

На правах рукописи



КОРОБКИН ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**БИОНИЧЕСКИЕ НЕЧЕТКИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ДЛЯ  
ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ МНОГОТОЧЕЧНЫХ МАСС ПРИ  
ФОРМИРОВАНИИ УСТОЙЧИВОЙ СЫПУЧЕЙ НАСЫПИ**

Специальность

05.13.17 – теоретические основы информатики

**Автореферат диссертации**  
на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

В О Р О Н Е Ж – 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор Астахова Ирина Федоровна

Официальные оппоненты: Сальников Игорь Иванович, доктор  
технических наук, профессор, ФГБОУ ВО  
«Пензенский государственный  
Технологический университет»,  
кафедра «Вычислительные машины и  
системы», заведующий кафедрой; (г. Пенза)

Шашкина Софья Александровна, кандидат  
физико-математических наук, ВУНЦ ВВС  
«Военно-воздушная академия имени  
профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина»  
(г. Воронеж), кафедра математики, доцент.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
архитектурно-строительный университет»

Защита состоится «28» сентября 2016 г. в 15:10 на заседании  
диссертационного совета Д 212.038.20 ФГБОУ ВО «Воронежский  
государственный университет» по адресу: 394006, Воронеж, Университетская  
пл.1, ауд. 335.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» по адресу: 394006,  
Воронеж, Университетская пл.1,  
[http://www.science.vsu.ru/dissertations/3296/Диссертация\\_Коробкин\\_Е.А..pdf](http://www.science.vsu.ru/dissertations/3296/Диссертация_Коробкин_Е.А..pdf)

Автореферат разослан « 16 » июня \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.038.20  
кандидат физико-математических наук,  
доцент



С.А. Шабров

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Использование компьютерных технологий привело к пониманию важности задач, связанных с обработкой накопленной информации для извлечения знаний. В современных вычислительных алгоритмах анализ данных зачастую характеризуется наличием слабо структурированной, неполной, неточной и нечеткой информацией, возникающей вследствие неопределенности, присущей моделям сложных процессов, а также необходимостью решения задач в тех областях, где существенная роль принадлежит суждениям и знаниям экспертов. Как только в работах Заде для формализации анализа неопределенности стала использоваться теория нечетких множеств, интерес к анализу приближенной и иногда нечеткой информации существенно вырос.

Большинство научных проблем в различной степени связано с задачей оптимизации. При этом пространство параметров в задачах оптимизации не всегда является известным и предсказуемым. Современные исследования направлены на поиск эффективных модификаций существующих методов, которые позволяют справиться с данной проблемой.

В новых бурно развивающихся научных направлениях нейробионического и эволюционного моделирования сочетаются методы нечеткой логики и генетических алгоритмов, что открывает другие возможности перед исследователем для решения трудно-формализуемых задач в условиях неопределенности. Появились нейро-нечеткие системы: нечетко-генетические, нейрогенетические и нейро-нечетко-генетические. Данная работа посвящена построению нечетко-генетической системы и ее практическому использованию для оценки устойчивости сыпучей среды.

Вопрос изучения сыпучих сред на сегодняшний день является актуальным, поскольку сыпучие материалы повсеместно встречаются в природе и в промышленности в отраслях, связанных с сыпучими средами (производство сахара, работа с песком и т.д.). С появлением распределенных вычислений, графических процессоров, как ускорителей, в настоящее время интерес к сыпучим средам возрос, но все равно существует много сложностей в стыковке области механики и компьютерного моделирования в разработке моделей, описывающих их движение. В данной работе рассмотрен вопрос об использовании разработанных алгоритмов к сыпучим средам, которые позволят на несколько порядков сократить время расчета геометрии сыпучей среды и оценить ее предельное состояние.

Диссертационная работа выполнена в рамках одного из основных научных направлений Воронежского государственного университета «Математическое моделирование, программное и информационное обеспечение, методы вычислительной и прикладной математики и их применение к фундаментальным исследованиям в естественных науках».

**Цель работы и основные задачи.** Целью диссертационной работы являются бионические нечеткие модели и алгоритмы для исследования

системы многоточечных масс при формировании устойчивой сыпучей насыпи. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать алгоритм для исследования системы многоточечных масс в трехмерном пространстве для формирования сыпучей насыпи.
2. Создать модель и алгоритм прогнозирования поведения насыпи на основе нечеткой логики.
3. Разработать генетический алгоритм для настройки коэффициентов прогнозной модели.
4. Создать специальное программное обеспечение, реализующее предложенные алгоритмы.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач использовались методы нечеткой логики и генетических алгоритмов, методы работы с графическим процессором, методы обеспечения обработки информации на базе специализированной вычислительной технологии CUDA, методы математического моделирования и метод дискретных элементов, методы объектно-ориентированного программирования.

