overset{(1dgp)}{\mathbf{C}} \right)^{-1} \right\rangle \cdot \left( \mathbf{I} - \overset{(dgp)}{\mathbf{Z}} \left\langle \frac{\overset{(ELdgp)}{V}}{\overset{(BVdgp)}{V}} \overset{(1dgp)}{\mathbf{C}} \left( \mathbf{I} + \overset{(dgp)}{\mathbf{Z}} \cdot \overset{(1dgp)}{\mathbf{C}} \right)^{-1} \right\rangle \right)^{-1};$$

$\overset{(1dgp)}{\mathbf{C}} = \overset{(efmv)}{\mathbf{C}} - \overset{(efogp)}{\mathbf{C}}$ ;  $\overset{(dgp)}{\mathbf{Z}} = \frac{1}{4\pi} \int_{S_1} \overset{(dgp)}{\mathbf{K}}(Ak) dS$ ;  $\overset{(dgp)}{\mathbf{K}} = -def \overset{(ogp)}{\mathbf{G}} def$ ;  $\overset{(ogp)}{\mathbf{G}}$  – тензорная функция

Грина одноминеральной горно-породной матрицы (трехмерной сплошной среды с

эффективными деформационными свойствами  $\overset{(efogp)}{\mathbf{C}}$ );  $\overset{(ELdgp)}{V}$  и  $\overset{(BVdgp)}{V}$  – соответственно объем эллипсоида и объем блока Вороного в двухминеральной горно-породной

фрактальной среде;  $\overset{\text{(dgp)}}{\mathbf{K}}(k)$  – преобразование Фурье-ядра  $\overset{\text{(dgp)}}{K}_{ijkl}(x-x')$ ;  
 $\overset{\text{(efogp)}}{\mathbf{C}} = \langle \overset{\text{(efmv)}}{\mathbf{C}} \left( \overset{\text{(ogp)}}{\mathbf{I}} + \overset{\text{(logp)}}{\mathbf{B}} \cdot \overset{\text{(ogp)}}{\mathbf{C}} \right)^{-1} \rangle \cdot \langle \left( \overset{\text{(ogp)}}{\mathbf{I}} + \overset{\text{(logp)}}{\mathbf{B}} \cdot \overset{\text{(ogp)}}{\mathbf{C}} \right)^{-1} \rangle^{-1}$ ;  $\overset{\text{(logp)}}{\mathbf{C}} = \overset{\text{(efmv)}}{\mathbf{C}} - \langle \overset{\text{(efmv)}}{\mathbf{C}} \rangle$ ;  $\overset{\text{(ogp)}}{\mathbf{B}} =$   
 $= \frac{1}{4\pi} \int_{S_1} \overset{\text{(ogp)}}{\mathbf{K}}(Ak) dS$ ;  $\overset{\text{(ogp)}}{\mathbf{K}} = -\text{def} \overset{\text{(mv)}}{\mathbf{G}} \text{def}$ ;  $\overset{\text{(mv)}}{\mathbf{G}}$  – тензорная функция Грина минеральной  
 матрицы с включениями (трехмерной сплошной среды со свойствами  $\langle \overset{\text{(efmv)}}{\mathbf{C}} \rangle$ );  $\overset{\text{(ogp)}}{\mathbf{K}}(k)$  –  
 преобразование Фурье-ядра  $\overset{\text{(ogp)}}{K}_{ijkl}(x-x')$ .

В свою очередь нечеткий аналог  $\overset{\text{(eftgp)}}{\mathbf{C}}$  можно получить путем применения к выражению (11) принципа обобщения.

Используя разработанный метод моделирования, была получена мультифрактальная математическая модель породного массива относительно деформационных свойств. Данная модель совпадает с мультифрактальной моделью горной породы относительно деформационных свойств, описываемой выражением (11), и отличается только параметрами фрактальных сред.

Математические модели, составляющие теоретические основы мультифрактального моделирования функциональных задач в части определения тепло- и электропроводных свойств, получаются в рамках метода тепло-электро-механической аналогии. Так для минералов мультифрактальные математические модели относительно процессов тепло- и электропроводности соответственно имеют следующий вид:

$$\overset{\text{(efm)}}{\mathbf{k}} = \langle \overset{\text{(m)}}{\mathbf{k}} \left( \overset{\text{(m)}}{\mathbf{W}} + \overset{\text{(lm)}}{\mathbf{\Omega}} \cdot \overset{\text{(m)}}{\mathbf{k}} \right)^{-1} \rangle \cdot \langle \left( \overset{\text{(m)}}{\mathbf{W}} + \overset{\text{(lm)}}{\mathbf{\Omega}} \cdot \overset{\text{(m)}}{\mathbf{k}} \right)^{-1} \rangle, \quad (12)$$

где  $\overset{\text{(m)}}{\mathbf{W}}$  – единичный двухвалентный тензор;  $\overset{\text{(efm)}}{\mathbf{k}}$  – эффективный тензорный коэффициент теплопроводности минерала;  $\overset{\text{(m)}}{\mathbf{k}}$  – тензорный коэффициент теплопроводности зерна минерала;  $\overset{\text{(m)}}{\mathbf{\Omega}} = \frac{1}{4\pi} \int_{S_1} \overset{\text{(m)}}{\mathbf{D}}(Ak) dS$ ;  $\overset{\text{(m)}}{\mathbf{D}}(Ak)$  – преобразование Фурье-ядра  $\overset{\text{(m)}}{D}_{ij}(x)$ ,

представляющего собой вторую производную функцию Грина матрицы, свойства которой характеризуется тензором  $\langle \overset{\text{(m)}}{\mathbf{k}} \rangle$ ;  $\overset{\text{(m)}}{\mathbf{k}} = \overset{\text{(lm)}}{\mathbf{k}} - \langle \overset{\text{(m)}}{\mathbf{k}} \rangle$ .

$$\overset{\text{(efm)}}{\boldsymbol{\lambda}} = \langle \overset{\text{(m)}}{\boldsymbol{\lambda}} \left( \overset{\text{(m)}}{\mathbf{W}} + \overset{\text{(lm)}}{\boldsymbol{\Psi}} \cdot \overset{\text{(m)}}{\boldsymbol{\lambda}} \right)^{-1} \rangle \cdot \langle \left( \overset{\text{(m)}}{\mathbf{W}} + \overset{\text{(lm)}}{\boldsymbol{\Psi}} \cdot \overset{\text{(m)}}{\boldsymbol{\lambda}} \right)^{-1} \rangle, \quad (13)$$

где  $\overset{\text{(efm)}}{\boldsymbol{\lambda}}$  – эффективный тензорный коэффициент удельной электропроводности минерала;  $\overset{\text{(m)}}{\boldsymbol{\lambda}}$  – тензорный коэффициент удельной электропроводности зерна;  $\overset{\text{(m)}}{\boldsymbol{\Psi}} = \frac{1}{4\pi} \int_{S_1} \overset{\text{(m)}}{\mathbf{T}}(Ak) dS$ ;

$T^{(m)}(Ak)$  – преобразование Фурье-ядра  $T_{ij}^{(m)}(x)$ , представляющего собой вторую производную функцию Грина матрицы, характеризующейся тензором  $\langle \lambda^{(m)} \rangle$ ;  $\lambda^{(m)} = \lambda^{(1m)} - \langle \lambda^{(m)} \rangle$ .

Остальные мультифрактальные математические модели, позволяющие определить эффективные тензорные коэффициенты теплопроводности и удельной электропроводности минералов с наполненными флюидом порами, минералов с флюидными включениями и горных пород, могут быть получены применением метода аналогий с моделями, сводящимися к выражениям (7), (9) и (11).

Используя полученные выражения для расчета эффективных деформационных свойств геоматериалов, была разработана совокупность моделей, составляющих теоретические основы мультифрактального моделирования функциональных задач в части определения величины внешнего поля напряжений, действующего на породный массив. Главной математической моделью в данной совокупности является перколяционная модель экспериментального исследования образования трещин в породном массиве под действием внешней нагрузки, которая является основой для эффективного решения рассматриваемой функциональной задачи. В виду невозможности представления ее в символьном виде, она была сведена к следующему обобщенному алгоритму.

1. В прибортовом участке породного массива выбрать пласт, для которого необходимо определить величину внешнего поля напряжения. Выбрать вид минерала, исследование которого позволит определить величину внешнего поля напряжений.
2. Посредством портативного оптического микроскопа получить микрофотографии структур рассматриваемого вида минерала в плоскости  $YOZ$ , входящего в состав исследуемого пласта.
3. Среди полученных микрофотографий выбрать одну, на которой присутствует вертикально-ориентированная трещина.
4. Посредством методов фотограмметрии на выбранной микрофотографии определить длину  $d$  вертикально-ориентированной трещины.
5. С помощью экспериментальных методов построить трехмерную фигуру минерала (представляемого в виде сплошной среды), плоская структура которого представлена на выбранной микрофотографии. Полученную фигуру минерала аппроксимировать многогранником – параллелепипедом, тетраэдром и др. Разбить данный многогранник на одинаковые кубики, объем каждого из которых равен среднему объему зерна рассматриваемого вида минерала в исследуемом пласте. В результате будет получена трехмерная перколяционная решетка минерала.
6. Разделить полученную трехмерную решетку на совокупность слоев параллельных плоскости  $YOZ$ . Каждому такому слою сопоставить двухмерную перколяционную решетку. Например, для трехмерной решетки, имеющей вид прямоугольного параллелепипеда, слой и соответствующий ему плоский аналог представлены на рисунке 2.

