

*На правах рукописи*

УШАКОВ Дмитрий Михайлович

**ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ СРЕДА  
ДЛЯ НЕДООПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ**

05.13.11 — математическое и программное  
обеспечение вычислительных машин,  
комплексов, систем и сетей

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск 1998

Работа выполнена в Новосибирском государственном университете.

**Научный руководитель:** кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
*Телерман В. В.,*

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук,  
профессор  
*Замулин А. В.,*

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
*Шарый С. П.,*

**Ведущая организация:** Институт математики СО РАН

Защита состоится "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1998 г. в \_\_\_\_ ч. \_\_\_\_ мин. на заседании специализированного совета К0003.93.01 в Институте систем информатики Сибирского отделения РАН по адресу:

630090, Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале библиотеки ИВМиМГ СО РАН (пр. ак. Лаврентьева, 6).

Автореферат разослан "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1998 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
К0003.93.01  
к. ф. -м. н.

М. А. Бульонков

**Общая характеристика работы.** Настоящая диссертация посвящена описанию объектно-ориентированной среды для недоопределенных вычислений. Дается теоретическое обоснование используемого подхода, описывается программный комплекс, реализующий данный подход, приводятся результаты экспериментов по использованию этого комплекса для спецификации и решения задач различных классов.

**Актуальность темы.** В научных исследованиях, проводимых в рамках дисциплины *искусственный интеллект*, важное место занимают проблемы представления и обработки знаний на основе универсальных методов решения задач. Результатом таких исследований является разработка различных парадигм представления знаний и создание на их основе новых языков программирования высокого уровня. Многие концепции и подходы, предложенные в этих языках, широко используются в промышленном программировании. В настоящее время акцент исследований в этой области сместился в сторону парадигмы *программирования в ограничениях*.

Программирование в ограничениях базируется на результатах исследований методов решения *задач удовлетворения ограничений* (ЗУО). Задачи этого класса определяются совокупностью *ограничений*, связывающих между собой значения различных переменных. Решением задачи является такое означивание переменных, которое *удовлетворяет* всем заданным ограничениям. Многие задачи, возникающие в различных областях науки и техники, можно отнести к этому классу задач. Алгоритмы, разработанные для их решения, показали свою эффективность на реальных приложениях. Большинство таких алгоритмов являются специализированными (т. е. применимыми только к конкретным видам ЗУО). Актуальной проблемой является разработка универсальных алгоритмов решения задач удовлетворения ограничений. Одним из таких алгоритмов является предложенный А. С. Нариньяни в начале 1980-х годов метод *недоопределенных вычислений*. Однако до сих пор не было теоретического обоснования этого метода и его свойств.

К *языкам программирования в ограничениях* относят языки программирования, обладающие средствами спецификации и решения ЗУО. Как правило, эти языки являются расширениями существующих языков программирования. Такому подходу присущи следующие недостатки: средства спецификации ЗУО ограничиваются выразительными возможностями базового языка, а семантика расширенного языка становится недостаточно прозрачной. Таким образом, актуальной проблемой

становится создание нового концептуально целостного языка программирования в ограничениях.

**Целью диссертационной работы** является разработка принципиально нового языка программирования в ограничениях, основанного на концепции недоопределенных моделей, с использованием объектно-ориентированного подхода, теоретическое исследование процесса решения задач удовлетворения ограничений с помощью аппарата недоопределенных моделей, создание программного комплекса *HeMo+*, включающего в себя развитые средства спецификации и решения задач.

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

- для решения задач удовлетворения ограничений предложено формальное понятие недоопределенного расширения многосортной модели, классифицированы различные виды недоопределенности; определена денотационная семантика алгоритма удовлетворения ограничений в недоопределенных моделях; доказана независимость результата алгоритма от порядка вычислений;
- создан объектно-ориентированный язык спецификации задач удовлетворения ограничений в недоопределенных моделях; разработана архитектура программного комплекса *HeMo+*, предназначенного для интерпретации программ на этом языке.

**Апробация полученных результатов и практической ценности работы.** Реализован программный комплекс *HeMo+*, включающий в себя полный набор средств, необходимых для обработки программ на предложенном языке. Проведенная серия экспериментов показывает эффективность применения комплекса при решении задач с конечными областями значений, численных задач, задач с таблицами, задач ресурсного планирования и задач из области САПР.

