М. Е. СУЧАНСКИЙ

РАССУЖДЕНИЯ О ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ НА КАЧЕСТВЕННОМ УРОВНЕ.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР С ДОПОЛНЕНИЯМИ.

1. ВВЕДЕНИЕ.

В рамках парадигмы, доминирующей в искусственном интеллекте в настоящее время, знания считаются неотъемлемой компонентой любой интеллектуальной системы. Исследование рассуждений на уровне здравого смысла и практических знаний, необходимых для такого рода рассуждений, было и остается центральной проблемой искусственного интеллекта. В предлагаемом обзоре рассматривается только часть работ, посвященных этой теме, - а именно работы, в которых рассматриваются рассуждения о физическом мире.

В настоящее время уже существует несколько обзоров по проблеме формализации наивных физических рассуждений, написанных на английском языке. Наиболее полные и подробные - это обзоры [Fr2,Iw1,Da1], более специализированные, но заслуживающие не меньшего внимания - [dKB2,dK2,Sha1,SS1,Ya]. В связи с этим отметим, что для интересующего нас направления исследований общеупотребительными являются несколько названий. Каждое из этих названий предполагает специфическую направленность работ, и только редкие статьи могут быть в равной степени соотнесены с несколькими названиями единого по сути направления.

Первое из этих названий - "наивная физика", связано прежде всего с работами П.Хэйеса [Hs1,Hs2], а также [Al,AlH,Da2,FNF,Fl, Fr1,Hb,Hg,Hs3,Ga1,Ga2,Le,LeG,Ka,Mc1,MH,Sho1,Sho2,Ta1,Ta2,Ta3,WP]. В этих работах строится (либо подразумевается возможность такого построения) аксиоматизация на некотором подмножестве языка исчисления предикатов первого порядка тех или иных сторон физической реальности: времени, пространства, свойств материалов, действий агентов в простых ситуациях, физических сил и т.д. При этом основой для логических описаний служат не классические научные теории типа механики Ньютона, как это делалось ранее в статьях [Mo,MSS], а "донаучные", общепринятые среди людей, взгляды на физическую реальность.

Термин "качественная физика" может быть применен для обозначения тематики статей [Al,dK2,dKB1,dKB2,dKB3,dKBo,Fa,FNF,Fr2,IwS, Ko,Ku1,Ku2,Ku3,Sa1,Sa2], в которых, в отличии от статей первой группы, в центре внимания находятся причинно-следственные связи и динамические явления. Полученные результаты в этих статьях представляются не в виде аксиоматических построений, а в виде описаний алгоритмов и работающих программ. Качественная физика, также как и обычная, стремится описать поведение физических систем. Однако в отличии от обычной физики, она пытается предсказывать и описывать поведение, основываясь не на точных численных значениях физических величин, а на рассуждениях, использующих качественные градации значений. Важнейшая особенность качественной физики в том, что для построения физической модели используются не точные уравнения зависимости, а качественные связи типа монотонной зависимости между величинами. С помощью таких связей могут быть представлены идеи о физической реальности, которые люди действительно используют в каждодневной жизни. Авторы этих статей обычно демонстрируют как с помощью рассуждений о неравенствах между значениями физических величин и о монотонных зависимостях между некоторыми из физических величин можно получить приемлемое качественное описание некоторых простых систем. Основной метод, используемый при построении алгоритмов качественной физики - это поиск в пространстве состояний таких значений, которые удовлетворяют наложенным на них ограничениям. Значительная группа публикаций посвящена проблеме эффективной организации этого поиска [De1,De2,dK1,dK3,dK4,dKW,Dr,Fr4,McA1,McA2,McD2,RK].

2. ОНТОЛОГИЯ КАЧЕСТВЕННОЙ ФИЗИКИ.