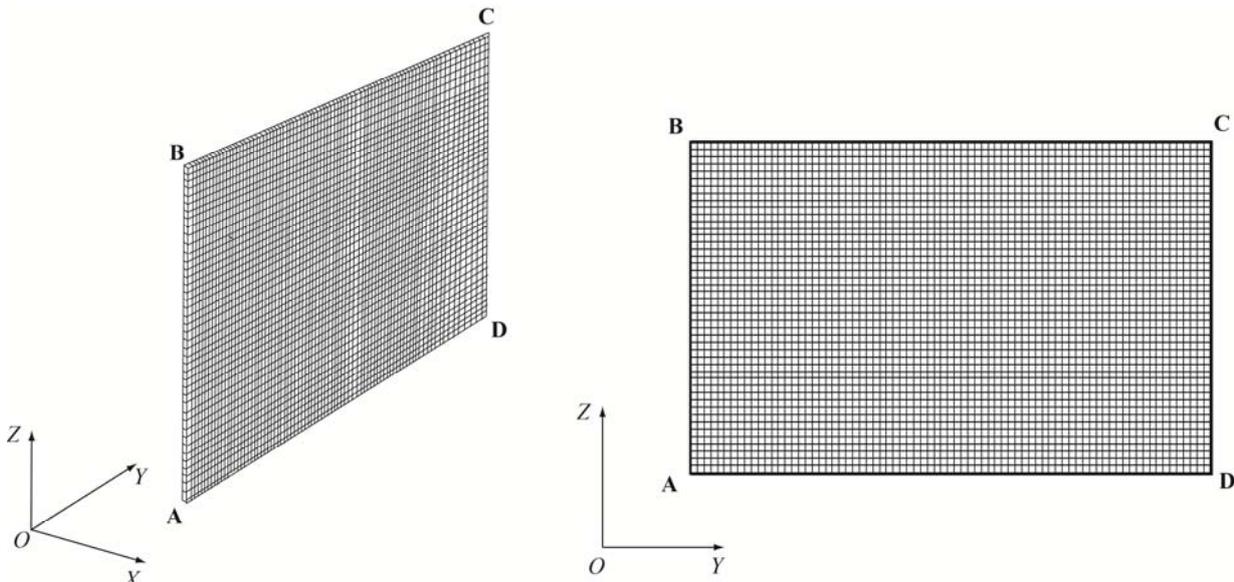


Рисунок 2 – Слой трехмерной перколяционной решетки и его плоский аналог

7. Для зерен рассматриваемого вида минерала определить предел прочности  $\sigma_p$  на растяжение. Главному значению  $\sigma_3$  тензора внешнего поля напряжений  $\sigma^{(0\text{тpм})}$  задать начальное приближение  $\sigma_p$ , т.е.  $\sigma_3 \leftarrow \sigma_p$ .

8. Рассчитать текущее значение величины внешнего поля напряжений  $\sigma^{(0\text{тpм})}$ , действующего

на породный массив –  $\sigma^{(0\text{тpм})} \leftarrow \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix}$ .

9. Определить текущую вероятность разрушения  $P_{RD}$  в исследуемой трехмерной перколяционной решетке.

9.1. Для рассматриваемого пласта определить значения величин, являющихся входными параметрами в мультифрактальных математических моделях зерна относительно поля напряжений, и зерна с наполненной флюидом порой относительно поля давлений.

9.2. Посредством нижеследующей процедуры определить вероятность  $P(A)$  разрушения зерна с наполненной флюидом порой под действием поля напряжений и вероятность  $P(B)$  его разрушения под действием поля давлений.

$q_A \leftarrow 0; q_B \leftarrow 0;$

$\{ \varphi, \theta, \psi - \text{углы Эйлера. В качестве конечного значение счетчиков цикла принято значение } 11\pi/12 \text{ и } 23\pi/12 \text{ поскольку } \varphi(0) = \varphi(\pi), \theta(0) = \theta(2\pi), \psi(0) = \psi(2\pi) \}$

Цикл  $\varphi = 0$  до  $11\pi/12$  с шагом  $\pi/12$

Цикл  $\theta = 0$  до  $23\pi/12$  с шагом  $\pi/12$

Цикл  $\psi = 0$  до  $23\pi/12$  с шагом  $\pi/12$

$$\begin{aligned}
& \overset{(nz)}{\sigma}(\varphi, \theta, \psi) \leftarrow \overset{(nz)}{C}(\varphi, \theta, \psi) \left( \overset{(nz)}{I} + \overset{(1nz)}{B} \cdot \overset{(nz)}{C}(\varphi, \theta, \psi) \right)^{-1} \times \\
& \times \left\langle \overset{(nz)}{C}(\varphi, \theta, \psi) \left( \overset{(nz)}{I} + \overset{(1nz)}{B} \cdot \overset{(nz)}{C}(\varphi, \theta, \psi) \right)^{-1} \right\rangle^{-1} \cdot \left\langle \overset{(nz)}{C}(\varphi, \theta, \psi) \left( \overset{(nz)}{I} + \overset{(1nz)}{B} \cdot \overset{(nz)}{C}(\varphi, \theta, \psi) \right)^{-1} \right\rangle \times \\
& \times \left\langle \left( \overset{(nz)}{I} + \overset{(1nz)}{B} \cdot \overset{(nz)}{C}(\varphi, \theta, \psi) \right)^{-1} \right\rangle^{-1} \cdot \left( \overset{(tgp)}{I} + \overset{(1tgp)}{H} \cdot \overset{(tgp)}{C} \right)^{-1} \cdot \left[ \overset{(tgp)}{I} + \frac{1}{r} \int \overset{(tgp)}{K}(\mathbf{x} - \mathbf{x}') \cdot \overset{(tgp)}{\Phi}(\mathbf{x} - \mathbf{x}') d\mathbf{x}' \right]^{-1} \times \\
& \times \left( \overset{(tpm)}{I} + \overset{(1tpm)}{H} \cdot \overset{(tpm)}{C} \right)^{-1} \cdot \left[ \overset{(tpm)}{I} + \frac{1}{n} \int \overset{(tpm)}{K}(\mathbf{x} - \mathbf{x}') \cdot \overset{(tpm)}{\Phi}(\mathbf{x} - \mathbf{x}') d\mathbf{x}' \right]^{-1} \cdot \overset{(eftpm)}{C}' \cdot \overset{(0tpm)}{\sigma};
\end{aligned}$$

Если  $\overset{(nz)}{\sigma}_{11}(\varphi, \theta, \psi) \geq \sigma_p$  или  $\overset{(nz)}{\sigma}_{22}(\varphi, \theta, \psi) \geq \sigma_p$ , то увеличить на 1 число состояний (ориентаций зерна в пространстве)  $q_A$ , при которых происходит разрушение зерна посредством поля напряжений;  $\{q_A \leftarrow q_A + 1\}$

$$\begin{aligned}
p\delta^{ij}(\varphi, \theta, \psi) \leftarrow p_0 \overset{(nzp)}{I}^{ijkl} \left( \overset{(nzp)}{I}^{klmn} + \overset{(nzp)}{B}^{klpq} \left( p_0 \overset{(nz)}{I}^{pqmn} - \overset{(nz)}{C}^{pqmn}(\varphi, \theta, \psi) \right) \right)^{-1} \times \\
\times \left( \overset{(nz)}{C}^{mnsd}(\varphi, \theta, \psi) \right)^{-1} \overset{(nz)}{\sigma}_{sd}(\varphi, \theta, \psi);
\end{aligned}$$

Если  $p(\varphi, \theta, \psi) > \frac{1}{5} \sigma_p$ , то увеличить на 1 число состояний  $q_B$ , при которых происходит разрушение зерна посредством поля давлений;  $\{q_B \leftarrow q_B + 1\}$

Конец цикла  $\psi$ ; конец цикла  $\theta$ ; конец цикла  $\varphi$ ;

$P(A) \leftarrow q_A / w$ ;  $P(B) \leftarrow q_B / w$ ;  $\{\text{число возможных состояний } w \text{ отдельного зерна с наполненной флюидом порой в рамках рассматриваемого алгоритма равно } 13824\}$

9.3  $P_{RD} \leftarrow P(A) + P(B)$ ;

10. Для каждой двумерной перколяционной решетки, полученной на шаге 6, провести компьютерный эксперимент, заключающийся в следующем.

Вначале все квадраты рассматриваемой двумерной перколяционной решетки установить в состояние "свободно от трещины" и закрасить в белый цвет. Далее, для каждого квадрата из рассматриваемой решетки с помощью генератора равномерно распределенных случайных чисел сгенерировать случайное число  $P$  от 0 до 1. Если полученное значение  $P$  окажется меньше вероятности  $P_{RD}$  разрушения зерна с наполненной флюидом порой, то квадрат переходит в состояние "занято трещиной" и закрашивается в черный цвет. В противном случае, квадрат сохраняет свое состояние – "свободно от трещины". Например, для рассматриваемой трехмерной перколяционной решетки некоторые из возможных результатов данного действия представлены на рисунке 3.

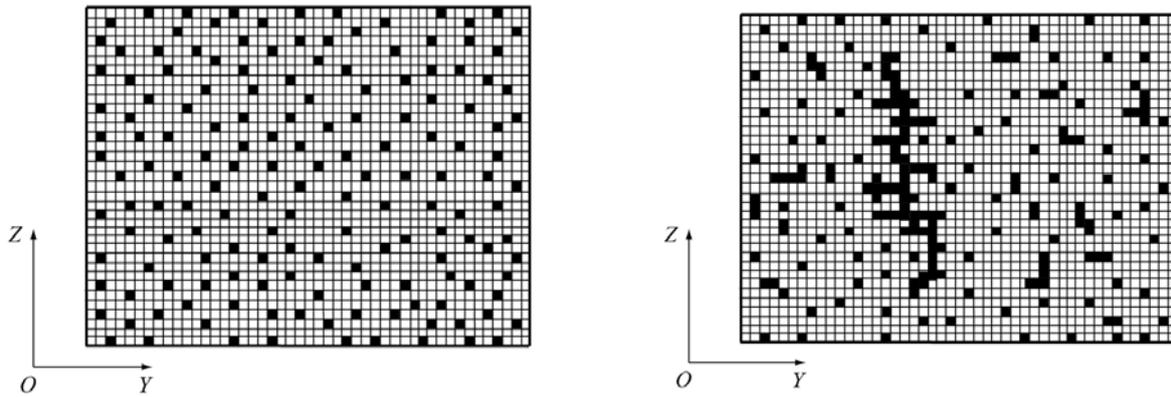


Рисунок 3 – Примеры результатов моделирования для двухмерных решеток

11. Если в каждой двухмерной решетке реализуется конечный кластер, линейный размер которого равен или превышает длину трещины  $d$ , то экспериментальному значению компоненты внешнего поля напряжений  $\sigma_3^{(ext)}$  присвоить значение  $\sigma_3$  и перейти к шагу 12; иначе увеличить  $\sigma_3$  на величину  $z$  (по умолчанию  $z = 10^3 \text{ Па}$ ) и перейти к шагу 8.

