

На правах рукописи

**Воронцов Ярослав Александрович**

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ С  
НЕЧЕТКИМИ ПАРАМЕТРАМИ И ЧЕТКИМИ  
ОТНОШЕНИЯМИ**

05.13.18 — математическое моделирование, численные методы  
и комплексы программ

**Автореферат**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Воронеж — 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Воронежский государственный университет»

Научный руководитель: **Матвеев Михаил Григорьевич**  
доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный университет, заведующий кафедрой информационных технологий управления

Официальные оппоненты: **Фамилия Имя Отчество,**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
Основное место работы с длинным длинным длинным длинным длинным длинным длинным длинным названием,  
**Анисимов Дмитрий Николаевич,**  
кандидат технических наук, доцент,  
Московский энергетический институт,  
заместитель заведующего по научной работе

Ведущая организация: Тверской государственный технический университет

Защита состоится «    » марта 2015 г. в XX часов на заседании диссертационного совета Д.212.038.020 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Воронежский государственный университет» Название учреждения по адресу: 394006, г. Воронеж, Университетская пл., д. 1, ауд. 335.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Воронежского государственного университета.

Автореферат разослан «    » февраля 2015 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук      Фамилия Имя Отчество  
доцент

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Работа Лотфи А. Заде «Fuzzy Sets», появившаяся в 1965 г. в журнале *Information and Control*, заложила основы моделирования интеллектуальной деятельности человека. Последовавшее за публикацией Заде бурное развитие теории нечётких множеств и появление понятия «мягкие вычисления» привело к тому, что в математическом моделировании стало возможным использование качественных элементов и расплывчатых количественных оценок. Это позволило расширить возможности учёта различных видов неопределённости, для описания которых в течение долгого времени в моделях использовались методы теории вероятностей и математической статистики.

Фаззификация известных ранее классических задач и создание новых нечётких моделей привела к появлению новых методов решения, позволяющих применять экспертные оценки на различных этапах моделирования. В работах известных зарубежных (D. Dubois, R. Fuller, A. Prade, R. Yager, L. Zadeh, H. Zimmermann и др.) и отечественных (В. Г. Балашов, А. Н. Борисов, В. В. Борисов, В. В. Круглов, А. А. Усков и др.) учёных и исследователей рассмотрено и проанализировано множество применений результатов теории нечётких множеств и мягких вычислений к решению задач выбора, управления и принятия решений. Обратной стороной повсеместного увлечения нечёткостью стало возникновение противоречий между решениями, полученными с применением новых методов, и результатами классических теорий, потеря устойчивости решений, нарушение естественных отношений в моделях, в которых нечёткими являются только параметры, неоправданное расширение степени нечёткости результата, повышение вычислительной сложности задач.

Актуальность темы исследования определяется необходимостью разработки математических моделей, численных методов и программ, позволяющих единообразно решать различные задачи с чёткими отношениями и нечёткой неопределённостью параметров как совокупность нескольких чётких, используя при этом классические методы решения и моделирования и обеспечивая требуемые в конкретной задаче качественные свойства решения.

Диссертационная работа выполнена в рамках одного из основных научных направлений Воронежского государственного университета «Информационные технологии организационно-технического управления в условиях случайной и нечеткой неопределенности».

**Цели и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является построение и исследование моделей учёта нечёткой неопределённости, обеспечивающих требуемые свойства решения различных производственных задач, а также разработка методов эффективного численного решения на основе вводимых моделей.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. анализ существующих методик нечётких вычислений с точки зрения сохранения свойств решения задач;
2. разработка модели представления нечётких чисел, позволяющей максимально сохранять исходную экспертную информацию и обеспечить требуемые качественные свойства решений (устойчивость, сохранение чётких математических соотношений и т. п.);
3. разработка методики эффективной численной реализации решения задач с нечёткими параметрами, основанной на подходящих алгебраических структурах и её тестирование на примере задачи сетевого планирования с нечёткими параметрами;
4. разработка и верификация программного обеспечения, реализующего предложенную модель представления нечётких параметров и методики численного решения задач с нечёткими параметрами.