Специфика обыденных физических знаний в том, что их формализация и представление невозможны без такой априорной онтологической схемы, которая была бы достаточно эвристичной и интроспективно оправданной. Для обоснования этого утверждения прежде всего напрашивается аналогия с классической физикой: история этой науки, по сути дела, - совершенствование онтологических представлений. Удачно выбранные однажды онтологические допущения обеспечивали долговременный прогресс в физике. Например, представление о газе как о совокупности беспорядочно движущихся молекул позволяет получить громадное количество следствий о свойствах газа. Важность выбора удачной онтологической схемы можно проиллюстрировать и в других областях человеческой деятельности. В работе [Se] показано различие между концептуальными базисами, на которых строились представления о политическом и историческом развитии у нескольких выдающихся мыслителей и политических деятелей.

2.1. Общие черты подходов к качественному моделированию.

Как уже отмечалось во введении, основная заслуга работ, относящихся к качественной физике, это попытка описать на логическом языке динамические явления: процессы, действия и т.д., - поскольку в рамках "наивной физики" обычно не рассматриваются какие-либо изменения в физическом мире. Для представления знаний о динамических явлениях было предложено несколько онтологических схем [dKB2, Fr2, Ku2, MH].

Прежде, чем переходить к обсуждению особенностей каждого из подходов, по-видимому целесообразно остановиться на общих чертах этого направления. Такими универсальными особенностями являются: переход от непрерывных величин к качественным значениям, представление физических законов в виде ограничений совместимости на эти значения и сведение анализа поведения физической системы к задаче выполнимости ограничений (constraint-satisfaction problem). В работе [Sa2], используемая в качественном моделировании терминология, вводится с точки зрения теории динамических систем. Известно, что фазовое пространство для системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка

dx/dt = f1(x,..., y, z)
.... (1)
dz/dt = fn(x,..., y, z)
есть прямое произведение областей значений x,..., y, z. Точки в фазовом пространстве представляют собой отдельные состояния системы. Кривые в этом пространстве, удовлетворяющие системе (1), называются траекториями и представляют собой решения этой системы уравнений. Фазовой диаграммой называется графическое изображение фазового пространства и типичных траекторий. Подробности относительно математического качественного исследования динамических систем можно почерпнуть в [BL].

Качественное моделирование имеет дело с конечным разбиением множеств значений каждой из зависимых переменных x,..., y, z на интервалы и точки. Элементы разбиения называются качественными значениями. Совокупность качественных значений образует физическое пространство: упорядоченное (в общем случае частично-упорядоченное) множество чередующихся интервалов и точек. Наиболее популярное пространство, называемое IQ, состоит из интервала (-oo,0), точки 0, и интервала (0,Ѣoo), или сокращенно "-", "0", "Ѣ". На этом пространстве естественным образом можно задать частично-определенное сложение и умножение, либо с помощью дополнительных символов задавать всюду определенные операции [Wil]. Заметим, что при выборе других систем интервалов в качестве базиса, получающаяся интервальная арифметика сталкивается с непреодолимыми трудностями. Основная проблема состоит в том, что появляются фальшивые решения качественных уравнений [Str]. Качественное описание системы задается с помощью физических величин - функций, отображающих независимый параметр (обычно время t) в соответствующие физические пространства. Физические величины сопоставляются фазовым переменным.

Качественным состоянием системы называется вектор качественных значений, описывающих систему физических величин. Поведение системы характеризуется последовательностью качественных состояний, через которые она проходит с течением времени. Графом переходов называется граф, вершины которого - качественные состояния, а ребра - переходы между ними. Поскольку переходы между качественными состояниями соответствуют переходам между регионами фазового пространства, этот граф задает последовательность прохождения траекторий по регионам. Качественным поведением системы называются пути в графе переходов.