12. Определить параметры  $\sigma_2^{(ext)}$ . Процедура определения значения данного компонента идентична вышеприведенной (шаги 2-11), отличаясь следующим: 1) на 2 шаге используется микрофотография, содержащая горизонтально-ориентированную трещину; 2) на шагах 7 и 9 вместо  $\sigma_3$  использовать  $\sigma_2$ , и наоборот, т.е. выполнить замену  $\sigma_3 \leftrightarrow \sigma_2$ ; 3) на шаге 8 в качестве текущего значения величины внешнего поля напряжений  $\sigma^{(0\text{rpm})}$  используется

тензор  $\sigma^{(0\text{rpm})} \leftarrow \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ ; 3) на шаге 11 выполнить замены  $\sigma_3^{(ext)} \leftrightarrow \sigma_2^{(ext)}$  и  $\sigma_3^{(ext)} \leftrightarrow \sigma_2^{(ext)}$ .

13.  $\sigma^{(0\text{rpm})} \leftarrow \begin{pmatrix} \sigma_1^{(ext)} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2^{(ext)} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3^{(ext)} \end{pmatrix}$ , где  $\sigma_2^{(ext)} = \sigma_1^{(ext)}$ .

14. Вывод: величина внешнего поля напряжений, действующего на массив, равна  $\sigma^{(0\text{rpm})}$ .

**В третьей главе** разработан высокоуровневый программный фреймворк (каркас), детализация которого позволяет спроектировать и реализовать программное обеспечение АСНИ, АСУ ТП и других систем, функциональные задачи которых связаны с определением напряженно-деформированного состояния, коэффициентов тепло- и электропроводности объектов мультифрактальной структуры, аутентификации, резервного копирования данных и других административных подзадач.

Перейдем к следующему этапу каркасного метода разработки АС. Он заключается в разработке каркаса математического обеспечения АС, являющегося основой для

эффективного решения функциональных задач в нескольких предметных областях. С этой целью посредством обобщения полученных во второй главе теоретических основ мультифрактального математического моделирования функциональных задач были разработаны алгоритмы, предназначенные для определения физических свойств и действующего внешнего поля напряжений на объекты мультифрактальной структуры (геоматериалов, металлов, композиционных и конструкционных материалов, гидросмесей, неоднородных жидкостей и др.). Полученные таким способом алгоритмы и обобщенные математические модели составляют каркас математического обеспечения АС.

Далее, путем анализа полученных алгоритмов, а также функциональных задач административного характера (планирование задач и событий; учет образцов и др.) в рамках пятой стадии используемого метода был разработан каркас информационного обеспечения АСНИ и АСУ ТП в горной промышленности. Основу данного обеспечения составляют клиент-серверные базы данных, содержащие всю необходимую информацию для выполнения функциональных задач АСНИ и АСУ ТП как административного, так и специального назначения (определение деформационных, тепло- и электропроводных свойств объектов, и др.)

В результате, согласно предложенному методу, используя полученные математическое и информационное виды обеспечения разработана, и впоследствии с помощью среды Embarcadero C++ Builder 10.3, реализована и протестирована архитектура высокоуровневого фреймворка (каркаса) ПО АСНИ и АСУ ТП. На верхнем уровне полученная архитектура имеет следующий вид (рисунок 4).

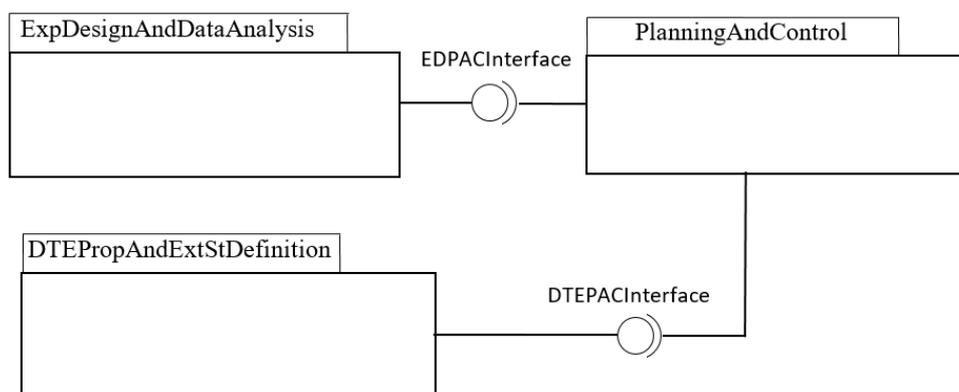


Рисунок 4 – Архитектура высокоуровневого фреймворка (каркаса) ПО АСНИ и АСУ ТП

В представленную архитектуру входят три пакета классов, предназначенных для автоматизации функциональных задач АСНИ и АСУ ТП. Главный из них – "PlanningAndControl", обеспечивает взаимодействие всех представленных в архитектуре пакетов и служит для выполнения функций аутентификации пользователей, планирования задач и событий, резервного копирования и восстановления данных, формирования отчетов, осуществления учета материалов и ресурсов.

Пакет "ExpDesignAndDataAnalysis" содержит классы, коллективное взаимодействие

которых позволяет осуществлять функциональную задачу анализа данных. И наконец, заключительный пакет – "DTEPropAndExtStDefinition" обеспечивает функциональность, связанную с определением деформационных, тепло- и электропроводных свойств мультифракталов, а также позволяет определить величину внешнего поля напряжений, действующего на исследуемые объекты.

**В четвертой главе** разработаны АСНИ физических процессов горного производства и АСУ ТП забивки свай в оползнеопасные участки породных массивов.

Полученный высокоуровневый программный фреймворк может быть использован для разработки многих АС в горной промышленности и других областях автоматизации. В связи с поставленными целями рассматриваемой работы были разработаны АСНИ физических процессов горного производства и АСУ ТП забивки свай в оползнеопасные участки породных массивов. Разработка рассматриваемой АСНИ была осуществлена в рамках выполнения стадий, представленных в правой части потока управления предложенного каркасного метода (рисунок 1). В результате были определены цели АСНИ, приведено ее описание, включающее информацию о каркасном взаимодействии и характеристиках ТО АС. Также с помощью диаграмм и сценариев вариантов использования описаны требования к функциональным задачам АСНИ. Далее, ввиду того, что для решения единственной не покрываемой программным фреймворком функциональной задачи (разработке математических моделей разрушения) не требуется реализация стадии «Математическое моделирование и алгоритмизация дополнительных основных функциональных задач», была выполнена стадия «Разработка AI-решений дополнительных основных функциональных задач». В рамках рассматриваемой работы данная стадия сводится к разработке экспертной системы принятия решений в области построения математических моделей разрушения геоматериалов.

Как известно, во всех применяемых на данный момент методологиях разработки экспертных систем в качестве фактов используются эвристики, т.е. эмпирические знания, упрощающие или ограничивающие поиск решения задач в соответствующей предметной области. И это неудивительно, поскольку именно эвристики являются той основой, позволяющей экспертным системам реализовать свое предназначение, заключающееся в решении прикладных задач, не поддающихся строгому математическому анализу и алгоритмизации. Предлагаемая экспертная система в этом плане не является исключением. Для решения своей основной задачи – определения теории моделирования, в рамках которой для рассматриваемой прикладной задачи горного производства следует моделировать процесс разрушения исследуемого геоматериала, – предлагаемая экспертная система должна использовать эвристики, получаемые путем неформализованного анализа большого количества научных работ.

В то же время определение теории моделирования существенно зависит от анализа структурных особенностей разрушаемых геоматериалов (их анизотропности,

неоднородности и др.). При этом данный анализ не является предметом эвристического подхода и должен быть выполнен на основе соответствующих алгоритмов, разрабатываемых с помощью методологии математического моделирования.

Следовательно, решение задачи определения теории моделирования, поддается частичной алгоритмизации, но, в общем и целом, требует применения эвристик. К сожалению, ни одна из существующих методологий разработки экспертных систем не учитывает возможность частичной алгоритмизации процесса решения прикладных задач и полностью опирается на применение эвристик и логического вывода. Поэтому был предложен новый гибридный метод разработки экспертных систем, при котором базу знаний составляют факты в виде правил и программные реализации алгоритмов, а механизм логического вывода в качестве модели представления знаний использует взвешенный ориентированный граф. В результате была получена следующая архитектура экспертной системы поддержки принятия решений в области построения математических моделей разрушения геоматериалов (рисунок 5).