Результаты работы докладывались на XXXIII Международной научной студенческой конференции "Студент и научно-технический прогресс" (Новосибирск, 1995), Третьей международной студенческой школе-семинаре "Новые информационные технологии" (Крым, 1995), Andrei Ershov Second International Memorial Conference "Perspectives of System Informatics" (Novosibirsk, Russia, 1996), Пятой национальной конференции с международным участием "Искусственный интеллект - 96" (Казань, 1996), XI Международном совещании по интервальной математике (Новосибирск, 1996), The 6th International Conference, EWHCI'96 (Moscow, Russia, 1996), International Conference AISMC-3 (Steyr, Austria, 1996), XII Международном совещании по интервальной математике (Крас-

ноябрь, 1997), The 3rd International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming - CP'97 (Linz, Austria, 1997).

По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем работы - 160 страниц (включая список использованной литературы и два приложения). Работа включает 8 таблиц и 6 рисунков.

**Содержание работы.** Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, описываются ее основные цели, научная новизна, практическая ценность, приводится краткий обзор содержания глав.

**Первая глава** посвящена описанию области исследований — программированию в ограничениях. В **разделе 1.1** дается определение задачи удовлетворения ограничений, показываются преимущества выделения таких задач в отдельный класс, приводятся примеры реальных задач этого класса.

В самой общей постановке *задачу удовлетворения ограничений* (далее — ЗУО) можно определить как четверку  $(D, R, V, C)$ , где  $D$  — множество *областей*,  $R$  — множество *отношений* различной арности над этими областями,  $V$  — множество *переменных*, с каждой из которых связана область ее возможных значений,  $C$  — множество *ограничений*, связывающих значения переменных из  $V$  посредством отношений из  $R$ . *Решение* ЗУО  $(D, R, V, C)$  — это такое означивание переменных  $V$ , которое сопоставляет каждой переменной значение из ее области, такое что для любого ограничения  $c \in C$  выполняется соответствующее отношение над значениями связанных им переменных.

Выделение задач удовлетворения ограничений в отдельный класс приносит следующие выгоды. Благодаря общему подходу к задачам такого типа были разработаны различные *кооперативные* методы их решения, позволяющие применять к задачам комбинации известных методов. Еще важнее здесь появление ряда *универсальных* алгоритмов решения задач удовлетворения ограничений. Подход к спецификации задачи как задачи удовлетворения ограничений позволяет полностью избавиться от всех процедурных деталей спецификации. Специфика задач удовлетворения ограничений позволила ввести новую компоненту знаний — *недоопределенность*.

Основными примерами ЗУО могут служить задачи моделирования, проектирования, компьютерного зрения, построения человеко-машинных интерфейсов, управления мультиагентными системами.

Исторический обзор работ в области программирования в ограничениях, приведенный в **разделе 1.2**, позволяет оценить успехи, достигнутые в этой области знаний.

**Раздел 1.3** посвящен классификации и анализу различных задач удовлетворения ограничений и алгоритмов их решения. Предлагается классификация по нескольким категориям:

- области значений переменных (конечные области, числовые области, составные области, иерархии классов),
- виды отношений (экстенциональные и интенциональные),
- способ представления значений переменных (единичные значения, экстенциональные и интенциональные множественные значения),
- язык спецификации ограничений (язык атомов, язык термов, язык первого порядка),
- алгоритмы удовлетворения ограничений (*точные*: метод проб и ошибок, перебор с возвратами, метод Гаусса для систем линейных уравнений, симплекс-метод; *приблизительные*: итерационные методы решения систем уравнений и их интервальные аналоги, методы достижения локальной совместности сети ограничений; *кооперативные* методы решения задач).

В **разделе 1.4** обсуждаются известные системы программирования в ограничениях. Выделяются четыре класса таких систем:

- "чистое" программирование в ограничениях,
- логическое программирование в ограничениях,
- императивное программирование в ограничениях,
- активные базы данных.

Кроме того, выделяется три способа реализации таких систем:

- в виде библиотеки к существующему языку программирования,
- в виде расширения существующего языка программирования,
- в виде нового языка программирования.

Указывается место комплекса *HeMo+* в спектре этих систем, из которого видно, что он не имеет прямых аналогов, а по своим функциональным возможностям превосходит большинство известных систем. Комплекс обладает богатым языком спецификации знаний в виде задач удовлетворения ограничений, для решения которых используется универсальный алгоритм распространения ограничений, работающий над произвольными областями. По спектру решаемых задач комплекс покрывает большинство других систем программирования в ограниче-

ниях.