Для системы из двух дифференциальных уравнений, описывающих одномерные колебания с учетом трения, совершаемые кубиком, прикрепленным к пружине, имеется 9 возможных качественных состояний: 4 прямоугольных <Ѣ/-,Ѣ/->, 4 линейных <Ѣ/-,0) и <0,Ѣ/->, и одна неподвижная (устойчивая) точка <0,0>. Фазовая интерпретация соответствующего графа переходов такова: решение остается навсегда в <0,0>, постоянно циклится по часовой стрелке, проходя через восемь внешних регионов, или пройдя несколько циклов, входит в <0,0> из регионов <-,Ѣ> или <Ѣ,-> [см. Sa2]. В действительной фазовой диаграмме все траектории оказываются внутри произвольной окружности с центром в (0,0), но этот факт невозможно отобразить как последовательность переходов между прямоугольными регионами. Проблема корректного порождения траекторий системы из качествен-

ного предсказания ее поведения обсуждается во многих работах [Fr3, Ku2].
Выбор пространств для рассматриваемых физических величин - фундаментальный шаг для последующего построения предсказания. Выбранные пространства представляют собой словарь, элементы которого должны охватывать все интересующее нас многообразие явлений. Без правильного "квантования" непрерывной картины мира качественные рассуждения невозможны.
В общем случае построение независимых пространств физических величин невозможно, т.к. интерес может представлять не какое-то конкретное пороговое значение физической величины, а некоторая пороговая гиперповерхность в прямом произведении множеств значений нескольких физических величин. В качестве примера можно привести температуру кипения и скорость возникновения турбулентного течения. В пространстве физической величины температура, вообще говоря, нельзя указать однозначно положение температуры кипения, т.к. она зависит от плотности жидкости и ускорения свободного падения в том месте, где идет процесс кипения. Для описания явления возникновения турбулентного течения используют безразмерное число Рейнольдса, которое определяется не только скоростью потока, но и плотностью жидкости, ее вязкостью и диаметром русла. В общем случае, для определения таких пороговых гиперповерхностей разработаны специальные методы, использующие понятие размерности физической величины [BhN, Ko]. В пространстве физической величины кроме частичного порядка на значениях имеет смысл указывать степень различия между соседними значениями. Так, например, различие между скоростью звука в воздухе и скоростью мяча существенно превосходит различие между скоростью летящего мяча и скоростью ходьбы человека. Такого рода информация может быть необходима для рассуждений об очередности осуществления событий [Rai,Ku3].
Одна из целей методологии, предлагаемой в работе [Rai], - восполнить отсутствие количественной информации. Основной стимул этой работы в том, чтобы воспроизвести способность физиков оценивать различные влияния в соответствии с их относительными порядками величин, и затем использовать эту информацию для разделения радикально отличающихся видов поведения физической системы.
В статье описана формальная система FOG, позволяющая представлять и структурировать такого рода интуитивные знания так, чтобы можно было применять их для качественных рассуждений.
В рамках FOG вводятся 3 новых отношения:
"A Ne B" - A пренебрежимо (фран. "negligeable") по сравнению с B;
"A Vo B" - A близко к B (фран. "voisin"), т.е. (A-B) пренебрежимо мало по отношению к B;
"A Co B" - A того же порядок величины, что и B (фран. "comparable"). Подразумевается, что для таких A и B если B Ne C,то A Ne C.
FOG построена следующим образом: в нее входит единственная аксиома "A Vo A" и 30 правил вывода, позволяющие получать новые соотношения между элементами, исходя из заданных. Полнота и неизбыточность FOG не исследованы.
Поскольку и Co, и Vo являются отношениями эквивалентности, важно понимать их различие. Так, согласно правилу вывода R24 если (A+B) Vo A истинно, то B Ne A; если же истинно (A+B) Co A, то аналогичное следствие не может быть выведено. Другими словами,

Co накладывает меньше ограничений, чем Vo.