**Научная новизна.** Научная новизна настоящей работы заключается в следующем:

1. В разработке алгоритма, описывающего поведение системы из многоточечных масс в трехмерном пространстве для формирования геометрии сыпучей насыпи с использованием графического процессора, позволяющего повысить производительность на несколько порядков по сравнению с вычислениями на центральном процессоре.
2. В создании модели и алгоритма прогнозирования устойчивости насыпи с помощью нечеткой логики и ситуационной сети.
3. В разработке бионической модели для настройки коэффициентов модели прогнозирования, использующей модифицированный генетический алгоритм, позволяющий ускорить поиск оптимальных параметров для нечеткой модели.
4. В создании программной системы моделирования для проведения экспериментальных исследований поведения многоточечных масс и получения геометрии сыпучей среды для исследования на устойчивость.

**Личный вклад автора.** Основные результаты исследований по теме диссертации были получены лично автором и опубликованы в соавторстве с научным руководителем. Научным руководителем определены основные направления исследования.

**Теоретическая и практическая ценность.** Работа имеет теоретический и практический характер. В работе создается алгоритм для предсказания поведения многоточечных масс (порядка нескольких десятков тысяч) для формирования сыпучей насыпи, разрабатывается модель и алгоритм прогнозирования, отличающихся использованием нечеткой логики и генетического алгоритма для настройки ее коэффициентов.

Практическая ценность работы состоит в возможности использования разработанных алгоритмов в программном обеспечении для принятия решений о поведении насыпи. Результаты работы используются и тестируются на

предприятия ООО «ОГНЕБОРЕЦ+СВ» в г. Воронеже. По результатам работы получены свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015660382 «Разработка нечеткой модели прогнозирования устойчивости грунтового массива» от 30 сентября 2015 г. и № 2015661068 «Технология CUDA для метода дискретных элементов в параллельной среде» от 15 октября 2015 г.

**Апробация работы.** Результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на VII Международной научно-практической конференции «Современные информационные технологии и IT-образование» (Москва, 2012), на Международной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» (Воронеж, 2012, 2015), на VII Международной научно-практической конференции «Теоретические и прикладные аспекты современной науки» (Белгород, 2015), на XIII Международной научно-практической конференции «Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке» (Москва, 2015), на Международной конференции «Воронежская весенняя математическая школа «Понтрягинские чтения – XXVI. Современные методы теории краевых задач» (Воронеж, 2015), на научных сессиях Воронежского государственного университета.

**Публикации.** Результаты диссертации опубликованы в 11 работах. 1 работа опубликована в журнале, индексируемом в AgriS, 2 – в журналах из перечня ВАК. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. Из совместных работ в диссертацию вошли только результаты, принадлежащие лично диссертанту.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, разбитых на параграфы, заключения, списка используемой литературы из 90 наименований и приложения. Общий объем диссертации – 116 страниц. Работа содержит 29 рисунков, 1 диаграмму и 23 таблицы.

**Область исследования.** Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.13.17 – Теоретические основы информатики:

П.4. Исследование и разработка средств представления знаний. Принципы создания языков представления знаний, в том числе для плохо структурированных предметных областей и слабоструктурированных задач; разработка интегрированных средств представления знаний, средств представления знаний, отражающих динамику процессов, концептуальных и семиотических моделей предметных областей.

П.13. Применение бионических принципов, методов и моделей в информационных технологиях.

П. 14. Разработка теоретических основ создания программных систем для новых информационных технологий.

**На защиту выносятся:**

1. Алгоритм поведения системы из многоточечных масс в трехмерном пространстве для формирования сыпучей насыпи с использованием графического процессора.

2. Модели и алгоритм прогнозирования устойчивости насыпи с помощью нечеткой логики и результаты их исследования и ситуационной сети.

3. Модифицированный генетический алгоритм для настройки коэффициентов модели прогнозирования, позволяющий сделать поиск оптимальных параметров для нечеткой модели более эффективным.

4. Программный комплекс для проведения вычислительного эксперимента по предложенным алгоритмам.

### Содержание работы

**Во введении** обосновывается актуальность темы, формулируются цель и задачи исследования, определяется научная новизна и практическая значимость работы, ее соответствие паспорту специальности 05.13.17 .

**Первая глава** содержит анализ средств современных программных вычислительных систем, предназначенных для обработки информации. Существующие алгоритмы обработки информационного потока сталкиваются с большим объемом вычислений и нерациональным использованием вычислительных ресурсов. В данной работе осуществляется поиск схем ускорения и оптимизации вычислений. Настоящая глава содержит классификацию методов прогнозирования. К недостаткам многих моделей и методов прогнозирования можно отнести сложность оценки исходной информации, требования к объему исходной информации, отсутствие приспособленности к изменяющейся среде. В связи с этим, существует потребность в прогнозировании систем с неполной информацией и высокой сложностью объекта. В данной работе для этого применяются нечеткие методы.

В данной главе затрагивается проблема эффективности генетических алгоритмов в зависимости от различных факторов. Одним из ключевых факторов является способ кодирования. Приводится обзор работ, использующих как вещественный, так и целочисленный способ кодирования. Показывается, что выбор способа кодирования определяет набор генетических операторов.

**Во второй главе** рассматривается алгоритм поведения системы многоточечных масс для формирования сыпучей насыпи с помощью графического процессора.