Во **второй главе** приводится теоретическое обоснование процесса решения задач удовлетворения ограничений на основе аппарата недоопределенных моделей. В **разделе 2.1** вводится необходимый формализм для описания ЗУО: многосортные алгебраические модели. Стандартным образом определяются понятия *многосортной сигнатуры, модели, термов, атомов* и *оценки переменных*. Выделяется специальный класс формул: *экзистенциальные конъюнкции атомов*, для которых определяется понятие *выполнимости* в заданной модели и *свидетеля выполнимости* (оценки переменных). Выделяется специальный класс простейших атомов — *ограничений*, которые включают в себя не более одного предикатного или функционального символа сигнатуры и связывают различные переменные. Определяется *задача удовлетворения ограничений* в многосортной модели как экзистенциальная конъюнкция, все атомы которой суть ограничения. Формулируется и доказывается предложение 1.1, утверждающее, что любая экзистенциальная конъюнкция может быть преобразована за конечное число шагов в эквивалентную ей задачу удовлетворения ограничений. В доказательстве предложения приводится алгоритм такого преобразования.

В **разделе 2.2** вводится понятие *недоопределенного расширения* ( $H$ -расширения) многосортной модели, являющееся развитием одноименного понятия, предложенного А. С. Нариньяни. Недоопределенное расширение заданной многосортной модели представляет собой модель той же сигнатуры, в которой носитель каждого сорта ( $H$ -носитель) есть конечный набор подмножеств носителя этого сорта в исходной модели, замкнутый относительно пересечения и содержащий в себе максимальный (весь носитель) и минимальный (пустое множество) элементы. Определяется *аппроксимация* любого множества значений в  $H$ -расширении как наименьший элемент  $H$ -носителя, содержащий это множество. Операции  $H$ -расширенной модели определяются как аппроксимации образов исходных операций на заданных множествах значений. Предикаты  $H$ -расширенной модели ( $H$ -предикаты) определяются как отношения, выполняющиеся над множествами значений, если аппроксимация пересечения декартова произведения этих множеств с предикатом в исходной модели совпадает с этим декартовым произведением. В предложении 2.2 доказывается корректность предиката равенства в  $H$ -расширенной модели. Далее в диссертации устанавливается связь между понятием  $H$ -предиката и классическим понятием локальной совместности мно-

жеств значений, предложенным Mackworth. Для этого понятие локальной совместности сначала обобщается на случай многосортных моделей, затем вводится понятие  $H$ -совместности как аппроксимация понятия совместности. Лемма 2.1 показывает связь между аппроксимацией и проекциями множества. Наконец, предложение 2.3 формулирует эквивалентность понятий  $H$ -предиката и  $H$ -совместности его аргументов. В качестве реального примера недоопределенного расширения модели рассматривается интервальное расширение множества вещественных чисел, операций и отношений над ним. В конце раздела обсуждаются свойства оценок переменных в  $H$ -расширении модели ( $H$ -оценок). Показывается, что множество всех  $H$ -оценок является частично упорядоченным множеством с наибольшим элементом. Определяется операция пересечения  $H$ -оценок и отношение принадлежности точной оценки недоопределенной оценке. Понятие  $H$ -совместности распространяется на множество  $H$ -оценок. Формулируется основная задача недоопределенных моделей (их декларативная семантика): *найти такую наибольшую  $H$ -оценку переменных, которая  $H$ -совместна со всеми ограничениями заданной ЗУО.*

В разделе 2.3 определяется денотационная семантика распространения ограничений в недоопределенных моделях. Для этого вводится понятие *фильтрации* ограничения. Фильтрация — это отображение, действующее на множестве  $H$ -оценок переменных в заданной модели и сопоставляющее каждой  $H$ -оценке другую, которая

- содержится в исходной  $H$ -оценке,
- является  $H$ -совместной по отношению к фильтруемому ограничению,
- является максимальной  $H$ -оценкой среди всех, обладающих двумя вышеперечисленными свойствами.