Для доказательства непротиворечивости FOG используется модель, предложенная Абрахамом Робинсоном и получившая название нестандартный анализ [Dav, Rob]. Интерпретация задается следующим образом. Пусть K - полностью упорядоченное неархимедово поле, содержащее поле действительных чисел R в качестве подполя. Напомним, что поле называется архимедовым, если для любого строго положительного элемента x поля и для любого элемента y поля существует целое число n такое, что nx > y. Из алгебры известно, что любое архимедово кольцо без делителей нуля изоморфно некоторому подкольцу поля действительных чисел с его естественной упорядоченностью. Поскольку K собственное расширение R, оно должно быть неархимедовым полем. Поэтому, если F - множество всех a из K таких, что ËaË< r для некоторого r из R, a I - множество всех a из K таких, что ËaË< r для любого положительного r из R, то множества K-F и I-{0} непусты. Элементы F называются конечными (finite), а элементы I - бесконечно малыми (infinitesimals). Легко проверить, что F - кольцо, I - максимальный простой идеал, следовательно, фактор-кольцо F/I - поле и, более того, изоморфно полю R.

Отношения Vo, Ne, Co определяются так:

A Vo B тогда и только тогда, когда A=B(1+o), где o принадлежит I;

A Ne B тогда и только тогда, когда A=Bo, где o принадлежит I;

A Co B тогда и только тогда, когда A=BO, где O принадлежит F/I.

В упомянутой статье демонстрируется как можно проверить непротиворечивость правил вывода FOG.

Построенную формальную систему можно использовать для пополнения информации, содержащейся в пространстве физических величин. Как говорилось выше, в это пространство обычно включают только частично упорядоченные пороги L, разделяющие его согласно знаку (X-L), где X - другие значения пространства. FOG позволяет дополнительно структурировать пространство, определяя некоторые регионы вводимых порогов. Эта структура задается:

- отношениями эквивалентности Co и Vo, определяющими внутри пространства физических величин регионы, элементы которых имеют один и тот же порядок величины;
- отношением Ne, определяющим иерархию между этими регионами, другими словами, шкалу сравнения для этого физического пространства;
- правилом A Ne B => (A+B) Vo B, согласно которому для величин, различающихся по порядку, регионы устойчивы по отношению к сложению; и правилом (A Ne B) & (C Co D) => (AC) Ne (BD), согласно которому при умножении на сопоставимые элементы иерархия между регионами сохраняется.

Переходя к анализу различных методов качественного моделирования, отметим, что их часто, и иногда справедливо, критикуют за чрезмерное упрощение при анализе динамических явлений. Необходимо помнить, однако, что конечная цель состоит в том, чтобы построить достаточно выразительный словарь понятий на некотором строго формальном языке. Поскольку факты типа: "Стул находится рядом со столом", "Цвет кубика черный", - кажется естественным формулировать на языке, подобном языку логики предикатов первого порядка, задача состоит в том, чтобы изобрести такие примитивы в рамках этого подразумеваемого языка, с помощью которых можно было бы формулировать утверждения и проводить рассуждения о динамических явлениях.

2.2. Качественное моделирование Б.Куйперса [Ku1, Ku2].