Для каждой  $i$ -ой частицы, представленной сферой, указывается координата центра  $x_i$ , масса  $m_i$  и радиус  $r_i$  .

Движение частиц задается в дифференциальной форме в соответствии с законом Ньютона:

$$m_i \frac{d^2 \vec{x}_i}{dt^2} = \vec{F}_i, \quad (1)$$

где  $\vec{F}_i$  – результат сложения всех сил, которые воздействуют на частицу:

$\vec{F}_i = \sum_{i \neq j} \vec{F}_{ij}^{gs} + \vec{F}_{sp}$ , где  $\vec{F}_{ij}^{gs}$  – сила, с которой  $i$ -я и  $j$ -я частицы взаимодействуют

между собой;  $\vec{F}_{sp}$  – сила гравитации.

Характер взаимодействия между частицами определяется степенью проникновения  $\xi$ , расчет которой для двух заданных частиц осуществляется по формуле:  $\xi = r_1 + r_2 - \|x_2 - x_1\|$ .  $\xi < 0 \Rightarrow$  силами взаимодействия можно пренебречь;  $\xi = 0 \Rightarrow$  присутствует сила трения;  $\xi > 0 \Rightarrow$  учитывают силу отталкивания.

Для практического решения задачи взаимодействия частиц используем систему уравнений:

$$\begin{cases} m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = \vec{F}_i, \\ \frac{d\vec{x}_i}{dt} = \vec{v}_i. \end{cases} \quad (2)$$

На основе метода Эйлера для численного дифференцирования, запишем:  $\begin{cases} \vec{v}_{i+1} = \vec{v}_i + \vec{F}_i \frac{1}{m_i} \Delta t, \\ \vec{x}_{i+1} = \vec{x}_i + \vec{v}_{i+1} \Delta t, \end{cases}$  где  $i$  – номер шага,  $\Delta t$  – шаг по времени. Порядок

шага должен составлять одну миллионную секунды. В противном случае дискретная система может оказаться вырожденной.

Разработать алгоритм описанной модели предлагается посредством программно-аппаратной архитектуры распределенных вычислений. При этом предпочтение отдается технологиям, ориентированным на выполнение большого объема вычислений, нежели на контроль выполнения и кэширование данных. В задаче выделяется несколько подзадач, каждой из которых ставится в соответствие определенный блок потоков, отвечающий за ее выполнение. Эти потоки работают вместе благодаря синхронизации, используемой только для потоков внутри блока.

В настоящей работе предлагается несколько способов повышения производительности метода дискретных элементов.

Система частиц с определенными физическими параметрами помещается в некоторое начальное состояние

Далее происходит «движение» системы: скорость каждой частицы и



Рисунок 1 Основной цикл взаимодействия системы частиц

координаты ее центра обновляются в соответствии с силами, которые на нее действуют. Центр частицы перемещается в соответствии с новой скоростью частицы. В новом состоянии идет поиск взаимодействующих пар частиц и сил, которые действуют на них. Получившиеся силы используются для интегрирования на следующем шаге (рис. 1). В настоящей работе предлагается две основные части цикла (интегрирование системы и просчет сил взаимодействия)

выполнять в соответствии с принципами распределенной вычислительной системы в отдельных функциях-ядрах. Запуск приложения изображен на рис. 2.

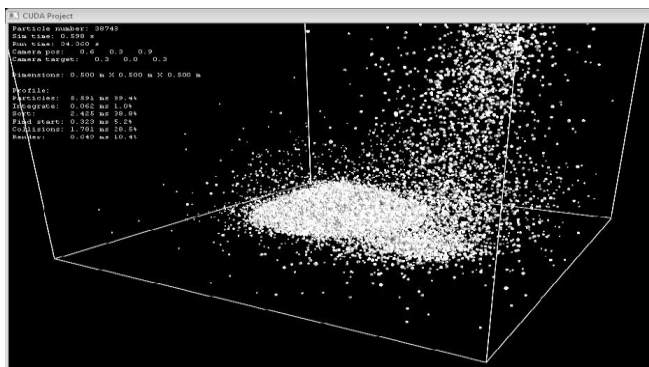


Рисунок 2 Графическое окно приложения

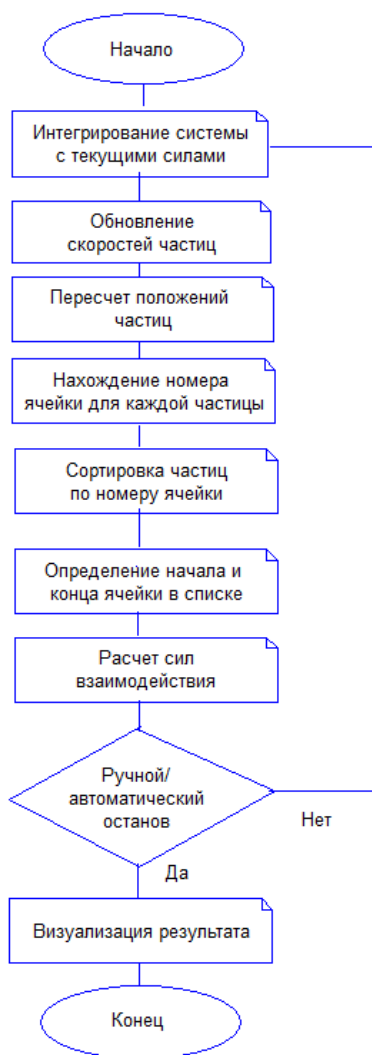


Рисунок 3 Блок-схема алгоритма

С учетом предложенной в работе оптимизации управления информационным потоком, алгоритм основного цикла приложения можно переписать в виде блок-схемы, изображенной на рис. 3.