В предложении 2.4 доказывается корректность такого определения, т. е. существование такой  $H$ -оценки. Лемма 2.2 устанавливает важные свойства фильтрации ограничения:

- *корректность* (если в исходной  $H$ -оценке содержались какие-либо свидетели выполнимости ЗУО в заданной модели, то фильтрация любого ограничения ЗУО не теряет этих свидетелей),
- *сжимаемость* (результатирующая  $H$ -оценка всегда содержится в исходной),
- *монотонность* (фильтрация более точной  $H$ -оценки всегда дает более точную  $H$ -оценку),
- *идемпотентность* (повторное применение одной и той же филь-



традии не изменяет  $H$ -оценку).

Эти свойства фильтрации позволяют сформулировать главный результат теоретического раздела диссертации, оформленный в виде теоремы 2.1: для любой ЗУО и любой многосортной модели существует максимальная  $H$ -оценка, которая является  $H$ -совместной по отношению к каждому ограничению ЗУО в этой модели, более того, все свидетели выполнимости ЗУО в данной модели содержатся в этой  $H$ -оценке. Такая  $H$ -оценка является наибольшей неподвижной точкой системы фильтраций всех ограничений ЗУО. Эта неподвижная точка определяет *денотационную семантику* процесса распространения ограничений в недоопределенных моделях.

В **разделе 2.4** описывается операционная семантика распространения ограничений в недоопределенных моделях на основе схемы *поточковых вычислений*. Для формального описания этой схемы вводится понятие *абстрактной машины с состояниями и правилами перехода* из состояния в состояние. Состояние абстрактной машины — это некоторая  $H$ -оценка переменных вместе с множеством *активных* ограничений. Такая  $H$ -оценка рассматривается как информация о единичных (точных) значениях переменных ЗУО, т. е. информация о всех свидетелях выполнимости ЗУО в заданной модели. Переходы между состояниями выполняются фильтрациями активных ограничений. В *начальном состоянии* все ограничения ЗУО являются активными, а  $H$ -оценка — максимально неопределенной. После фильтрации ограничения оно становится пассивным, но все ограничения, чьи переменные изменили свои  $H$ -значения во время этой фильтрации, помещаются в множество активных ограничений. Процесс останавливается (достигается *конечное состояние*), когда множество активных ограничений становится пустым.  $H$ -оценка, полученная в конечном состоянии абстрактной машины, определяет *операционную семантику* распространения ограничений. В предложении 2.5 устанавливаются следующие свойства такой абстрактной машины:

- *завершаемость* (существование верхней оценки числа шагов, за которые машина обязательно придет в конечное состояние),
- *корректность* (все конечные состояния одинаковы, и вычисленная  $H$ -оценка является наибольшей  $H$ -совместной со всеми ограничениями ЗУО  $H$ -оценкой переменных в заданном  $H$ -расширении модели).

Таким образом, корректность процесса гарантирует нам эквивалентность денотационной и операционной семантик. В технологии програм-

мирования на основе недоопределенных моделей используются различные стратегии выбора активного ограничения для фильтрации в каждом состоянии. Одна из стратегий заключается в приписывании каждому ограничению некоторого числа, играющего роль (статического или динамического) приоритета, и выбора ограничения с максимальным приоритетом из множества активных ограничений. Другой возможностью является асинхронная параллельная обработка таких переходов.

В определении 2.14 вводится формальное понятие *недоопределенной модели* как шестерки  $P = (\Sigma, X, \mathcal{C}, M, {}^*M, \mathcal{M})$ , где  $\Sigma = (S, F, P)$  — многосортная сигнатура,  $X$  —  $S$ -индексированное множество переменных,  $\mathcal{C}$  —  $\Sigma(X)$ -задача удовлетворения ограничений,  $M$  —  $\Sigma$ -модель,  ${}^*M$  —  $N$ -расширение  $M$ , и  $\mathcal{M}$  — абстрактная машина для вычисления наибольшей  $N$ -совместной по отношению к  $\mathcal{C}$  оценки переменных  $X$  в  ${}^*M$ , содержащей всех свидетелей выполнимости ЗУО  $\mathcal{C}$  в  $M$ .