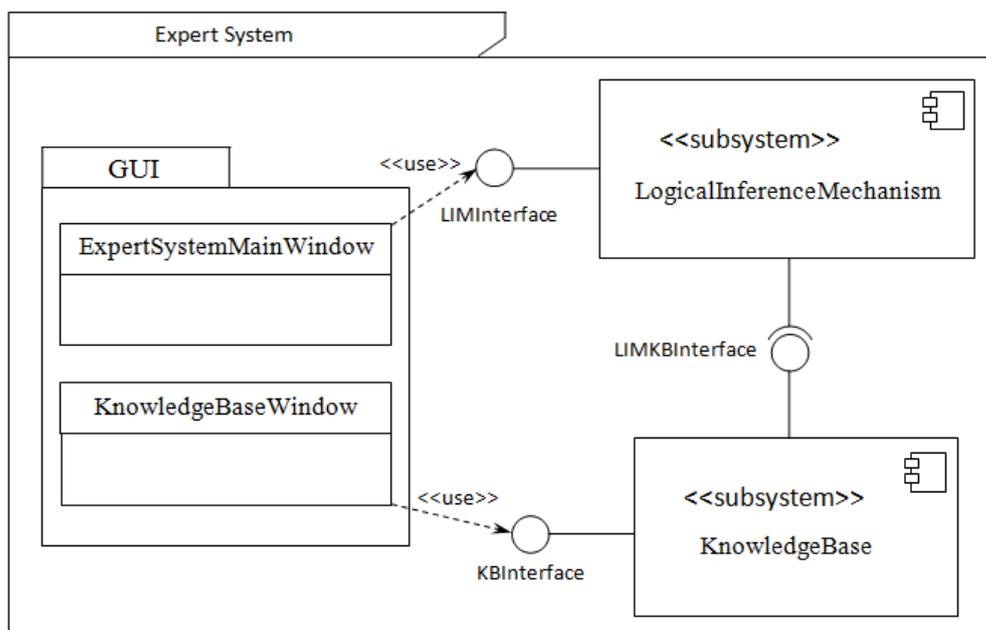


Рисунок 5 – Архитектура экспертной системы поддержки принятия решений в области построения математических моделей разрушения геоматериалов

В представленной архитектуре присутствует две подсистемы и один пакет. Подсистемы "KnowledgeBase" и "LogicalInferenceMechanism" представляют собой соответственно базу знаний и механизм логического вывода. При этом подсистема "KnowledgeBase" играет роль сервера по отношению к "LogicalInferenceMechanism". Графические окна "ExpertSystemMainWindow" и "KnowledgeBaseWindow" составляют пакет "GUI" – графического интерфейса пользователя и посредством интерфейсов "LIMInterface" и "KBInterface" обеспечивают взаимодействие подсистем с пользователем.

Детализированную архитектуру подсистемы "KnowledgeBase" формируют четыре

класса – "Fact" (отвечающий за факты базы знаний), "Rule" (абстрактный класс для хранения правил), "SIOfAlgorithm" (абстрактный класс для хранения путей к программным реализациям алгоритмов) и "ControlKB" (управляющий класс, отвечающий за функциональность подсистемы – выборку, обновление, добавление и удаление фактов). Для реализации классов "Fact" и "ControlKB" были разработаны алгоритмы и правила, входящие в базу знаний разрабатываемой экспертной системы. В составе рассматриваемой базы знаний реализована совокупность правил вида IF-(AND)-THEN, а также алгоритмы анализа геоматериала на предмет принадлежности к объектам природно- (или незавершенно-) мультифрактальной структуры, адекватно описываемого изотропной или анизотропной сплошной средой, адекватно описываемого однородной или неоднородной сплошной средой, а также алгоритмы идентификаций математической теории трещин, линейной и нелинейной механики разрушения, теории накопления повреждений при усталостном разрушении и теории линейного накопления повреждений.

В свою очередь подсистему "LogicalInferenceMechanism" формируют два класса "ModelOR" и "ControlLIM". Первый из них реализует модель формирования рассуждений рассматриваемой экспертной системы. Второй класс "ControlLIM" является управляющим и отвечает за загрузку фактов в объект класса "ModelOR", нахождение решения и отображения пользователю хода рассуждений системы. К сожалению, ни одна из существующих моделей формирования рассуждений не в состоянии функционировать с фактами, представленными в виде правил и программных реализаций алгоритмов. Ситуацию осложняет и то, что в процессе логического вывода во многих прикладных задачах критерию эффективности соответствует не одна, а несколько теорий моделирования, из которых требуется сделать наилучший выбор.

Для решения данной проблемы было предложено в качестве модели формирования рассуждений использовать взвешенный ориентированный граф, вершины которого представляют собой теории моделирования, соответствующие фактам из базы знаний. При этом в ходе формирования логического вывода для определения приоритетов активизации фактов, каждому ребру в графе ставится в соответствие некоторое число (вес), принимающее значения 0; 0,5 и 1.

Таким образом, функционирование механизма логического вывода сводится к формированию в зависимости от ответов пользователей одного или нескольких путей во взвешенном ориентированном графе, вершины которого соответствуют фактам. При этом конечная вершина данных путей будет соответствовать искомой теории, применение которой в рамках решаемой прикладной задачи позволит получить наиболее адекватную математическую модель разрушения геоматериалов.

Далее, согласно следующим стадиям предложенного метода посредством механизмов наследования и агрегации, а также последовательного добавления дополнительных классов в представленный высокоуровневый каркас, с помощью C++

Builder 10.3 и программного стека WAMP разработано и протестировано ПО АСНИ физических процессов горного производства. Архитектура ПО рассматриваемой АСНИ имеет следующий вид (рисунок 6).

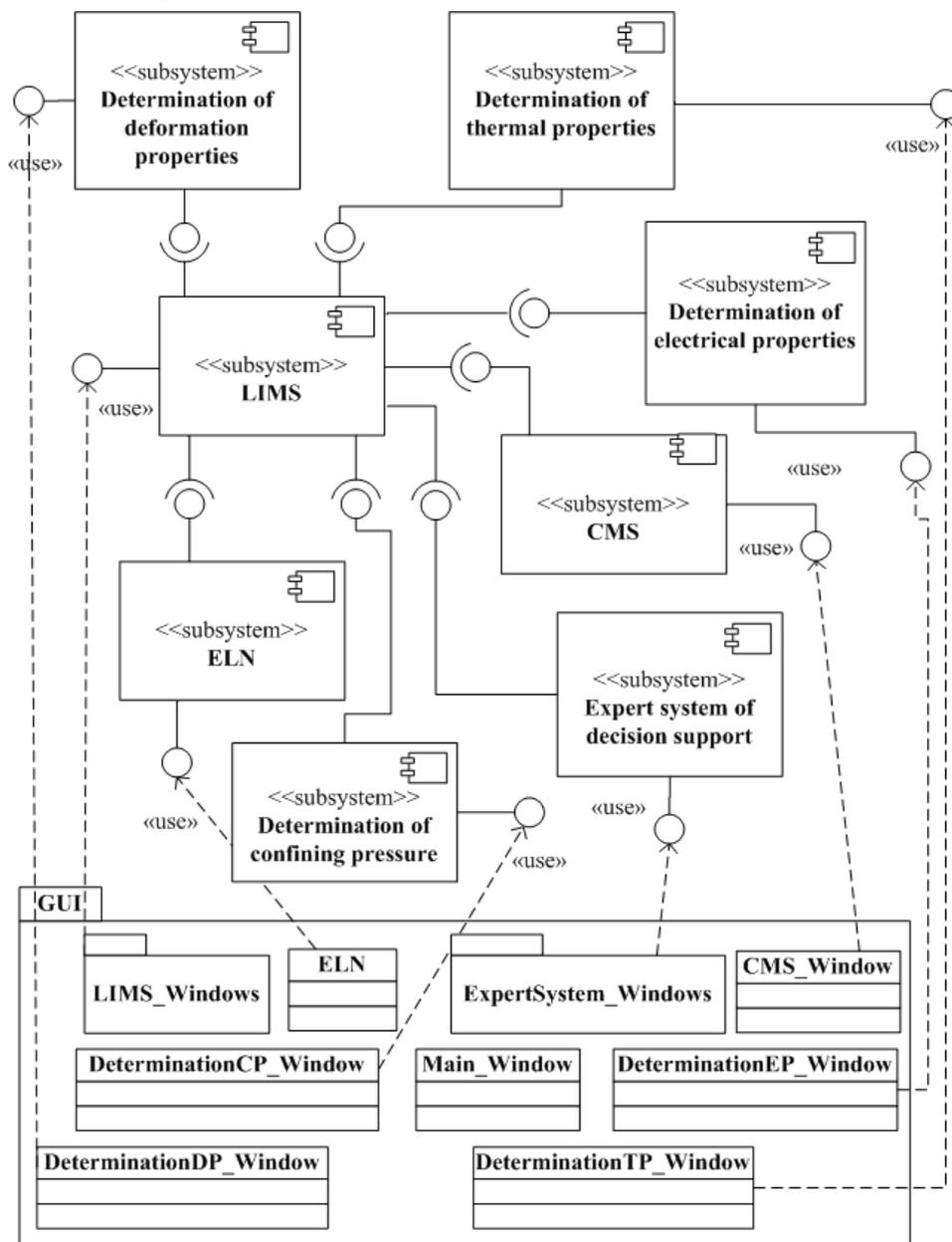


Рисунок 6 – Архитектура ПО АСНИ физических процессов горного производства

Представленная архитектура состоит из восьми подсистем и пакета графического интерфейса пользователя (GUI – graphical user interface). При этом взаимодействие пользователя с данными подсистемами осуществляется с помощью совокупности графических окон, составляющих пакет "GUI". Подсистема "LIMS" предназначена для автоматизации административных функциональных задач АСНИ физических процессов горного производства и реализуется классами, наследуемыми от экземпляров рассмотренных ранее пакетов "PlanningAndControl" и "ExpDesignAndDataAnalysis".

Подсистемы "Determination of deformation properties", "Determination of thermal

properties", "Determination of electrical properties" реализуют специализированные функциональные задачи определения деформационных, тепло- и электропроводных свойств изучаемых геоматериалов.

Как известно, основным видом информации, получаемой на выходе любой АСНИ, являются обработанные или обобщенные экспериментальные данные, а также самое главное – построение и (или) исследование на их основе математических моделей. Поэтому в состав предлагаемой АСНИ включена подсистема компьютерного моделирования "CMS".

Следующие подсистемы "Determination of confining pressure" и "Expert System of decision support" реализуют соответственно сервисы определения величины внешнего поля напряжения, действующего на породный массив, и подробно рассмотренной ранее экспертной системы поддержки принятия решений. Последняя подсистема "ELN" соответствует электронному лабораторному журналу, систематизирующему всю информацию, получаемую в результате функционирования вышеописанных подсистем.