В информационном окне консоли отображаются следующие данные: общее количество частиц вычислительного эксперимента; время, затраченное на визуальное моделирование; время, прошедшее с момента запуска приложения; положение камеры, общее количество частиц вычислительного эксперимента; время, затраченное на визуальное моделирование; время, прошедшее с момента запуска приложения; положение камеры; положение цели; пространство эксперимента.

**В третьей главе** рассматривается разработка модели и алгоритма прогнозирования предельного состояния сыпучей среды на основе нечеткой логики и генетического алгоритма для ее настройки. В нечеткой логике используется модель Мамдани.

Имеются данные о том, как изменялось значение коэффициента устойчивости в течение последних 20 моментов времени.

В соответствии с постановкой задачи предлагается следующая методика прогнозирования:

1. Формализуется основное понятие «предельное состояние» в виде лингвистической переменной.
2. Определяются основные значения лингвистической переменной.
3. Описываются экспертно-лингвистических закономерностей, наблюдаемые на графике изменения лингвистической переменной.

4. Выделяются функциональные связи между значениями лингвистической переменной.

5. Строится ситуационная сеть для прогнозирования.



6. Формализуются экспертно-лингвистические закономерности при помощи функций принадлежности.

7. Происходит дефаззификация полученного результата для преобразования значений функций принадлежности к четким значениям.

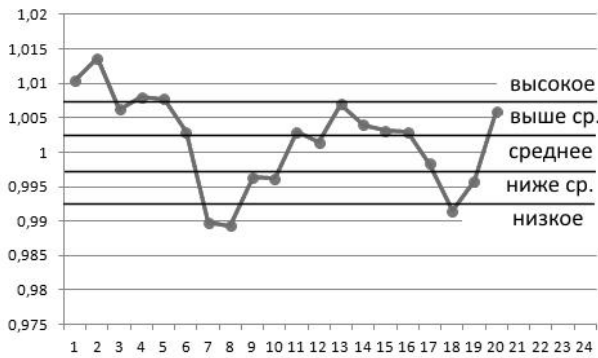


Рисунок 4 Терм-множество

На множестве из 20 исходных значений коэффициента устойчивости выделяются термы «ВЫСОКОЕ», «ВЫШЕ СРЕДНЕГО», «СРЕДНЕЕ», «НИЖЕ СРЕДНЕГО», «НИЗКОЕ» (рис. 4). В соответствии с исходными данными задачи, можно заметить некоторые экспертно-лингвистические закономерности. По этим

закономерностям при нечетком моделировании в решении данной задачи составляется база знаний  $F_1 - F_{11}$  в формате Мамдани.

Рис. 5 изображает сеть зависимостей, составленную по правилам  $F_1 - F_{11}$ . Из него видно, что по двум последним значениям  $(i-1)$ -го цикла можно спрогнозировать все значения  $i$ -го цикла.

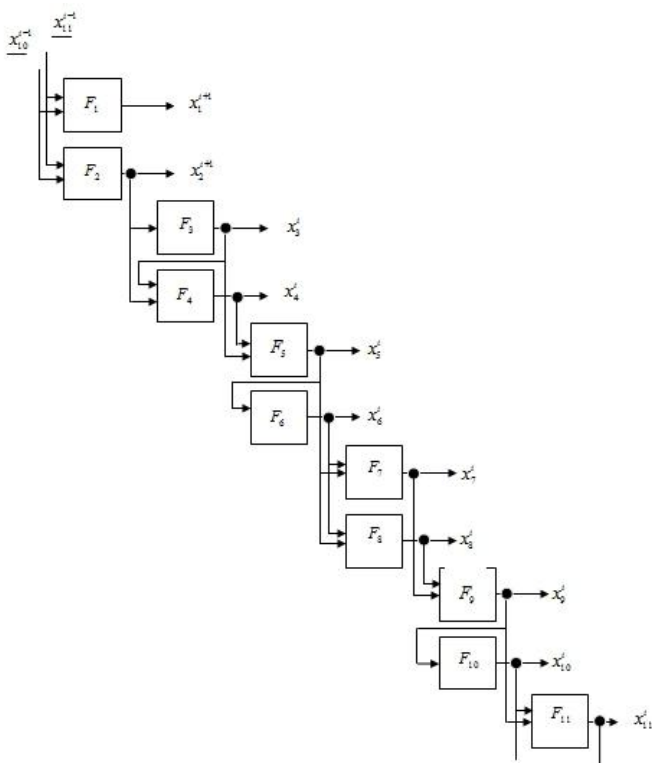


Рисунок 5 Ситуационная сеть зависимостей для прогнозирования

Для правил  $F_1 - F_{11}$  применяется аппарат теории нечетких множеств.