Подход, предложенный Б.Куйперсом, называют также основанным на ограничениях. Это связано с тем, что физическая ситуация описывается непосредственно в терминах множества переменных (для некоторых задаются начальные значения) и ограничений совместимости, наложенных на эти переменные. Пусть переменные X1,...,Xn принимают значения, соответственно, из множеств D1,...,Dn. Ограничение совместимости C(Xi1,...,Xij) - это подмножество прямого произведения Di1 x...x Dij, которое задает те значения переменных, которые совместимы друг с другом. Решением является такое присваивание значений всем переменным , при котором все ограничения оказываются выполненными, и задача обычно состоит в поиске одного или всех решений. Обычно ограничения представляются множеством всех кортежей, не запрещенных этим отношением. Если закодировать все ограничения как пропозициональные дизъюнкты (каждое из высказываний вида x=a, где a принадлежит D, кодируется как пропозициональная переменная), то для решения задачи выполнимости ограничений можно использовать систему поддержания истинности, основанную на допущениях [dK3, dK4]. Имеются также прямые, иногда эвристичные, алгоритмы решения этой задачи [De1, De2]. В качестве отступления отметим, что к задаче выполнимости ограничений сводятся такие традиционные задачи, как, например, анализ зрительных сцен и рассуждения о временных соотношениях.
Б.Куйперс использует пять типов ограничений: арифметические, функциональные, дифференциальные, условные и неравенства. Арифметическое ограничение (например, X+Y=Z) утверждает, что значения переменных должны иметь указанное соотношение в любой момент времени. Функциональное ограничение Y=M+(X) означает, что Y есть строго возрастающая (или убывающая, если M-(X)) функция X. Дифференциальное ограничение Y=dX/dt утверждает, что в любой момент времени Y есть темп изменения X. Неравенства и условные ограничения задают обстоятельства, при которых выполняются другие ограничения. Указанная совокупность ограничений позволяет образовывать качественные дифференциальные уравнения.
Так называемое "описание причинно-следственной структуры" [Ku1] получается выписыванием ограничений и переменных модели. Качественное моделирование осуществляется путем распространения значений производных "Ѣ", "-", "0" и ранее полученных соотношений (неравенств и равенств) между переменными вдоль сети ограничений на те переменные, значения которых еще не определены. Используя некоторые дополнительные правила анализа, строится предсказание поведения системы во времени. Эти правила анализа служат, в основном, для определения того, какой из порогов в пространстве физической величины достигнут, и по какой из "ветвей" частичного порядка идет дальнейшее развитие ситуации.
Основной недостаток подхода, предложенного Б.Куйперсом, в том, что отсутствуют какие бы то ни было указания как строить качественную модель имеющейся физической ситуации [dK2, DKB1]. Для его модели физической ситуации достаточно списка ограничений, не

имеющих никаких связей с описанием реальной физической структуры. Более того, он не формулирует критериев: какие совокупности ограничений допустимы или физически осмысленны. В [dKB2] был сформулирован важный принцип "отсутствие-функции-в-структуре": при построении модели сложного физического устройства законы поведения отдельных частей не должны выводиться из функционирования целого. В противном случае получаемые выводы о функционировании прибора в целом могут неявно быть закодированы в самом структурном описании. Подход Б.Куйперса игнорирует все принципы физической содержательности, поэтому он может быть скорее охарактеризован как качественная математика, чем как качественная физика. Качественная математика, используемая в этом подходе, тоже имеет существенные недостатки [Sa2]. Ради справедливости стоит отметить, что перечисляемые ниже недостатки свойственны и другим подходам к построению качественной физики.

Алгоритм качественного моделирования вычисляет потомков данного качественного состояния, исходя из знаков производных в этом состоянии, и прогнозирует развитие физической ситуации, описывая переходы между регионами в фазовом пространстве. Пусть регионы R и S - смежные вдоль границы x=k, причем для x принадлежащих R x меньше или равно k, а для x из S x больше или равно k. В соответствии с системой дифференциальных уравнений (1), если неверно, что dx/dt<0 для всех x из R, алгоритм обнаружит переход из региона R в S, и переход из S в R, если неверно, что dx/dt>0 для всех x принадлежащих S. В разобранном выше примере существует переход из <-,Ь̌> в <0,Ь̌>, но не наоборот. Однако алгоритм анализа переходов применим только в случае границ вида x=k и не допускает анализ переходов между регионами, имеющими криволинейные или изогнутые границы. Такие сложные границы возникают, если исходные физические пространства строятся на основе предельных гиперповерхностей, а не простых пороговых точек. Соответствующий метод предложен в [Sa2].