В **разделе 2.5** рассматривается метод поиска точных решений ЗУО.  $N$ -оценка переменных в заданном  $N$ -расширении многосортной модели называется *непротиворечивой*, если она содержит по крайней мере одну точную оценку. Если полученная в результате распространения ограничений  $N$ -оценка противоречива, то мы можем утверждать, что ЗУО не выполняется в рассматриваемой модели. Если финальная  $N$ -оценка непротиворечива, то ее можно разделить на две части и применить к каждой из них метод распространения ограничений. Для этого в определении 2.16 вводится понятие *бисекции*  $N$ -оценки. Бисекция — это разделение  $N$ -оценки на две части, каждая из которых содержится в исходной  $N$ -оценке, не совпадает с ней и является непротиворечивой. Кроме того, любая точная оценка переменных, содержащаяся в исходной  $N$ -оценке, содержится и в одной из результирующих  $N$ -оценок. Оценки, для которых возможно проведение бисекции назовем *делящимися*. В лемме 2.3 постулируется и доказывается тот факт, что такая бисекция может проходить по  $N$ -значению только одной переменной. Идея *метода бисекции* состоит в попеременном применении распространения ограничений и бисекции  $N$ -оценок вплоть до получения непротиворечивой и неделимой финальной  $N$ -оценки переменных, которую можно рассматривать как потенциальное точное решение ЗУО. Мы ставим перед собой задачу локализацию всех таких множеств потенциальных решений. Для формального описания операционной семантики этого процесса в определении 2.17 вводится новая абстрактная машина. *Состояние* этой абстрактной машины — это четверка, состоящая из теку-

щей  $H$ -оценки переменных, множества *активных ограничений*, множества *отложенных состояний* и множества *найденных "решений"*. Отложенное состояние — это пара, состоящая из  $H$ -оценки переменных и множества активных ограничений. "Решение" — это непротиворечивая неделимая  $H$ -оценка. В *начальном состоянии* текущей  $H$ -оценкой является максимально неопределенная  $H$ -оценка, а все остальные компоненты являются пустыми множествами. *Конечное состояние* — это состояние с противоречивой текущей  $H$ -оценкой и пустыми множествами активных ограничений и отложенных состояний. *Переход* из состояния в состояние выполняется по одному из четырех правил:

- фильтрация активного ограничения,
- бисекция текущей  $H$ -оценки,
- запоминание "решения",
- откат к отложенному состоянию.

Результатом работы такой абстрактной машины является множество найденных "решений" в конечном состоянии. Важные свойства введенной выше абстрактной машины формулируются и доказываются в предложении 2.6:

- количество шагов работы абстрактной машины можно оценить сверху величиной, зависящей только от заданного  $H$ -расширения модели,
- любой свидетель выполнимости ЗУО в заданной модели содержится в одном из найденных "решений".

Часто в реальных приложениях требуется найти *оптимальное* по заданному критерию решение задачи удовлетворения ограничений. Задача поиска оптимального решения ЗУО обсуждается в **разделе 2.6**. В определении 2.18 вводится формальное понятие оптимального свидетеля выполнимости ЗУО в заданной модели с линейно упорядоченным универсумом. Первый рассматриваемый метод для поиска такого оптимального свидетеля основан на понятии *упорядоченной бисекции*. Бисекция  $H$ -оценки называется упорядоченной, если результирующие  $H$ -оценки упорядочены в соответствии с линейным порядком на универсуме. Определение 2.20 вводит понятие абстрактной машины для вычисления оценки оптимального свидетеля методом упорядоченной бисекции. Эта машина является разновидностью машины описанной в предыдущем разделе, при этом множество отложенных состояний устроено в виде стека, а любая бисекция является упорядоченной по значению целевой переменной. Предложение 2.7 формулирует свойства

завершаемости этой абстрактной машины и корректности ее результата.

Другим способом поиска оптимального решения ЗУО является *метод ветвей и границ*. Определение 2.21 вводит абстрактную машину для формального описания операционной семантики этого метода, а в предложении 2.8 содержится доказательство его завершаемости и корректности.

**Раздел 2.7** посвящен описанию различных видов недоопределенных расширений, используемых в практических приложениях Н-моделей. Определения 2.22–2.26 вводят такие типы Н-расширений, как *точное*, *перечислимое*, *интервальное*, *мультиинтервальное* и *структурное* Н-расширения. В предложении 2.9 устанавливается связь между различными видами Н-расширений.

В **третьей главе** описывается объектно-ориентированная среда для недоопределенных вычислений *HeMo+*. В **разделе 3.1** описывается назначение комплекса. Программный комплекс *HeMo+* предназначен для решения задач удовлетворения ограничений посредством аппарата недоопределенных моделей. Для спецификации многосортных моделей комплекс имеет богатый язык представления знаний, основанный на объектно-ориентированном подходе. Комплекс *HeMo+* может применяться в следующих областях:

- научные и инженерные расчеты,
- моделирование физических, химических, социальных, экономических процессов,
- проектирование и планирование,
- создание проблемно-ориентированных решателей для их последующей интеграции в сложные программные комплексы (САПР, экспертные системы, системы реального времени, СУБД, электронные таблицы и др.)