В решаемой задаче используется колоколообразная функция принадлежности переменной  $x$  («значение коэффициента устойчивости») произвольному нечеткому терму  $T$ :

$$\mu^T(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-b}{c}\right)^2}, \quad (3)$$

где  $b$  и  $c$  – параметры настройки. Параметр  $b$  – координата максимума функции ( $\mu^T(b) = 1$ ). Параметр  $c$  – коэффициент концентрации –

растяжения функции. Число  $b$  представляет собой наиболее возможное значение переменной  $x$  для нечеткого термина  $T$ . Вторая степень в выражении  $\left(\frac{x-b}{c}\right)^2$  задает

умеренную ширину верхней части функции, что соответствует терм-множеству исходной задачи. Использование данной функции принадлежности в описываемой нечеткой модели объясняется тем, что функции этого вида

являются симметричными, гладкими и принимают ненулевые значения на всей области определения.

Параметры настройки прогнозной модели  $b$  и  $c$  влияют на то, насколько точно будет вычислен коэффициент устойчивости.

В работе представлен следующий экспертный выбор (Таблица 1).

Таблица 1. Экспертный выбор параметров настройки прогнозной модели

Лингвистические оценки переменных	параметр $b$	параметр $c$
ВЫСОКОЕ	1,015	0,018
ВЫШЕ СРЕДНЕГО	1,005	0,015
СРЕДНЕЕ	1	0,013
НИЖЕ СРЕДНЕГО	0,995	0,015
НИЗКОЕ	0,985	0,021

В нечеткой модели Мамдани дефаззификация выполняется по методу центра тяжести. На примере правила  $F_1$  это выглядит следующим образом:

$$F_1 : \begin{cases} \mu^{BC}(x_1^i) = \max \left( \begin{array}{l} \min(\mu^B(x_{10}^{i-1}), \mu^B(x_{11}^{i-1})) \\ \min(\mu^C(x_{10}^{i-1}), \mu^{BC}(x_{11}^{i-1})) \end{array} \right), \\ x_1^i = \frac{k_4 \cdot \mu^{BC}(x_1^i)}{\mu^{BC}(x_1^i)}. \end{cases} \quad (4)$$

Результаты прогнозирования, полученные при помощи выбранной модели, представлены на рис. 6.

На данном рисунке график с темными точками отражает фактические значения коэффициента устойчивости, а график со светлыми точками – значения коэффициента устойчивости, полученные в результате прогнозирования.

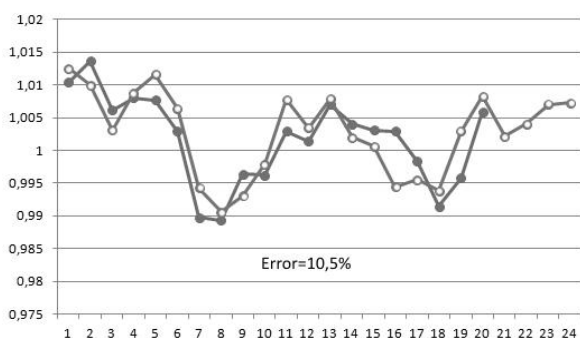


Рисунок 6 Результаты прогнозирования

(экспериментальными) значениями коэффициентов устойчивости и значениями, полученными теоретически в результате прогноза. Для этого выбран метод наименьших квадратов. В соответствии с этим методом задача настройки прогнозной модели означает: найти такие параметры  $b$  и  $c$ , чтобы выполнялось:

$$\sum_{i=1}^{N1} (x_1^i - \hat{x}_1^i)^2 + \sum_{i=1}^{N1} (x_2^i - \hat{x}_2^i)^2 + \dots + \sum_{i=1}^{N1} (x_{11}^i - \hat{x}_{11}^i)^2 = \min_{b,c} \quad (5)$$

где  $x_1^i, x_2^i, \dots, x_{11}^i$  – значения коэффициентов устойчивости, полученные в результате прогнозирования и зависящие от экспертных параметров  $b$  и  $c$ .

$\hat{x}_1^i, \hat{x}_2^i, \dots, \hat{x}_{11}^i$  – исходные (экспериментальные) значения коэффициентов устойчивости,  $N1$  – количество циклов, которые используются для настройки модели.

В настоящей задаче рассматривается бионическая модель, представимая в виде объединения нескольких составляющих:

$$BM = \langle H, P, K, M, S \rangle, \quad (6)$$

где  $BM$  – используемая бионическая модель;  $H$  – набор всех допустимых хромосом, каждая из которых состоит из 10 генов и характеризует отклонение параметров  $b$  и  $c$  от принятых начально.

$P: H \rightarrow [0, Q]$  – функция пригодности (целевая), показывает, в какой мере хромосома удовлетворяет условию (5).

$K: H \rightarrow H$  – оператор кроссовера, призванный сохранить родительские участки хромосом, которые положительно сказываются на значении функции пригодности, и расширить пространство поиска. В результате, получается новая популяция для выбора оптимальных решений.