Существенный недостаток алгоритма качественного моделирования в том, что он порождает ложные переходы в случае, когда производная принимает как положительные, так и отрицательные значения внутри одного региона. Метод [Sa2], исходящий из представления о фазовом пространстве, свободен от этого недостатка. Более того, этот метод позволяет в некоторых случаях судить об устойчивости неподвижных точек и о глобальной устойчивости динамической системы. Как известно, такие выводы можно получить, вычислив матрицу з ⋆
Ëa[11] ... a[1n] Ë a[11]= Df1(x...z)/Dx,...,
A(x,...,y,z)= Ë .... Ë где a[1n]= Df1(x...z)/Dz,
Ëa[n1] ... a[nn] Ë a[n1]= Dfn(x...z)/Dx,...,
ю ы a[nn]= Dfn(x...z)/Dz.

Если в неподвижной точке p все действительные части собственных значений этой матрицы A отрицательны (положительны), то такая точка p устойчивая (отталкивающая). Поскольку в рамках качественного моделирования известны обычно только знаки элементов матрицы a[ij], упомянутое условие называется знаковой устойчивостью. В работе [Jef] сформулированы необходимые и достаточные условия для знаковой устойчивости матрицы, а в статье [Kle] имеется линейный по n алгоритм проверки этого условия.

2.3. Качественная физика Й.де Клира и Дж.Брауна [dKB2]

Онтологическая схема, предложенная в работах [dKB1, dKB2], основана на представлении мира как совокупности взаимодействующих механизмов. Авторы выделяют следующие онтологические примитивы: "материалы" (вода, электрический ток, тепло), "каналы" (трубопроводы, кабели, провода) - элементы, осуществляющие транспортировку "материалов", и "компоненты" (камера сгорания двигателя, клапан редуктора, транзистор) - элементы, осуществляющие такое преобразование "материалов", которое приводит к изменению параметров, характеризующих "материалы". Под параметрами понимаются температура, сила тока, давление и т.д. Функционирование компонент описывается с помощью связностей (confluences) - качественного аналога дифференциальных уравнений. Связность представляет собой ограничение совместимости на переменные и производные параметров. Например [dK2, dKB1,Iw1], качественное поведение редуктора (регулятор с обратной связью давления потока в трубе) описывается уравнением dP + PdA - dQ =0. В этом уравнении качественные переменные: Q - величина потока в трубе, P - давление в редукторе, A - площадь отверстия, через которое идет поток жидкости, dP, dA, dQ - соответствующие качественные производные, - принимают значения из IQ ("-","0","+"). Функционирование редуктора состоит в том, что увеличение площади отверстия A, доступного для потока, всегда уменьшает абсолютное значение падения давления на редукторе P, т.е. редуктор должен поддерживать величину P на постоянном уровне. Падение давления в редукторе P (разница между выходным и входным давлением) варьируется в зависимости от нагрузки на выходе редуктора, например, потребления горючего в камере сгорания, и давления на входе. В рамках связности представлены все возможные взаимовлияния параметров: изменение площади сечения положительно влияет на скорость потока и отрицательно на давление, изменение давления положительно влияет на скорость потока и т.д.

Заметим, что связности, подобные приведенной выше, основаны на допущении, что каналы всегда заполнены материалом и несжимаемы, поэтому любое количество материала, появляющееся на одном из концов канала, проходит без изменения к другому. Иначе говоря, предполагается выполнение условия непрерывности, получившего в электротехнике название закона Кирхгоффа.

Переменная может участвовать в нескольких связностях, и, таким образом, может быть подвержена разнообразным влияниям. Каждое из уравнений должно выполняться по-отдельности, т.е. если площадь отверстия увеличивается, но поток остается неизменным, давление должно уменьшаться даже при наличии других влияний на него.