Архитектура системы *HeMo+* описывается в **разделе 3.2**. Комплекс *HeMo+* состоит из нескольких взаимосвязанных программных компонент, среди которых можно выделить

- редактор текстов,
- компилятор модулей на языке *HeMo+*
- генератор вычислительной сети,
- потоковый вычислитель,
- библиотеки, содержащие код инструментальных типов данных и отношений,

- средства просмотра текстовых файлов,
- многооконный пользовательский интерфейс, который включает в себя все вышеперечисленные компоненты.

В диссертации приводится схема функционирования этих средств, перечислены требования к окружению, описана структура комплекса.

В **разделе 3.3** описан язык представления знаний системы *НеМо+*. Ключевыми понятиями этого языка являются понятия *класса*, *отношения*, *модуля*, *объекта*, *ограничения* и *модели*.

Класс определяет тип данных. Каждый класс имеет уникальное имя и может являться абстрактным, родовым, инструментальным, пользовательским. Абстрактные классы служат основой для всех типов данных. Все свойства абстрактных классов задаются в виде интерфейса виртуальных функций, которые перегружаются в производных классах. Такой подход позволяет существенно сократить количество необходимых отношений над объектами. Абстрактные классы делают язык представления знаний более простым и понятным и позволяют скрыть все детали реализации различных типов данных на инструментальном уровне.

Родовые классы — это метаклассы, объектами которых являются другие классы. Создание нового класса из родового происходит с помощью параметризации.

Инструментальный класс должен быть реализован на инструментальном языке программирования, где определяется формат представления значений и набор функций над объектами такого класса.

Каждый пользовательский класс имеет свою структуру и свойства. Структура класса может быть задана универсумом значений, массивом, множеством или списком слотов. Свойства класса задаются в виде совокупности ограничений на значения объекта и его компонент. Структура и свойства класса могут наследоваться им от базовых классов.

Отношения в языке *НеМо+* разделяются по синтаксическому признаку на функции и операции. Семантически они разделяются на инструментальные, пользовательские, и табличные.

Каждая функция имеет имя, список формальных параметров и класс возвращаемого значения. В языке имеются средства для описания функций с произвольным количеством аргументов одного класса. Фактическими параметрами такой функции могут служить объекты разных классов, производных от данного. Классы формальных параметров и возвращаемого значения функции могут быть абстрактными. Допуска-

ется совместное использование функций.

Операции в языке делятся на префиксные, инфиксные и операции произвольной аргументности. Каждая операция имеет имя, классы аргументов (один — для префиксной операции и операции произвольной аргументности, два — для инфиксной операции) и класс возвращаемого значения. Операция произвольной аргументности допускает инфиксную запись в выражении, также как и функциональную запись. Для инфиксных операций и операций произвольной аргументности можно указывать приоритет их разбора (неотрицательное целое число) в выражении: чем больше приоритет, тем раньше операция связывается со своими аргументами.

Инструментальные отношения реализуются на инструментальном языке программирования, где разработчик должен закодировать процедуру интерпретации (фильтрации) ограничений с данным отношением. Пользовательские отношения задаются набором ограничений, связывающих параметры отношения с его результатом. Табличные отношения служат для спецификации экстенциональных отношений, заданных простым перечислением кортежей значений.

Совокупность описаний классов и отношений образует модуль, который оформляется в языке в виде отдельного файла. Каждый модуль экспортирует все описанные в нем классы и отношения. Модуль может импортировать классы и отношения, описанные в других модулях.

Каждый объект имеет уникальное имя, класс значений и вид недоопределенности. Существуют четыре стандартных вида недоопределенности: точная, перечислимая, интервальная и мультиинтервальная. При описании группы объектов одного класса, можно сразу указать их общие свойства в виде дополнительного набора ограничений, наложенных на их значения. В отличие от свойств классов, при описании свойств объектов можно ссылаться на другие объекты.