На основе полученных результатов произведено специфицирование ТО АСНИ. В результате была выбрана следующая схема развертывания, состоящая из четырех узлов.

Первый узел представляет собой микроскоп, предназначенный для микрофотографирования исследуемого геоматериала в трех плоскостях. Второй узел указывает на совокупность автоматизированных рабочих мест, на каждом из которых развертываются два компонента ASSR и CMS.exe. Первый из них является реализацией вышеописанной программной архитектуры (рисунок 6). Второй компонент представляет собой исполняемый файл CMS. И наконец, последним узлом рассматриваемой АСНИ является сервер "Database Management System". Данный сервер, связанный с автоматизированными рабочими местами посредством узла "Router", предназначен для хранения экспериментальных данных, результатов математического моделирования и другой административной информации.

Разработка АСУ ТП забивки свай в оползнеопасные участки породных массивов, так же как и для вышерассмотренной АСНИ, осуществлялась в рамках выполнения стадий, представленных в правой части потока управления предложенного каркасного метода (рисунок 1). В результате были определены цели АСУ ТП, приведено ее описание, включающее информацию о каркасном взаимодействии и характеристиках ТО АС. Также с помощью диаграмм и сценариев вариантов использования описаны требования к функциональным задачам АСУ ТП. Далее, ввиду того, что для решения единственной не покрываемой программным фреймворком основной функциональной задачи – определения оптимальной осевой нагрузки ударника на наголовник сваи – не требуется реализация «Разработка AI-решений дополнительных основных функциональных задач» была осуществлена стадия «Математическое моделирование и алгоритмизация дополнительных основных функциональных задач». В результате был получен следующий алгоритм определения оптимальной осевой нагрузки ударника на наголовник сваи.

1. На основе геологических и геофизических данных построить трехмерную модель участка породного массива, в который погружается свая. Представленная модель должна быть разделена на секторы, отражающие в соответствующем масштабе границы горных пород с указанием их минералогического состава.
2. С помощью выше разработанного метода определить величины представительных объемов горных пород исследуемого участка и его составляющих минералов, минералов с наполненными флюидом порами, минералов с флюидными включениями. Если для определенных горных пород присутствуют нулевые значения, то осуществить вывод: результаты перколяции в прибортовом участке на уровне горных пород с нулевыми значениями представительных объемов носят качественный характер (относительная погрешность получаемых результатов превышает 15%).
3. Разбить полученную трехмерную модель на совокупность кубиков, объем каждого из которых равен максимальной величине  $V_{MAX}$  из представительных объемов  $V_{PP}[1..q]$  минералов с наполненными флюидом порами, слагающих данные пласты. В результате будет получена глобальная трехмерная перколяционная решетка исследуемого участка.
4. Разделить полученную глобальную трехмерную решетку на совокупность слоев параллельных плоскости  $YOZ$ . Каждому такому слою сопоставить двухмерную перколяционную решетку. В результате – получить совокупность из  $k$  глобальных двухмерных перколяционных решеток.
5. Определить совокупность проектных значений площадей осевых сечений  $S_{occ}[1..l]$  погруженной сваи в соответствующие горные породы.
6. Определить начальные значения величин внешних полей напряжений  $\sigma^{(0tgp)}[1..l]$ , действующих на горные породы рассматриваемого прибортового участка ( $l$  – общее количество горных пород).
7. Критическим значениям величин внешних полей напряжений  $\sigma^{(0ctgp)}[1..l]$ , при которых в каждой глобальной двухмерной перколяционной решетке реализуется приоткосный кластер (бесконечный вертикальный кластер, площадь квадратов которого в каждом из секторов равна или немного превышает проектные значения  $S_{occ}[1..l]$ ), присвоить значения  $\sigma^{(0tgp)}[1..l]$ .
8. Булевой переменной  $m$ , указывающей на наличие приоткосного кластера в каждой из глобальной двухмерных перколяционных решеток, присвоить значение равное 0.
9. Цикл Пока  $m = 0$  делать нижеследующую процедуру.
  - 9.1. Цикл  $i = 1$  до  $k$  с шагом 1.
  - 9.2. Для каждого кубика  $i$  –  $й$  глобальной двухмерной перколяционной решетки выполнить нижеследующие действия.
    - 9.2.1. Определить номер сектора  $\alpha$  перколяционной решетки (каждый сектор соответствует

горной породе рассматриваемого приборного участка), в котором находится кубик.

9.2.2. В соответствии с номером сектора  $\alpha$  сгенерировать случайное число  $\beta = 1 \div \eta$ , определяющее вид минерала с порами ( $\eta$  – количество видов минералов, слагающих пласт, характеризующихся параметром  $\alpha$ ).

9.2.3. Построить локальную трехмерную перколяционную решетку, имеющую форму куба и объем, равный  $V_{MAX}$ . Размеры каждого кубика данной решетки установить равным среднему размеру объема минерала с наполненными флюидом порами, вид которого определяется величиной  $\beta$ .

9.2.4. Разделить полученную локальную трехмерную решетку на совокупность слоев параллельных плоскости  $YOZ$ . Каждому такому слою сопоставить двухмерную перколяционную решетку.

9.2.5. Для зерен рассматриваемого вида минерала, определяемого параметром  $\beta$ , установить предел прочности  $\sigma_p$  на растяжение.

9.2.6. Определить входные параметры мультифрактальных математических моделей зерна относительно поля напряжений и зерна с наполненной флюидом порой относительно поля давлений. Если какие-либо из данных параметров имеют нечеткий вид, то посредством вычисления модальных значений привести их к четким величинам.

9.2.7. Посредством нижеследующей процедуры определить текущую вероятность разрушения  $P_{RD}$  в локальной трехмерной перколяционной решетке.

$q_A \leftarrow 0; q_B \leftarrow 0;$

Цикл  $\varphi = 0$  до  $11\pi/12$  с шагом  $\pi/12$  {  $\varphi, \theta, \psi$  – углы Эйлера }

Цикл  $\theta = 0$  до  $23\pi/12$  с шагом  $\pi/12$ ;

Цикл  $\psi = 0$  до  $23\pi/12$  с шагом  $\pi/12$

$$\begin{aligned} \sigma^{(nz)}(\varphi, \theta, \psi) &\leftarrow C^{(nz)}[\beta](\varphi, \theta, \psi) \left( I + B^{(nz)}[\beta] \cdot C^{(1nz)}[\beta](\varphi, \theta, \psi) \right)^{-1} < C^{(nz)}[\beta](\varphi, \theta, \psi) \times \\ &\times \left( I + B^{(nz)}[\beta] \cdot C^{(1nz)}[\beta](\varphi, \theta, \psi) \right)^{-1} >^{-1} < C^{(nz)}[\beta](\varphi, \theta, \psi) \left( I + B^{(nz)}[\beta] \cdot C^{(1nz)}[\beta](\varphi, \theta, \psi) \right)^{-1} > \times \\ &\times < \left( I + B^{(nz)}[\beta] \cdot C^{(1nz)}[\beta](\varphi, \theta, \psi) \right)^{-1} >^{-1} \cdot \left( I + H^{(tgp)}[\beta] \cdot C^{(1tgp)}[\beta] \right)^{-1} \times \\ &\times \left[ I + \frac{1}{r} \int K^{(tgp)}[\alpha](x - x') \cdot \Phi^{(tgp)}[\alpha](x - x') dx' \right]^{-1} \cdot C'^{(eftgp)}[\alpha] \cdot \sigma^{(0ctgp)}[\alpha]; \end{aligned}$$

Если  $\sigma_{11}^{(nz)}(\varphi, \theta, \psi) \geq \sigma_p$  или  $\sigma_{22}^{(nz)}(\varphi, \theta, \psi) \geq \sigma_p$ , то увеличить на 1 число состояний (ориентаций зерна в пространстве)  $q_A$ , при которых происходит разрушение зерна посредством поля напряжений; {  $q_A \leftarrow q_A + 1$  }

$$p\delta^{ij}(\varphi, \theta, \psi) \leftarrow p_0[\beta] \cdot I^{ijkl} \left( I^{klmn} + B^{(nzp)klpq}[\beta] \left( p_0[\beta] \cdot I^{pqmn} - C^{(nz)pqmn}[\beta](\varphi, \theta, \psi) \right) \right)^{-1} \times \\ \times \left( C^{(nz)mnsd}[\beta](\varphi, \theta, \psi) \right)^{-1} \sigma_{sd}^{(nz)}[\beta](\varphi, \theta, \psi);$$

Если  $p(\varphi, \theta, \psi) > \frac{1}{5} \sigma_p$ , то увеличить на 1 число состояний  $q_B$ , при которых происходит разрушение зерна посредством поля давлений;  $\{q_B \leftarrow q_B + 1\}$

Конец цикла  $\psi$ ; Конец цикла  $\theta$ ; Конец цикла  $\varphi$ ;

$$P(A) \leftarrow q_A / w; P(B) \leftarrow q_B / w;$$

$$P_{RD} \leftarrow P(A) + P(B);$$

9.2.8. Для каждой локальной двумерной перколяционной решетки, полученной на шаге 9.2.4, провести компьютерный эксперимент, заключающийся в следующем.

Вначале все квадраты рассматриваемой локальной двумерной перколяционной решетки установить в состояние "свободно от трещины" и закрасить в белый цвет. Далее, для каждого квадрата из решетки с помощью генератора равномерно распределенных случайных чисел сгенерировать случайное число  $P$  от 0 до 1. Если полученное значение  $P$  окажется меньше вероятности  $P_{RD}$  разрушения зерна с наполненной флюидом порой, то квадрат переходит в состояние "занято трещиной" и закрашивается в черный цвет. В противном случае, квадрат сохраняет свое состояние – "свободно от трещины".

9.2.9. Если в каждой локальной двумерной решетке реализуется хотя бы один бесконечный горизонтальный или вертикальный кластер, то исходный кубик  $i - j$  глобальной двумерной перколяционной решетки перевести в состояние "занято трещиной" и закрасить в черный цвет. В противном случае данный квадрат сохраняет свое состояние "свободно от трещины" и имеет цвет сектора, в котором он находится.