**Методы исследования.** В диссертационной работе использованы основные положения и методы теории нечётких множеств, мягких вычислений, интервального анализа, теории алгебраических структур, теории графов, численных методов. При создании программного обеспечения использовались технологии модульного и объектно-ориентированного программирования.

**Тематика работы.** Содержание диссертации соответствует п. 1 «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений», п. 3 «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий», п. 8 «Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования» паспорта специальности 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

**Научная новизна.** В диссертационной работе получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. предложена модификация метода моделирования экспертных числовых оценок, полученных в классе LR-чисел, отличающаяся наличием L-преобразования LR-числа в соответствующие LL/RR-числа;
2. предложены эффективные вычислительные методы решения задач с нечёткими параметрами, отличающиеся использованием описанной в работе алгебраической структуры с групповыми свойствами (со свойствами, эквивалентными полю действительных чисел) и позволяющие параметрически управлять устойчивостью решения;
3. разработан программный комплекс для решения задач с нечёткими параметрами, реализующий предложенные в работе вычислительные методы, модули которого используют стандартные вычислительные операции (в отличие от специализированных программных пакетов, работающих с нечеткими числами).

**Достоверность научных результатов.** Научные положения, теоретические выводы и практические рекомендации обоснованы корректным использованием вы-

бранного математического аппарата и подтверждены результатами вычислительного эксперимента.

**Практическая значимость исследования** заключается в расширении сферы применимости методов моделирования с использованием чётких отношений и нечётких параметров. Подходы к нечётким вычислениям, предложенные в диссертации, позволяют существенно упростить процедуру расчётов без значительных потерь экспертной информации, а также использовать существующее стандартное программное обеспечение для решения различных производственных задач.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Разработанный программный комплекс «CSBusinessGraph» используется в практической деятельности по первоначальной оценке проектов ООО «ДатаАрт–Воронеж» (DataArt).

Теоретические результаты диссертации в форме моделей, алгоритмов и программ используются в производственном процессе ООО «ДатаАрт–Воронеж». Признана целесообразность использования предложенной в диссертации методики для оптимизации процедур первоначальной оценки проектов по разработке программного обеспечения.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на ежегодных научных сессиях Воронежского государственного университета и следующих конференциях различного уровня: международная конференция «Современные проблемы прикладной математики, теории управления и математического моделирования» (Воронеж, 2012 г.); международная конференция «Информатика: проблемы, методология, технологии» (Воронеж, 2012–2013 гг.); международный научно-технический семинар «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации» (Алушта, 2013–2014 гг.); научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2014).

**Публикации.** По теме диссертационного исследования опубликовано 11 научных работ [1]– [2], в том числе 4 [2–5] — в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. В работах, выполненных в соавторстве: в [4] предложено преобразование  $L$  и алгебра модифицированных нечётких чисел; в [3] выполнен анализ существующих методов сравнения нечётких чисел и предложен метод сравнения для модифицированных  $LL/RR$ -чисел; а в [5] — предложено определение устойчивости задачи нечёткого линейного программирования и разработан алгоритм решения задачи календарно-сетевого планирования и управления с нечёткими параметрами, позволяющий получать устойчивое решение.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации **XXX** страниц текста с **XX** рисунками и 5 таблицами. Список литературы содержит **XXX** наименований, включая работы автора.

## Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, кратко изложены структура и содержание диссертации, определены научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В **первой главе** приведены основные понятия теории нечётких множеств и описаны актуальные модели представления нечёткой информации, используемые в дальнейшем при описании исследования. Дано определение нечётких моделей и их классификация в зависимости от этапа применения нечёткой математики — при описании системы, при задании параметров, при задании входов, выходов и состояний (модели первого, второго и третьего типа). В работе предложена классификация нечётких моделей на основе применяемого в них языка описания выбора, объединённая с вышеописанной (рис. 1). В качестве объекта исследования выбраны модели, использующие чёткие отношения и нечёткие параметры (модели второго типа).