Существуют три вида ограничений в описываемом языке представления знаний: выражения, условные ограничения, альтернативные ограничения. Выражения составляются по обычным правилам из имен объектов, констант и отношений. Условные ограничения представляют собой ограничения, срабатывающие при выполнении логического условия. Альтернативные ограничения генерируют различные альтернативы, которые проверяются с помощью процедуры бэктрекинга. Кроме того, в языке присутствует группа ограничений для организации альтернатив по недоопределенным значениям объектов. Во время счета модели при интерпретации такого ограничения происходит расщепле-

ние недоопределенных значений объектов-аргументов на две части (бисекция), откладывание одной из альтернатив и продолжение работы с другой.

Каждая модель имеет имя и содержит в себе список объектов и набор ограничений. Классы всех объектов, также как и все используемые отношения должны быть импортированы из соответствующих модулей. Модель оформляется в виде отдельного файла, после компиляции которого генерируется вычислительная сеть.

В **разделе 3.4** описан вычислитель системы *HeMo+*. Вычислитель *HeMo+* реализован с помощью библиотеки классов языка Си++ для поддержки потоковых вычислений на структурированных сетях, состоящих из объектов и ограничений. Инструментальные библиотеки наполняют вычислитель различными типами данных и отношениями. В вычислителе выделены следующие группы понятий (каждому из которых соответствует некоторый инструментальный класс):

- сетевые объекты (базовый сетевой объект, информационный объект, функциональный, групповой объект, модель);
- абстрактные недоопределенные объекты (сетевой недоопределенный объект, базовый недоопределенный объект, скалярный объект, числовой объект, целый объект, вещественный объект, логический объект, строковый объект, объект универсума, запись, массив, множество);
- абстрактные ограничения (ограничение, унарное отношение, бинарное отношение,  $n$ -арное отношение, операция, унарная операция, бинарная операция,  $n$ -арная операция);
- дескрипторы типов данных и отношений.

В **разделе 3.5** описаны библиотеки типов данных и отношений комплекса *HeMo+*.

В **четвертой главе** рассматривается применение системы *HeMo+* для решения различных задач. В **разделе 4.1** разбираются задачи с конечными областями значений. Рассмотрены спецификация и решение в среде *HeMo+* таких стандартных тестовых задач, как "Зебра", зашифрованная арифметика, расстановка ферзей, магический квадрат, лемма Шура, размещение голубей.

Решение трех типов численных задач (диофантовы уравнения, поиск вещественных корней алгебраического уравнения, нелинейная оптимизация с ограничениями) рассматривается в **разделе 4.2**.

В **разделе 4.3** разбирается решение задачи с использованием экс-

тенсиональных (табличных) отношений.

**Раздел 4.4** посвящен разбору типовой задачи ресурсного планирования.

Наконец, в **разделе 4.5** рассматривается решение задачи из области САПР.

В **заключении** подводятся итоги выполненной работы и перечисляются основные результаты.

В разделе **благодарности** автор выражает признательность всем людям, которые способствовали диссертационной работе.

Список **использованной литературы** содержит 99 наименований.

В **приложении А** приводится сравнительная таблица различных систем программирования в ограничениях.

**Приложение Б** состоит из текстов моделей на языке *HeMo+* для задач, которые разбираются в четвертой главе настоящей диссертации.

**Заключение.** Основные результаты диссертационной работы перечислены ниже.

1. *Теоретические результаты.*

- Для решения задач удовлетворения ограничений предложено формальное понятие недоопределенного расширения многосортовой модели.
- Определена денотационная семантика алгоритма удовлетворения ограничений в недоопределенных моделях, доказана независимость результата алгоритма от порядка вычислений.
- Рассмотрены различные модификации этого алгоритма для поиска точных и оптимальных решений задачи.
- Классифицированы различные виды недоопределенных расширений.

2. *Технология программирования.*

- Создан объектно-ориентированный язык спецификации задач удовлетворения ограничений в недоопределенных моделях (совместно с В. В. Телерманом, И. Е. Швецовым, В. А. Сидоровым).
- Разработана архитектура программного комплекса *HeMo+*, предназначенного для интерпретации программ на этом языке (совместно с В. В. Телерманом, И. Е. Швецовым, В. А. Сидоровым).