Обычно одной связностью невозможно охарактеризовать поведение компоненты в рамках всех областей значений параметров. Поэтому предполагается, что область значений параметров, описывающих поведение компоненты, можно разбить на несколько интервалов, соответствующим качественно различным значениям. Другими словами, в рамках этого подхода также используется понятие пространства физических величин. Так функционирование редуктора принципиально различно в случаях, когда регулирующий вентиль полностью открыт (редуктор работает в режиме простого трубопровода) и когда вен-

тиль полностью закрыт (редуктор изолирует вход от выхода):
Открыт: [A = Amax], P=0, dP=0
Работает: [0 < A < Amax], P=Q , dP + PdA - dQ =0
Закрыт: [A = 0], Q=0, dQ=0,
в рабочем режиме редуктор функционирует подобно жидкостному переменному сопротивлению - его сопротивлением управляет A. Если оно постоянно (dA=0), то dP=dQ. Ограничение совместимости P=Q означает, что знаки качественных переменных P и Q одинаковы. Итак, полная модель компоненты в общем виде выглядит так:
состояние: [спецификации] связности.
Для каждой из компонент, которые могут встретиться при анализе тех или иных устройств, заранее создается ее полная модель. Все модели объединяются в библиотеки и автоматически извлекаются оттуда алгоритмом, если соответствующая компонента оказывается упомянутой в компоновочной схеме прибора. В рамках такой архитектуры построения алгоритма удается соблюдать принцип "отсутствие-функции-в-структуре", упоминавшийся выше. Входом для алгоритма, названного ENVISION, служат: (а) множество компонент и допустимые пути взаимодействия между ними, т.е. топология устройства; (б) входные сигналы, если таковые имеются, (в) множество граничных условий на поведение устройства. ENVISION может порождать прогнозирование поведения, т.е. описание поведения прибора в терминах допустимых состояний, значений переменных и производных. Кроме того, алгоритм может порождать каузальные объяснения и логические доказательства для этого поведения.
В [dKB2] показывается, что рассматривая функционирование каждой из компонент, можно выделить несколько качественно различных состояний в работе этой компоненты так, что в рамках каждого состояния поведение компоненты описывается линейной связностью. В нашем примере, это подразумевает дополнительное разбиение на состояния: если P>0, то dP + dA - dQ=0, для P<0: dP - dA - dQ=0. Множество значений параметров, удовлетворяющих системе связностей, может быть найдено с помощью алгоритмов, предложенных для решения задачи выполнимости ограничений [De1, dK1, dK3, dK4, dKW, Dr]. Показано, что в некоторых случаях решение для системы связностей может быть найдено с помощью некоторого варианта метода исключения переменных Гаусса [DoRa].
В работе [dKBo] исследуются связности, в которых присутствуют производные высших порядков.
Достоинство рассматриваемого подхода в том, что удается решать не только задачу прогнозирования поведения физической системы, но и строить объяснение почему система так функционирует. Отметим, что благодаря онтологической привязке удается уйти от чисто эпистемологического "объяснения" работы прибора, предъявляющего всего лишь логическое доказательство правильности функционирования технического устройства [dKB2]. О неадекватности доказательства как теории объяснения свидетельствуют следующие нежелательные черты: (а) использование допущений в доказательстве немотивировано и произвольно; (б) косвенные доказательства с применением принципа "сведение к противоречию" (reductio ad absurdum) интуитивно неудовлетворительны; (в) доказательство не единственно; (г) доказательства могут быть каузально обратимыми.
Онтологическая соотнесенность причин и следствий с взаимо-