$M: H \rightarrow H$  – оператор мутации, помогающий избежать попадания в локальный оптимум и увеличивающий пространство поиска.

$S: P: H \rightarrow B \subset H$  – оператор селекции, осуществляющий отбор хромосом в соответствии со значением функции пригодности, сохраняя размер популяции.

В классических реализациях настройки в качестве генов рассматриваются

собственно параметры функции принадлежности

лингвистических оценок. В отличие от этого, в данной работе модификация с использованием отклонений от параметров  $b$  и  $c$  позволяет осуществлять наиболее глубокий поиск оптимальных параметров в окрестности экспериментально полученных значений (рис. 7).

В данной задаче каждый из генов остается вещественным значением. В связи с отсутствием операции кодирования/декодирования в двоичную систему хромосом существенно повышается скорость работы алгоритма.



Рисунок 7 Общая схема генетического алгоритма

На первом этапе разработанного генетического алгоритма в качестве исходной особи выбирается особь, генами которой являются выбранные экспертами параметры  $b$  и  $c$ . Для дальнейшего формирования популяции создается 1 хромосома, состоящая из 10 генов. Гены этой хромосомы

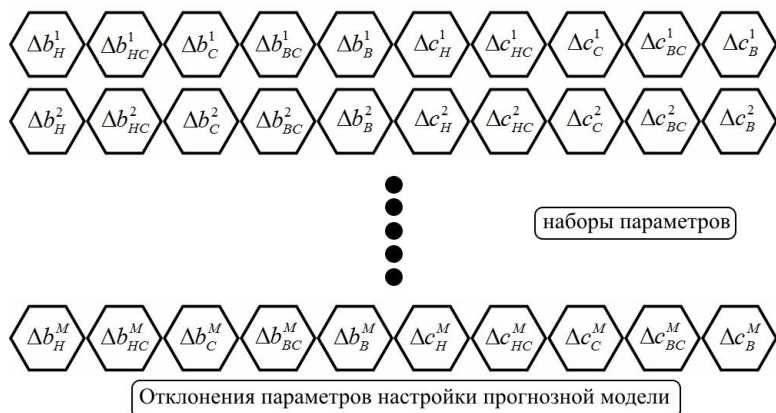


Рисунок 8 Формирование начальной популяции

характеризуют случайные отклонения параметров от исходных. На основе этого происходит формирование начальной популяции (20 особей) (рис. 8).

Второй этап генетического алгоритма предусматривает селекцию особей по методу, схожему с селекцией на основе заданной шкалы. Популяция

сортируется от «лучшей» к «худшей» особи. Определение качества особи происходит с помощью функции пригодности, которая строится на основе целевой функции. Целевая функция представлена в соответствии с математической постановкой задачи оптимизации (5).

Скрещивание в данной задаче осуществляется до тех пор, пока количество потомков не достигнет начального размера популяции. В данной работе используется  $BLX - \alpha$  оператор кроссовера с вероятностью скрещивания  $0,5 \leq p_c \leq 1$ . При этом вводится обозначение:  $g_k^{(1)}, g_k^{(2)}$  – гены с номером  $k$  в родительских хромосомах,  $h_k^{(1)}, h_k^{(2)}$  – гены с номером  $k$  в хромосомах потомков. Тогда значения генов потомков выбираются случайно в соответствии с равномерным распределением из отрезка  $[c_{\min} - \alpha\Delta_k, c_{\max} + \alpha\Delta_k]$  (рис. 9), где  $\alpha$  – константа,  $c_{\min} = \min\{g_k^{(1)}, g_k^{(2)}\}$ ,  $c_{\max} = \max\{g_k^{(1)}, g_k^{(2)}\}$ ,  $\Delta_k = c_{\max} - c_{\min}$ . Обозначенный отрезок выглядит следующим образом:

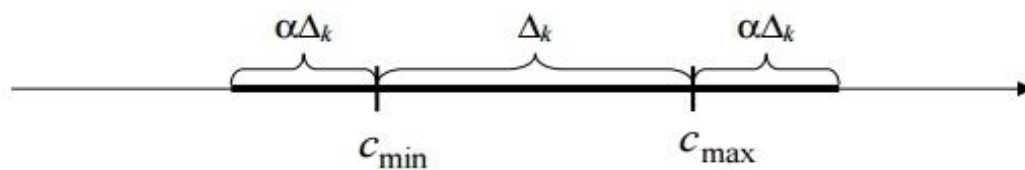


Рисунок 9 Интервал для  $BLX - \alpha$  кроссовера

Разрушающая способность  $BLX - \alpha$  кроссовера определяется заданным значением  $\alpha$ , а также разностью значений соответствующих генов хромосом-родителей. Описанная особенность подходит для целей данной работы, поскольку модифицированное формирование начальной популяции предусматривает незначительные в родительских хромосомах. Выбранный подход минимизирует разрушающую способность кроссовера на 12%. При оценке  $BLX - \alpha$  кроссовера в качестве тестовой функции использовалось вероятностное обобщение функции Розенброка, предложенное Xin-She Yang:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n-1} \left[ (1 - x_i)^2 + 100 \varepsilon_i (x_{i+1} - x_i^2)^2 \right] \quad (7)$$

Оператор мутации для вещественного кодирования заключается в изменении всех или нескольких генов при заданной вероятности  $P_M$ , которая задается величиной обратной количеству генов в хромосоме  $N2$  ( $P_M = N2^{-1}$ ). Вследствие этой процедуры количество потомков удваивается и в целом размер самой популяции становится в два раза больше. Благодаря этому пространство поиска решений вырастает уже на первом шаге, что позволяет, в свою очередь, избежать попадания решения в локальный оптимум.