9.3. Конец цикла  $i$ .

9.4. Если в каждой глобальной двумерной перколяционной решетке не реализуется хотя бы один приоткосный кластер, то увеличить компоненты  $\sigma_3^{(0ctgp)}$  значений параметров

$\sigma^{(0ctgp)} [1..l]$  и перейти к шагу 9, иначе булевой переменной  $m$  присвоить значение равное 1.

9.5. Конец Цикла Пока  $m = 0$ .

10. Определить совокупность минимальных величин осевого напряжения  $\sigma^{(ax)} [1..l]$ , реализацию которых должен обеспечить технологический процесс забивки свай. Для этого необходимо выполнить нижеследующий цикл:

Цикл  $i = 1$  до  $l$  с шагом 1

$$\sigma^{(ax)} [i] \leftarrow \sigma_3^{(0ctgp)} [i] - \sigma_3^{(0tgp)} [i];$$

Конец цикла  $i$

11. Определить площадь  $S_{ncc}$  поперечного сечения сваи.

12. Определить величины осевых нагрузок  $F[1..l]$  на наголовник сваи, приводящих к формированию установленных величин осевого напряжения  $\sigma^{(ax)}[1..l]$ . Для этого необходимо выполнить нижеследующий цикл:

Цикл  $i = 1$  до  $l$  с шагом 1

$$F[i] \leftarrow 2 \sigma^{(ax)}[i] S_{ncc};$$

Конец цикла  $i$

13. Осуществить вывод величин осевых нагрузок  $F[1..l]$ .

Далее, согласно следующим стадиям предложенного метода посредством механизмов наследования и агрегации, а также последовательного добавления дополнительных классов в представленный высокоуровневый каркас, с помощью Embarcadero C++ Builder 10.3 разработано и протестировано ПО АСУ ТП забивки свай в оползнеопасный участок породного массива. Архитектура ПО рассматриваемой АСУ ТП имеет вид, изображенный на рисунке 7.

Как следует из данной диаграммы, представленная архитектура состоит из пяти подсистем и пакета GUI. Подсистема "Experimental definition of physical properties" реализует функциональную задачу анализа данных. В рамках рассматриваемой АСУ ТП данная функциональная задача направлена на обработку результатов геологических и геофизических данных, используемых в дальнейшем при построении трехмерной модели участка породного массива. Подсистема "Administrative functional maintenance" предназначена для автоматизации административных функциональных задач АСУ ТП забивки свай в оползнеопасные участки породного массива. К таким задачам относятся: учет материалов и ресурсов; планирование задач и событий; создание отчетов; аутентификация пользователей; резервное копирование и восстановление данных. Подсистемы "Definition of deformation properties" и "Definition of external stress field" реализуют функциональные задачи определения деформационных свойств геоматериалов и установление величин внешних полей напряжений, действующих на горные породы, составляющих оползнеопасный участок, на котором производится погружение свай.

Заключительной подсистемой является "Optimal axial load control". Данная подсистема предназначена для осуществления операторского контроля и регулирования технологическим процессом забивки свай. При этом регулирование рассматриваемым процессом сводится к выполнению в режиме реального времени следующей циклической последовательности действий: 1) получение значений параметров технологического процесса посредством отправки запроса к встроенной системе управления исполнительными механизмами гидравлического молота; 2) сбор значений величин

параметров деформационных свойств геоматериалов и внешних полей напряжений от подсистем "Definition of deformation properties" и "Definition of external stress field"; 3) определение оптимальной величины осевой нагрузки ударника на наголовник сваи в соответствии с текущим значением глубины ее залегания; 4) отправка встроенной системе управления запроса на установление оптимальной величины осевой нагрузки в качестве действующего значения.

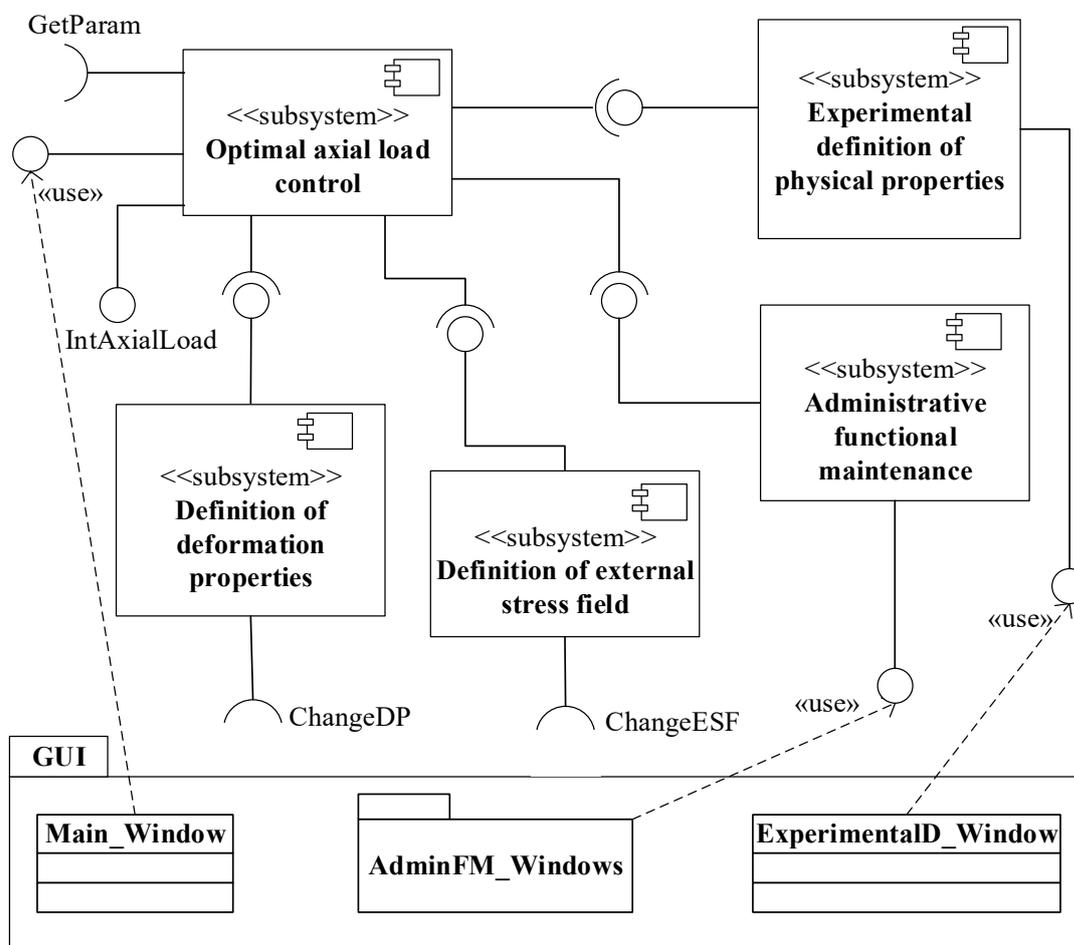


Рисунок 7 – Архитектура ПО АСУ ТП забивки свай в оползнеопасный участок массива

На основе полученных результатов произведено специфицирование ТО АСУ ТП. Результатом данной стадии является схема развертывания, состоящая из четырех узлов. Первый из них – "Embedded control system of hydraulic hammer" – представляет собой встроенную систему управления исполнительными механизмами гидравлического молота, осуществляющую сбор данных, контроль и регулирование режимами работы технологического оборудования сваебойной установки в части погружения сваи ударным способом. Второй узел "Workstation" указывает на автоматизированное рабочее место оператора сваебойной установки, на котором развертывается компонент APCs.exe, реализующий в программном виде архитектуру, изображенную на рисунке 7. И наконец, последним узлом рассматриваемой АСУ ТП является сервер "Database Management System". Данный сервер, связанный с автоматизированным рабочим местом посредством узла

"Router", предназначен для хранения экспериментальных данных, сведений о доступных материалах и ресурсах, а также другой административной информации.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе в результате выполненных исследований на основе использования предложенных теоретических основ математического моделирования функциональных задач, методов проектирования экспертных и автоматизированных систем решена крупная научная проблема разработки каркасной мультифрактально-модельной методологии построения АСНИ и АСУ ТП в горной промышленности, имеющая существенное народно-хозяйственное значение для нашей страны.

К основным результатам диссертации, полученным лично автором, можно отнести следующее:

1. Предложенный в формализованном виде каркасный метод разработки АС, позволяющий реализовывать системы различного класса (АСНИ, АСУ ТП и др.) посредством конфигурации проектных решений, реализуемых на основе построения математических моделей универсального типа. В основе данного метода лежит концепция каркаса, заключающаяся в разработке совокупности взаимосвязанных классов, детализация которых посредством механизмов наследования и (или) агрегирования позволяет получить готовое ПО АС. В отличие от своих неполных аналогов, имеющих вид рекомендаций, разработка каркаса программного обеспечения в рамках предложенного метода осуществляется посредством систематизированной методологии проектирования и реализации математического и информационного обеспечения, являющихся основой для эффективного выполнения функциональных задач АС в различных областях. В результате применения такого подхода впервые появилась возможность разрабатывать программные фреймворки, способные обеспечить выполнение не только служебных, но и основных функциональных задач АС.

2. Разработанные теоретические основы мультифрактального моделирования функциональных задач АСНИ и АСУ ТП в горной промышленности. Совокупность математических моделей, составляющих данные теоретические основы, в отличие от своих аналогов, позволяют наиболее адекватно учесть реальную анизотропную неоднородную мультифрактальную структуру геоматериалов различного порядка сложности. Тем самым с наибольшей степенью точности (погрешность менее 5%) определить их деформационные, тепло- и электропроводные свойства, а также установить величину внешнего поля напряжений, действующего на породный массив. При этом существующие способы определения данных свойств и величины внешнего поля напряжений по причинам неудовлетворительного учета масштабного эффекта дают погрешность в 40%–50%.