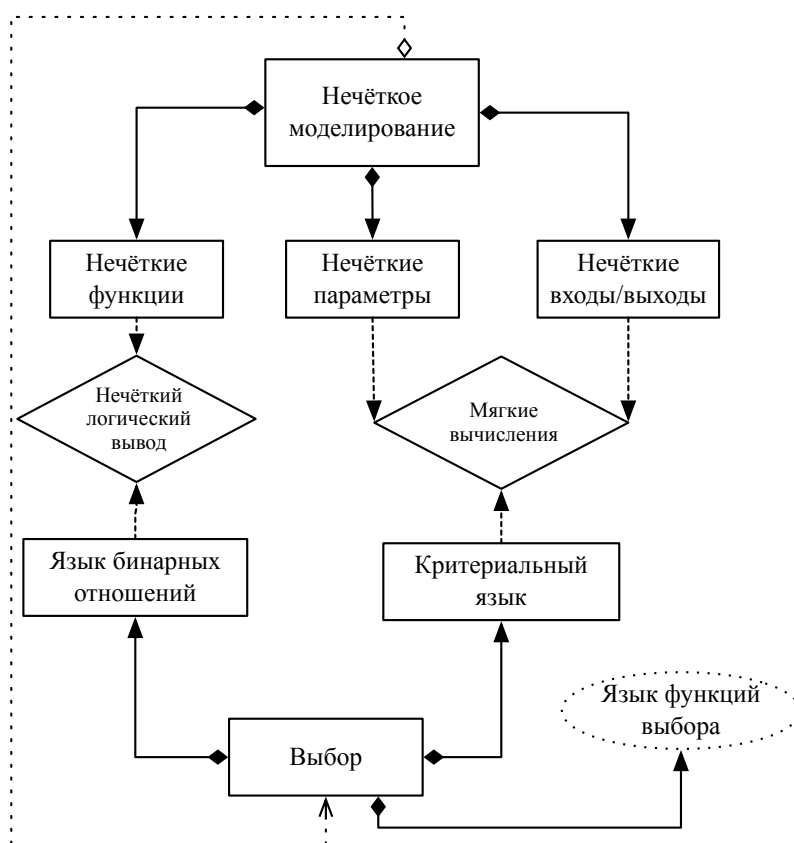


Рис. 1: Предлагаемая классификация нечётких моделей

Особенностью рассматриваемых моделей является то, что существующие подходы к нечётким вычислениям далеко не всегда применимы в них. Нечёткий логический вывод неадекватен моделям второго типа, поскольку рассчитан на нечёткость отношений, отсутствие формализованных математических моделей либо способов решения с помощью классической теории. Лежащие в основании большинства способов «мягких вычислений» алгебраические структуры (в

основном решётки) и отсутствие отношения линейного порядка приводят к нарушениям естественных математических отношений и неоправданному расширению неопределённости результата. В диссертации формулируются основные требования к модели представления нечёткой информации и методам решения задач второго типа — получение устойчивого решения, непротиворечивость естественным математическим отношениям, ограничение расширения неопределённости, — и вводятся требования вычислительной эффективности и возможности применения стандартных программных комплексов, предназначенных для чётких вычислений.

**Вторая глава** диссертации посвящена разработке и исследованию методов моделирования и обработки нечетких числовых величин, которые удовлетворяли бы выдвинутым к ним в главе 1 требованиям.

**В третьей главе** происходит тестирование разработанных моделей и методов обработки нечетких числовых величин на примере задачи сетевого планирования с нечёткими временными оценками.

**В четвертой главе** рассмотрено применение методов, представленных в диссертации, для усовершенствования процесса предварительного планирования проектов по разработке программного обеспечения. Отличительной особенностью таких проектов является наличие нечёткой неопределённости сроков выполнения операций, обусловленной внешними факторами.

В качестве средства разработки применяется интегрированная среда Microsoft Visual Studio 2010. Особенностью разработанного программного продукта «CSBusinessGraph» является то, что он не использует никаких специализированных средств и третьесторонних библиотек для представления нечётких чисел и выполняет все вычисления только с использованием действительных переменных.