Далее цикл работы генетического алгоритма замыкается и происходит повторное обращение этапу отбора, на котором количество особей сводится к начальному. Для этого снова используется целевая функция. Отбираются особи с наибольшим значением целевой функции.

Описанные этапы работы алгоритма объединяются в одну итерацию. Итерационный процесс генетического алгоритма завершается, когда разница между значениями целевой функции «худшей» особи и «лучшей» практически отсутствуют.

В результате такого подхода значение ошибки прогнозирования снизилось с 10,5 до 2,09% (рис. 10).

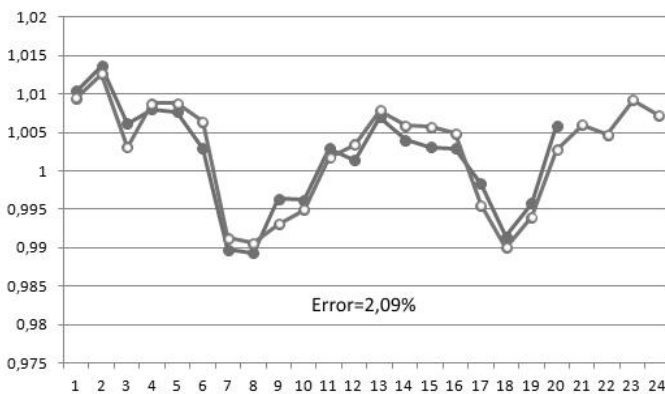


Рисунок 10 Результаты прогнозирования после настройки модели

**Четвертая глава** описывает файлы и классы программного комплекса моделирования динамики сыпучих сред. При этом можно выделить низкоуровневую и высокоуровневую компоненты (рис. 11).

В данной главе также описывается программный модуль прогнозирования коэффициент устойчивости грунтового массива (рис. 12).

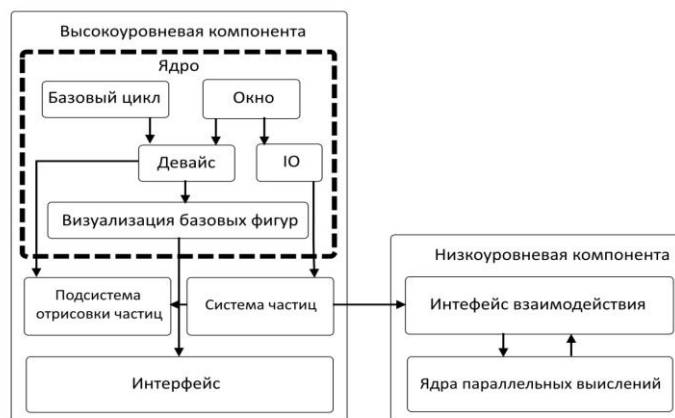


Рисунок 11 Программный комплекс моделирования динамики сыпучих сред

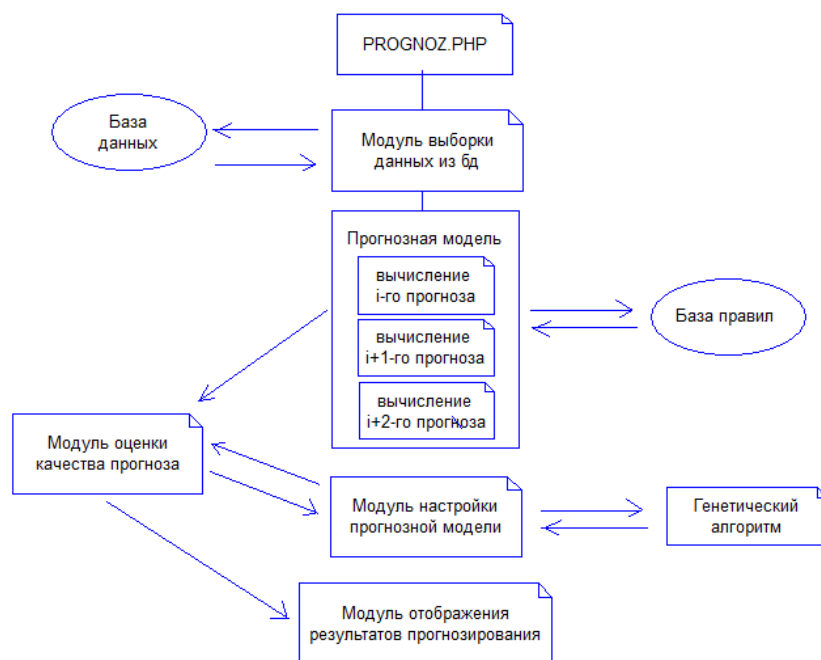


Рисунок 12 Блок-схема прогнозного модуля

В таблице 2 представлена выборка из прогноза, ставящая в соответствие определенное значение коэффициента устойчивости насыпи ее геометрии.