Достижение наибольшей степени адекватности рассматриваемых моделей во многом стало возможным благодаря разработке мультифрактального метода математического

моделирования и комплексного метода самосогласованного поля, а также введению нового научного понятия «нечеткий тензор». Предложенный метод заключается в построении для объекта функциональной задачи (в нашем случае – геоматериала) мультифрактальной модели, представляющей собой совокупность связанных между собой математических моделей фрактальных сред. При этом каждая из данных сред описывает фракталы, входящие в состав моделируемого объекта функциональной задачи.

Применение разработанного комплексного метода самосогласованного поля за счет учета влияния собственного и внешнего полей при проведении процедуры усреднения уравнений позволяет разрешить противоречие между термодинамическим и механическим подходами к решению проблем деформирования объектов мультифрактальной структуры. Проводя исследования в рамках решаемых основных функциональных задач АСНИ, было установлено, что использование данного метода способствует расширению границ адекватности разрабатываемых моделей. Так для полученных мультифрактальных моделей границы адекватности характеризуются интервалом  $0,05 \leq E^{осн} / E^{неод} \leq 20$ , где  $E^{осн}$  – модуль упругости основной среды;  $E^{неод}$  – модуль упругости неоднородности. Аналогичные модели, использующие при процедуре усреднения уравнений наиболее распространенный в настоящий момент классический метод самосогласованного поля, дают адекватные результаты в существенно меньшем интервале  $0,1 \leq E^{осн} / E^{неод} \leq 10$ .

Введение понятия «нечеткий тензор» в рамках рассматриваемой функциональной задачи позволило разработанным математическим моделям определить деформационные свойства геоматериала не только в упругом, но и упругопластическом состояниях с учетом изменения количества необратимо движущихся дислокаций. В общем же случае применение данного понятия позволяет моделировать многие функциональные задачи АСНИ, АСУ ТП и др., связанные с определением напряженно-деформированного состояния объектов и их структурных составляющих в условиях отсутствия достаточно точных знаний об их нелинейных свойствах.

Кроме того, необходимо отметить, что впервые разработаны математические модели, связывающие величины внешнего (действующего на породный массив) и внутреннего неоднородного поля напряжений, формируемого в его структурных и текстурных неоднородностях. В результате впервые появилась возможность с помощью разработанной перколяционной модели, посредством анализа длин трещин в минералах породного массива методами компьютерного моделирования, определить неоднородную по глубине величину внешнего поля напряжений, учитывающую гравитационную и тектоническую составляющие.

3. Впервые разработанный высокоуровневый каркас ПО (программный фреймворк) АСНИ, АСУ ТП и других систем, связанных с определением напряженно-деформированного состояния, тепло- и электропроводных свойств, а также разрушения различного рода

объектов. Данный каркас, разработанный в Embarcadero C++ Builder 10.3, представляет собой расширяемый набор взаимосвязанных классов для реализации административных и специализированных функциональных задач АСНИ и АСУ ТП. К числу административных функций, реализуемых каркасом, следует отнести: анализ данных; учет материалов и ресурсов; планирование задач и событий; создание отчетов; резервное копирование и восстановление данных. В свою очередь к числу специализированных функций – определение деформационных, тепло- и электропроводных свойств объектов мультифрактальной структуры; установление внешнего поля напряжений, действующего на исследуемый объект.

Отличительной особенностью предлагаемого каркаса является то, что процесс проектирования классов и связанных с ними ассоциаций производится на основе алгоритмов, разработанных посредством обобщения математических моделей геоматериалов на случай исследования объектов мультифрактальной структуры. Это позволяет с максимальной степенью повторного использования кода (величина которой может достигать 80% при реализации АС с идентичной функциональностью), применять разработанный каркас для проектирования и реализации АСНИ и АСУ ТП во многих предметных областях – материаловедении, гидрогеологии, промышленном и гражданском строительстве, и других отраслях, связанных с определением напряженно-деформированного состояния и разрушения различных объектов мультифрактальной структуры.

4. Предложенный новый гибридный метод разработки экспертных систем, заключающийся в следующем. В первую очередь с помощью методов математического моделирования разрабатываются алгоритмы анализа исследуемых объектов, характеризующие факты из рассматриваемой предметной области. Далее, полученные алгоритмы посредством классических методов искусственного интеллекта дополняются эвристическими правилами. В результате получается база знаний, содержащая эвристики и компьютерные реализации алгоритмов. И в заключение разрабатывается механизм логического вывода, отличающийся от своих аналогов моделью формирования рассуждений. Согласно предложенной модели установленные факты из базы знаний сопоставляются вершинам взвешенного ориентированного графа. При этом использование весов ребер обусловлено необходимостью выполнения при формировании логического вывода – процедуры определения приоритетов активизации фактов. В таком случае функционирование механизма логического вывода сводится к формированию в зависимости от ответов пользователей одного или нескольких путей во взвешенном ориентированном графе. При этом конечная вершина данных путей будет соответствовать решению рассматриваемой прикладной задачи.

Используя предложенный метод, разработана экспертная система поддержки принятия решений в области построения математических моделей разрушения

геоматериалов. Данная система впервые позволила автоматизировать не только процесс разработки моделирующих программ (компьютерной реализации математических моделей), но и процесс построения содержательных моделей в части выбора теории, применение которой в рамках решаемой прикладной задачи позволит получить наиболее адекватную математическую модель исследуемого объекта (в рассматриваемом случае – разрушения геоматериалов).

5. Разработанную в рамках каркасного метода АСНИ физических процессов горного производства. Использование данной системы позволяет с высокой степенью точности (погрешность менее 5%) решать научные задачи, связанные с определением физических свойств геоматериалов и величины внешнего поля напряжений, действующего на породный массив; и на этой основе – с помощью встроенной экспертной системы разработать количественно адекватные математические модели разрушения геоматериалов, допускающие интеграцию в математическое и программное виды обеспечения АСУ ТП, АСУП, АСТПП и др. Кроме того, данная система позволяет автоматизировать делопроизводственную деятельность лабораторий, занятых научными исследованиями в области наук о Земле.

6. Разработанную в рамках каркасного метода АСУ ТП забивки свай в оползнеопасные участки породных массивов. В отличие от своих аналогов, данная система позволяет при осуществлении технологического процесса учесть изменение напряженного состояния участков породных массивов, обусловленное возникновением дополнительных динамических нагрузок от погружения свай ударным способом. Это позволяет данной системе в режиме реального времени определять и поддерживать оптимальную величину осевой нагрузки ударника на наголовник свай, при которой не наблюдается излишняя динамическая нагрузка на оползнеопасный участок, и тем самым – снижаются риски возникновения схода оползня.

### **Основные публикации по теме диссертации**

#### **в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ:**

1. Халкечев Р.К. Математическое моделирование стихийных явлений. Теоретико-катастрофическая модель оползней // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2008. Т. 15. Вып. 6. С. 1138-1139. (0,14 п.л.).
2. Халкечев Р.К., Халкечев К.В. Математическое моделирование техногенных катастроф. Фрактальная кластерная модель внезапных выбросов // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2008. Т. 15. Вып. 5. С. 937-939. (0,13 п.л., вклад автора 0,07 п.л.).
3. Халкечев Р.К., Халкечев К.В. Математическое моделирование техногенных катастроф. Фрактальная кластерная модель горных ударов // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2008. Т. 15. Вып. 5. С. 939–940. (0,12 п.л., вклад автора 0,06 п.л.).

4. Халкечев Р.К., Халкечев К.В. Кластерная модель локализации реологической деформации поликристаллов. Зарождение ледникового оползня // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2009. Т. 16. Вып. 1. С. 183-184. (0,1 п.л., вклад автора 0,05 п.л.).
5. Халкечев Р.К., Халкечев К.В. Случайная фрактальная модель локализации пластической деформации поликристаллов. Зарождение оползней полнокристаллических геоматериалов // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2009. Т.16. Вып. 1. С. 184-186. (0,1 п.л., вклад автора 0,05 п.л.).
6. Халкечев Р.К. Масштаб неоднородности газосодержащих породных массивов // Методы математического моделирования в горной промышленности: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). 2011. № 12. С. 3–7. (0,24 п.л.).
7. Халкечев Р.К. Математическая модель эффективных упругих свойств газосодержащих породных массивов мультифрактальной структуры // Методы математического моделирования в горной промышленности: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). 2011. № 12. С. 7-12. (0,2 п.л.).
8. Халкечев Р.К. Математическая модель упругопластического деформирования пористых минералов с учетом изменения количества дислокаций // Методы математического моделирования в горной промышленности: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). 2011. № 12. С. 12-18. (0,22 п.л.).
9. Халкечев К.В., Халкечев Р.К. О свойствах математической модели: эллипсоидальная неоднородность в упругой среде // Методы математического моделирования в горной промышленности: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). 2011. № 12. С. 18-22. (0,15 п.л., вклад автора 0,1 п.л.).
10. Халкечев К.В., Халкечев Р.К. Математическая модель разрушения поликристаллов при квазистатических и ударных нагрузках // Методы математического моделирования в горной промышленности: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). 2011. № 12. С. 22-26. (0,23 п.л., вклад автора 0,15 п.л.).
11. Халкечев Р.К. Скейлинг газосодержащих породных массивов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2012. №2. С. 102-104. (0,29 п.л.).
12. Халкечев Р.К. Мультифрактальная модель с масштабом неоднородности эффективных упругих свойств газосодержащих породных массивов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2012. №3. С. 68-70. (0,3 п.л.).
13. Халкечев Р.К. Стохастический метод определения элементарных объемов

кристаллических и композиционных геоматериалов // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2012. № 2. С. 38-41. (0,26 п.л.).

14. Халкечев Р.К. Разработка метода усреднения упругих свойств геоматериалов на основе теории мультифрактального моделирования // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2012. № 3. С. 17-21. (0,25 п.л.).