3. *Практическая реализация.*



- Реализован вычислитель для недоопределенных моделей и модуль оконного интерфейса с пользователем, которые совместно с реализованным В. А. Сидоровым транслятором программ составляет объектно-ориентированную среду для недоопределенных вычислений *HeMo+*, функционирующую в среде Microsoft Windows.
  - Произведено наполнение комплекса *HeMo+* библиотеками недоопределенных типов данных и ограничений (часть библиотек была реализована совместно с В. А. Сидоровым и Г. Б. Загорюлько).
4. *Экспериментальные исследования.*
- Проведена серия экспериментов, показывающая эффективность применения комплекса *HeMo+* при решении задач различных классов.

#### **Список опубликованных работ по теме диссертации.**

1. **Ушаков Д. М.** Развитие технологии недоопределенных моделей // *Материалы XXXIII Междунар. научной студенч. конф. "Студент и научно-технический прогресс": Математика.* — Новосибирск: НГУ, 1995. — С. 34–35.
2. **Ушаков Д. М.** Объектно-ориентированный язык спецификации недоопределенных знаний // *Третья междунар. студенч. школа-семинар "Новые информационные технологии": Тез. докл.* — Крым, май 1995. — С. 135.
3. **Телерман В. В., Ушаков Д. М.** Недоопределенные модели: формализация подхода и перспективы развития // *Проблемы представления и обработки не полностью определенных знаний* / Под ред. И. Е. Швецова. — Москва-Новосибирск: РосНИИ ИИ, 1996. — С. 7–30.
4. **Telerman V., Ushakov D.** Using the Subdefiniteness in Real World Models // *Human-Computer Interaction: Proc. of the 6th Internat. Conf. EWHCI'96* / Ed. by S. Overmyer, Ju. Gornostaev. — Moscow: International Centre for Scientific and Technical Information, 1996. — P. 194–206.
5. **Telerman V., Ushakov D.** Data Types in Subdefinite Models // *Artificial Intelligence and Symbolic Mathematical Computation: Proc.* / Ed. by J. Calmet, J. A. Campbell and J. Pfalzgraf. — Berlin a.o.: Springer-Verlag, 1996. — P. 305–319. — (Lect. Notes Comput. Sci.; **1138**).

6. **Telerman V., Ushakov D.** Subdefinite Models as a Variety of Constraint Programming // *Proc. of the 8th Internat. Conf. on Tools with Artificial Intelligence, ICTAI'96.* — IEEE Computer Society, 1996. — P. 157-163.
7. **Telerman V., Sidorov V., Ushakov D.** Problem Solving in the Object-Oriented Technological Environment *NeMo+* // *Perspectives of System Informatics: Proc.* / Ed. by D. Bjørner, M. Broy, I. V. Pottosin. — Berlin a.o.: Springer-Verlag, 1996. — P. 91–100. — (Lect. Notes Comput. Sci.; **1181**).
8. **Телерман В. В., Сидоров В. А., Ушаков Д. М.** Интервальные и мультиинтервальные расширения в недоопределенных моделях // *Вычислительные технологии.* — 1997. — Т. 1, N 2. — С. 62–70.
9. **Telerman V., Ushakov D.** Levels of Parallelism in CSP with Subdefinite Objects // *Proc. of the Poster Session of JFPLC'97, Sixth French Conf. on Logic and Constraint Programming.* — Orleans, France, 26-28 May 1997. — (Rapport de Recherche LIFO 97-6).
10. **Shvetsov I., Telerman V., Ushakov D.** *NeMo+*: Object-Oriented Constraint Programming Environment Based on Subdefinite Models // *Principles and Practice of Constraint Programming - CP97: Proc.* / Ed. by G. Smolka. — Berlin a.o.: Springer-Verlag, 1997. — P. 534–548. — (Lect. Notes Comput. Sci.; **1330**).
11. **Телерман В. В., Ушаков Д. М.** Удовлетворение ограничений в задачах математического программирования // *Вычислительные технологии.* — 1998. — Т. 3, N 2. — С. 45–54.
12. **Ushakov D.** *Some Formal Aspects of Subdefinite Models.* — Novosibirsk, 1998. — 23 p. — (Prepr. / Siberian Division of Russian Acad. Sci. IIS; N 49).

Д. М. Ушаков

**ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ СРЕДА  
ДЛЯ НЕДООПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ**

**Автореферат**

---

Подписано в печать 25.06.1998 г.

Формат бумаги 60 × 90 1/16

Объем 1.1 уч.-изд. л., 1.2 п. л.

Тираж 100 экз.

---

Отпечатано на ризографе "AL Group", 630090, Новосибирск-90, пр. Акад. Лаврентьева, 6.