Таблица 2. Результат работы прогнозной модели

Временной шаг симуляции	Значение коэффициента устойчивости	Геометрия насыпи
t=21	$\mu=1,002$	
t=22	$\mu=1,0035$	
t=23	$\mu=1,007$	
t=24	$\mu=1,0072$	

### Основные результаты работы

Основным результатом настоящей диссертационной работы является разработка бионических нечетких моделей и алгоритмов для исследования систем многоточечных масс при формировании устойчивой сыпучей насыпи. Следует отметить ключевые результаты:

1. Алгоритм поведения системы многоточечных масс в трехмерном пространстве при формировании сыпучей насыпи с использованием графического процессора.
2. Модель и алгоритм прогнозирования устойчивости насыпи с помощью нечеткой логики и ситуационной сети.
3. Модифицированный генетический алгоритм для настройки коэффициентов модели прогнозирования, позволяющий сделать поиск оптимальных параметров для нечеткой модели более эффективным.

4. Программный комплекс для проведения вычислительного эксперимента по предложенным алгоритмам.

#### **Публикации автора в журнале, индексируемом в Agris**

1. Коробкин Е.А. Приложение теории искусственного интеллекта в задачах моделирования устойчивости грунтового массива/ И.Ф. Астахова, Е.А.Коробкин// Лесотехнический журнал. – 2015. - № 4. – С. 7-14.

#### **Публикации автора в изданиях, рекомендованных ВАК**

2. Коробкин Е.А. Применение технологии CUDA для симуляции частиц при параллельном программировании/Е.А. Коробкин , И.Ф. Астахова// Программные продукты и системы, 2013.- № 1 (101). – С. 146-150.
3. Коробкин Е.А. Разработка нечеткой модели прогнозирования устойчивости грунтового массива / Е.А.Коробкин, И.Ф.Астахова, А.И.Шашкин // Вестник Воронежского государственного университета. Серия Системный анализ и информационные технологии. – 2015. - № 1. – С. 98-106.

#### **Свидетельства о регистрации программ**

4. Коробкин Е.А. Разработка нечеткой модели прогнозирования устойчивости грунтового массива/ Е.А. Коробкин , И.Ф. Астахова.// Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015660382 от 30 сентября 2015 г.
5. Коробкин Е.А. Технология CUDA для метода дискретных элементов в параллельной среде/ Е.А.Коробкин // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661068 от 15 октября 2015 г.

#### **Статьи и материалы конференций**

6. Коробкин Е.А. Технология CUDA для метода дискретных элементов в параллельной среде/ Е.А. Коробкин , И.Ф. Астахова // Современные информационные технологии и ИТ-образование: Сб. труд. VII межд. научно-практ. конф. – М.: ИН-ТУИТ.РУ, 2012. – С. 899-903.
7. Коробкин Е.А. Метод дискретных элементов в параллельной среде с использованием технологии CUDA/ Е.А. Коробкин , И.Ф. Астахова, А.Н. Кальной // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: Сб. труд. межд. конф. - Воронеж: Издательско-полиграфический центр ВГУ, 2012.- С. 25-26.
8. Коробкин Е.А. Принципы функционирования модуля прогнозирования коэффициента устойчивости грунтового массива, основанного на нечеткой логике/ Е.А. Коробкин// Теоретические и прикладные аспекты современной науки: Сб. научн. тр. по мат. VII межд. научно-практ. Конф. – Белгород: ИП Петрова М.Г., 2015. – Часть I. – С. 12-15.
9. Коробкин Е.А. Использование генетического алгоритма для настройки модели прогнозирования устойчивости грунтового массива/ Е.А. Коробкин// Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке: XIII научно-практ. конф. – М: Международное научное объединение “Prospere”, 2015. – С. 23-27.
10. Коробкин Е.А. Использование генетического алгоритма для настройки модели прогнозирования устойчивости горной породы/ Е.А. Коробкин, И.Ф. Астахова// Современные методы теории краевых задач: мат. межд. конф.: Воронежская весенняя математическая школа "Понтрягинские чтения – XXVI" –Воронеж: Изд. дом ВГУ, 2015. - С. 19-22.

11. Коробкин Е.А. Разработка модели прогнозирования на основе нечеткой логики с использованием генетического алгоритма для настройки / Е.А. Коробкин, И.Ф. Астахова// Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: Сб. труд. межд. Научно-техн. конф. - Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2015.- С. 214-218.

В материалах [1-4], [6-7], [10-11], опубликованных с соавторами, Е.А.Коробкину принадлежит разработка моделей и алгоритмов, а также программная реализация. Соавторам принадлежит помощь в постановке задач и программной реализации.