15. Халкечев Р.К. Об одном методе усреднения упругопластических свойств геоматериалов на основе теории мультифрактального моделирования // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2012. № 4. С. 39-43. (0,24 п.л.).

16. Халкечев Р.К. Мультифрактальная модель неоднородного поля давлений в газонаполненных порах поликристалла при постоянном внешнем поле // Математическое моделирование трудноформализуемых объектов: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). 2012. № 7. С. 3-7. (0,25 п.л.).

17. Халкечев Р.К. Математическая модель неоднородного напряженно-деформированного состояния минерала с газонаполненными порами при постоянной скорости изменения внешнего поля деформаций // Математическое моделирование трудноформализуемых объектов: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). 2012. № 7. С. 8-12. (0,18 п.л.).

18. Халкечев Р.К. Алгоритм определения элементарного объема горной породы // Математическое моделирование трудноформализуемых объектов: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). 2012. № 7. С. 12–16. (0,21 п.л.).

19. Халкечев Р.К. Мультифрактальная модель распространения трещин в поликристаллах при ударных нагрузках // Математическое моделирование трудноформализуемых объектов: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). 2012. № 7. С. 17-23. (0,36 п.л.).

20. Халкечев Р.К. Разработка архитектуры комплекса программ определения деформационных свойств газосодержащих породных массивов // Математическое моделирование трудноформализуемых объектов: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). 2012. № 7. С. 23-27. (0,15 п.л.).

21. Халкечев Р.К., Халкечев К.В. Математическое моделирование давления горных пород в массиве с поликристаллическим упругопластическим пластом (обратная задача) // Математическое моделирование трудноформализуемых объектов: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). 2012. № 7. С. 27-31. (0,2 п.л., вклад автора 0,14 п.л.).

22. Халкечев Р.К. Теоретические основы мультифрактального моделирования трудноформализуемых объектов // Прикладная и промышленная математика: Горный

информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). 2013. № 9. С. 8–16. (0,3 п.л.).

23. Халкечев Р.К. Нечеткий тензор как основа для определения деформационных свойств природного мультифрактального объекта в упругопластическом состоянии с упрочнением // Прикладная и промышленная математика: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). 2013. № 9. С. 16-19. (0,11 п.л.).

24. Халкечев Р.К. Об одной распространенной ошибке при математическом моделировании трудноформализуемых объектов мультифрактальной структуры. Комплексный метод самосогласованного поля при исследовании мультифрактальных сред // Прикладная и промышленная математика: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). 2013. № 9. С. 20-23. (0,15 п.л.).

25. Халкечев Р.К. Динамические проявления напряженно-деформированного состояния природных мультифрактальных объектов. Внезапные выбросы горных пород и газа // Прикладная и промышленная математика: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). 2013. № 9. С. 23-27. (0,19 п.л.).

26. Халкечев Р.К. Динамические проявления напряженно-деформированного состояния природных мультифрактальных объектов. Оползни // Прикладная и промышленная математика: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). 2013. № 9. С. 28-32. (0,18 п.л.).

27. Халкечев К.В., Халкечев Р.К. Математическая модель деформационных свойств нефтенасыщенного пласта // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 11. С. 354-358. (0,58 п.л., вклад автора 0,43 п.л.).

28. Халкечев Р.К. Комплекс программ моделирования процессов в геоматериалах как основа для автоматизированной информационно-управляющей системы снижения рисков оползней и внезапных выбросов пород и газа // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 4. С. 353-358. (0,69 п.л.).

29. Халкечев Р.К. Перколяционная мультифрактальная математическая модель разрушения газосодержащего породного массива как основа для прогнозирования внезапного выброса пород и газа // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 4. С. 359-363. (0,58 п.л.).

30. Халкечев Р.К. Перколяционная мультифрактальная математическая модель разрушения жидкостьсодержащего породного массива как основа для прогнозирования схода оползней // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 4. С. 364-371. (0,92 п.л.).

31. Халкечев Р.К. Иерархически-самоподобная математическая модель материала второго

- порядка сложности (минерала, металла) с наполненной жидкостью (или газом) порами в упругом деформационном состоянии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 5. С. 348-353. (0,69 п.л.).
32. Халкечев Р.К. Нечеткая динамическая модель изменения количества движущихся дислокаций в структуре материала первого порядка сложности (минерала, металла) при увеличении внешней нагрузки // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 5. С. 354-359. (0,69 п.л.).
33. Халкечев Р.К. Математическая модель проверки материалов различного порядка сложности по требованию к описанию иерархически-самоподобной средой // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 5. С. 360-365. (0,69 п.л.).
34. Халкечев Р.К. Алгоритм проверки геоматериалов по требованию к описанию анизотропной сплошной средой // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 7. С. 311-316. (0,69 п.л.).
35. Халкечев Р.К. Разработка архитектуры автоматизированной системы научных исследований физических процессов горного производства // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 7. С. 317-323. (0,81 п.л.).
36. Халкечев Р.К. Теоретические основы мультифрактального моделирования функциональных задач автоматизированной системы научных исследований физических процессов горного производства // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 8. С. 136-142. (0,81 п.л.).
37. Халкечев Р.К. Функционально-объектный язык визуального моделирования как основа для разработки математического обеспечения автоматизированных систем управления // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 8. С. 143-149. (0,81 п.л.).
38. Халкечев Р.К. Мультикомпонентное моделирование функциональных задач автоматизированной системы управления технологическими процессами горного производства // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 8. С. 150-157. (0,92 п.л.).
39. Халкечев Р.К. Экспертная система управления процессом научных исследований разрушения геоматериалов различных порядков сложности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 9. С. 336-342. (0,81 п.л.).
40. Халкечев Р.К. Иерархически-самоподобные математические модели геоматериалов относительно полей напряжений как основа для перколяционного мультифрактального моделирования объектов управления // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 9. С. 343-350. (0,92 п.л.).
41. Халкечев Р.К., Халкечев К.В. Математическое моделирование упругого поля контактных напряжений в поликристаллических геоматериалах // Горный информационно-

аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 1. С. 163-172. (1,16 п.л., вклад автора 1,01 п.л.).

42. Халкечев Р.К., Халкечев К.В. Математическое моделирование эксперимента по деформированию и разрушению поликристаллических геоматериалов в опытах над макрообразцами при одноосном сжатии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 1. С. 173-181. (1,04 п.л., вклад автора 0,89 п.л.).

43. Халкечев Р.К. Об одной распространенной ошибке применения метода конечных элементов при определении напряженно-деформированного состояния геоматериалов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 1. С. 182-186. (0,58 п.л.).

44. Халкечев Р.К., Халкечев К.В. Фрактальные модели напряженно-деформированного состояния породного массива как основа автоматизированной системы управления технологическим процессом шахтной добычи тяжелой нефти // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. №8. С. 214-219. (0,42 п.л., вклад автора 0,27 п.л.).

45. Халкечев Р.К., Халкечев К.В. Каркасный подход к разработке автоматизированных систем научных исследований в горной промышленности на основе методов определения механических и тепловых свойств геоматериалов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. №10. С. 106-112. (0,81 п.л., вклад автора 0,66 п.л.).

46. Халкечев Р.К., Халкечев К.В. Разработка автоматизированной системы определения внешнего поля напряжений, действующего на породный массив // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. №11. С. 220-226. (0,81 п.л., вклад автора 0,66 п.л.).

47. Халкечев Р.К., Халкечев К.В. Разработка математического обеспечения автоматизированных систем определения электрических свойств геоматериалов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. №11. С. 227-232. (0,69 п.л., вклад автора 0,54 п.л.).

#### **В изданиях, индексируемых Scopus:**

48. Халкечев Р.К., Халкечев К.В. Математическое моделирование неоднородного упругого поля напряжений породного массива кристаллической блочной структуры // Горный журнал. 2016. № 3. С. 200-205. (0,69 п.л., вклад автора 0,54 п.л.).

49. Халкечев Р.К., Халкечев К.В. Управление селективностью разрушения при дроблении и измельчении геоматериалов на основе методов подобия и размерности в динамике трещин// Горный журнал. 2016. № 6. С. 64-66. (0,35 п.л., вклад автора 0,20 п.л.).

50. Халкечев Р.К. Экспертная система разработка математических моделей геомеханических процессов в породных массивах // Горный журнал. 2016. № 7. С. 96-98.

(0,35 п.л.).

51. Халкечев Р.К. Нечеткая математическая модель изменения концентрации трещин в минерале под действием внешней нагрузки // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. №6. С. 97-105. (0, 81 п.л.).

52. Халкечев Р.К. Применение теории мультифрактального моделирования процессов деформирования и разрушения породных массивов с целью краткосрочного прогнозирования внезапных выбросов угля и газа // Уголь. 2019. №7. С. 48-50. (0, 21 п.л.).

53. Халкечев Р.К. Теория мультифрактального моделирования процессов деформирования и разрушения породных массивов как основа автоматизации технологии буровзрывных работ на угольных разрезах // Уголь. 2019. №11. С. 32-34. (0, 21 п.л.).

#### **Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:**

54. Халкечев Р.К. Программа определения деформационных свойств геоматериалов мультифрактальной структуры. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019615272. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 23 апреля 2019г.

55. Халкечев Р.К. Программа анализа структуры минерала на предмет обнаружения преимущественной ориентации зерен. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019617380. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 06 июня 2019г.

56. Халкечев Р.К. Программа анализа структуры геоматериала на предмет существования представительного объема. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019666286. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 06 декабря 2019г.

57. Халкечев Р.К. Программа вычисления нечетких тензорных функций. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019667117. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 19 декабря 2019г.

58. Халкечев Р.К. Программа определения внешнего поля напряжений, действующего на геоматериалы. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019667448. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 24 декабря 2019г.

59. Халкечев Р.К. Программа определения тепловых и электрических свойств геоматериалов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020610852. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 21 января 2020г.

60. Халкечев Р.К. Программа управления технологическим процессом забивки свай с целью снижения рисков возникновения оползней. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020610372. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 13 января 2020г.