К основным *функциональным возможностям* программного продукта относятся: создание модели проекта в виде вершинного графа в ручном режиме или импорт существующей модели из XML-файла; поддержка модели проекта в согласованном состоянии — проверка отсутствия циклов в графе и наличие только одной компоненты связности; формирование временных оценок выполнения операций, выраженных в виде треугольных чисел; автоматическое преобразование вершинного графа в стрелочный; реализация механизма расчёта критического пути на основе  $\alpha$ -уровневых и двухточечных вычислений с применением выбранного пользователем вида значений параметров  $\lambda$  преобразования L; экспорт отчёта о решении задачи в формат Microsoft Excel с формированием графиков для модифицированных нечётких оценок, общего времени выполнения проекта и построением стрелочного графа с выделением критических операций.

На рис. 2 изображено главное окно приложения с открытым в нём проектом.

**В заключении** приводятся основные результаты диссертации.

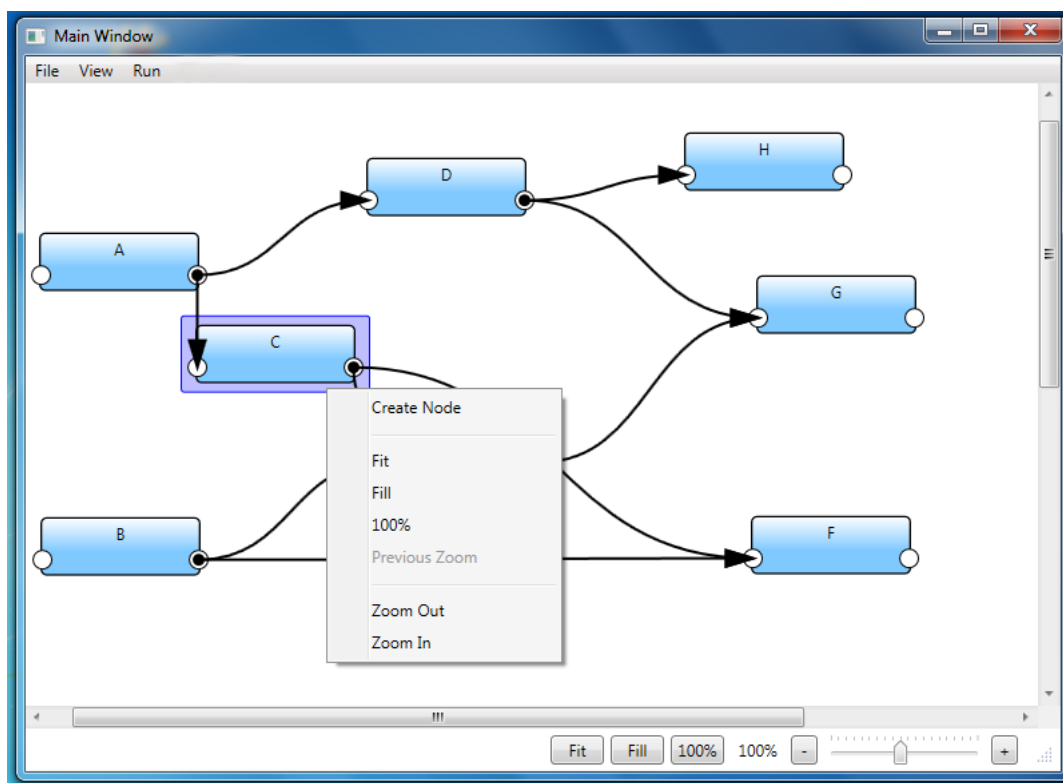


Рис. 2: Главное окно приложения

### Основные результаты работы

1. Предложен комплекс методов для моделей с чёткими отношениями и нечёткими параметрами, позволяющий применять классические методы решения задач и достигать требуемых качественных свойств решения — устойчивости, сохранения естественных математических соотношений и т. п..
2. На основе результатов анализа существующих моделей представления нечёткой числовой информации разработана параметрическая модель представления нечёткого числа, позволяющая максимально сохранять исходную экспертную информацию, а также метод двухточечных вычислений, приводящий к эффективной численной реализации решения задач, основанной на подходящих алгебраических структурах.
3. В рамках метода двухточечных вычислений рассмотрена проблема устойчивости решения задачи линейного программирования с нечёткими параметрами, обосновано введение свёртки критериев для управления устойчивостью и сформулирован алгоритм получения устойчивого решения задачи.
4. Предложенные методы решения задач с нечёткими параметрами апробированы на задаче сетевого планирования с нечёткими временными оценками. Полученное в результате решение соответствует решениям, найденным с помощью других методов, хорошо зарекомендовавших себя в мировой практике.



5. Разработан программный комплекс, позволяющий решать задачу оценки сроков и рисков при разработке программного обеспечения как задачу сетевого планирования с нечёткими временными оценками.

## Основные публикации по теме диссертации

1. Воронцов Я. А., Матвеев М. Г. Информационные технологии управления проектами в условиях расплывчатой неопределённости // Современные проблемы прикладной математики, теории управления и математического моделирования: материалы V международной конференции. Воронеж, 11-16 сентября 2012 г. Дополнительный выпуск. Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2012. С. 8–10.
2. Воронцов Я. А., Матвеев М. Г., Канищева О. И. Арифметические операции над двухкомпонентными нечёткими числами // Вестник ВГУ, серия «Системный анализ и информационные технологии». 2014. № 2. С. 75–82.
3. Воронцов Я. А., Матвеев М. Г. Методы параметризованного сравнения нечётких треугольных и трапециевидных чисел // Вестник ВГУ, серия «Системный анализ и информационные технологии». 2014. № 2. С. 90–97.
4. Воронцов Я. А., Матвеев М. Г. Алгебраические операции с нечеткими LR-числами с использованием преобразования L // Программная инженерия. 2014. № 8. С. 23–29.
5. Воронцов Я. А., Матвеев М. Г. Устойчивость решения в задаче о критическом пути с нечёткими параметрами // Вестник ВГТУ. 2014. № 7. С. 90–97.
6. Воронцов Я. А., Матвеев М. Г. Влияние преобразования L на результаты арифметических операций с нечёткими LR-числами // Сборник трудов XXII международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации», Алушта, 18–24 сентября 2013 г. М.: Изд-во МГУПИ, 2013. С. 14–15.
7. Воронцов Я. А., Матвеев М. Г. Устойчивость критического пути в задаче сетевого планирования с нечёткими параметрами // Сборник трудов XXIII международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации», Алушта, 14–20 сентября 2014 г. М.: ИКД «Зерцало-М», 2014. С. 73–74.
8. Воронцов Я. А., Матвеев М. Г. Исследование свойств линейного отображения в задачах с нечёткими параметрами // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XIII научно-методической конференции. 7–8 февраля 2013 г.: в 4 т. Т. 1. Воронеж: Издательско-полиграфический центр ВГУ, 2013. С. 298–304.
9. Воронцов Я. А., Матвеев М. Г. Постановка задачи об устойчивости альфа-уровневого метода поиска нечёткого критического пути // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XIV Международной научно-методической конференции, Воронеж, 6–8 февраля 2014 г.: в 4 т. Т. 2. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2014. С. 360–363.
10. Воронцов Я. А., Матвеев М. Г. Разработка информационных технологий и средства управления проектами в условиях расплывчатой неопределённости // Сборник студенческих научных работ факультета компьютерных наук ВГУ / под ред. к.ф.-м.н. Е. А. Сирота. Воронеж: Издательско-полиграфический центр ВГУ, 2012. С. 30–35.
11. Воронцов Я. А., Матвеев М. Г. Способ решения нечёткой задачи КСПУ с использованием преобразования L // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: двадцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: тезисы докладов. Москва, 27–28 февраля 2014 г.: в 4 т. Т. 2. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. С. 58.