действием компонент в устройстве, позволяет объяснить его функционирование, исходя из структуры данного прибора, что намного более естественно для человека. В рамках рассматриваемого подхода, считается, что поведение устройства возникает из упорядоченных во времени взаимодействий его компонент. Другими словами, потоки обмена информацией отражают реальные причинно-следственные взаимодействия между компонентами. Поскольку моделирование осуществляется в рамках квазистатического приближения: устройство предполагается близким к равновесию, для каузального объяснения изменений, возникающих между равновесными состояниями системы, вводятся понятия мифической каузальности и мифического времени. Без этих понятий невозможно объяснить почему происходит смена состояний, т.к. при смене должны наблюдаться промежуточные неравновесные состояния. Введенные понятия позволяют отказаться от использования принципа "сведение к противоречию" [dKB2, dKB3]. Альтернативные методы к построению причинно-следственных объяснений, исходящие из подходов, разработанных в экономике, предлагаются в статьях [Iw1, Iw2, IwS].
Описанная онтологическая схема кажется весьма оправданной, поскольку выражает типичную для инженерного дела системную интуицию. Широко распространенные во многих прикладных областях стандарты для структурных описаний непосредственно могут использоваться как отправная точка для построения качественных моделей. В то же время, переход от количественных моделей к качественным - задача нетривиальная, поскольку может потребоваться введение новых состояний. Второе преимущество компонентной онтологии в том, что фиксированность сети ограничений на совместимость обеспечивает основу для эффективных вычислений [Fr3].
Компонентная онтология имеет серьезные недостатки [Fr3, Fr4]. Во-первых, процесс выделения примитивов на конструктивной схеме технического устройства неоднозначен и неформализуем. В некоторых прикладных областях, например в электротехнике, эта проблема не возникает, но в других она достаточно серьезна. Например, простой металлический кубик может моделироваться как точечная масса, пружина, проводник в зависимости от его окружения. Во-вторых, в рамках этой онтологии трудно описать многие естественные явления, такие как исчезновение и возникновение объектов (в процессе кипения вода исчезает, а пар появляется), изменение связей между частями системы (шарик, прыгающий внутри сосуда). В-третьих, многие физические явления не укладываются в эту онтологическую схему, например, неограниченное движение и фазовые переходы. В некоторых инженерных приложениях эти ограничения могут быть преодолены, но непонятно как это сделать в общем случае.

2.4. Теория качественных процессов К.Форбаса [Fr2, Fr4].

Наиболее интуитивно оправданная из созданных до сих пор онтологических схем для описания динамических явлений на качественном уровне предложена в работах К.Форбаса. Эта схема развивает введенное ранее П.Хэйесом понятие "истории" [Hs1, Hs2].
Понятие истории было предложено П.Хэйесом с целью решить упоминавшуюся выше проблему разграничения [MH,Hs3] в рамках логики первого порядка. Его идея состояла в том, чтобы отказавшись от

пространственно неограниченных ситуаций, рассматривать пространственно локальные истории, и тогда объекты могут взаимодействовать только когда их истории пересекаются. В [Fr2] формулируются две новые проблемы, возникающие вместо классической проблемы разграничения:
1) Проблема локальной эволюции: как порождаются истории ? При каких условиях возможно их независимое порождение для частей целостной ситуации и, затем, объединение для описания всей ситуации
2) Проблема пересечения/взаимодействия: какие из пересечений историй действительно соответствуют взаимодействию объектов ?
К.Форбас использует онтологию времени, разработанную в [Al], выделяя в качестве примитивов эпизоды и события. Эпизодом считается интервал времени, имеющий ненулевую длительность, а событие длится только мгновение. Каждый эпизод имеет начало и конец, которые являются событиями, служащими границами эпизода. Согласно [Al] эпизоды и события находятся в отношении примыкать, т.е. начало некоторого куска траектории находится непосредственно после конца предыдущего, другими словами они не разделены во времени. Это позволяет нам сказать, например, что эпизод нагревания воды на плите заканчивается событием достижения водой температуры кипения, хотя в течении эпизода температура была ниже точки кипения.
Онтологические примитивы в схеме К.Форбаса - "истории", "индивидуальные аспекты" и "процессы".
Индивидуальным аспектом может быть любой статический элемент окружающего мира, исчезновение, возникновение и существование которого значимо с точки зрения той задачи, которую предстоит решать. Прежде чем переходить к рассмотрению структуры индивидуального аспекта, заметим что в работах [Fr1, Fr2, Fr4] не даются строго логические определения, хотя автор подчеркивает их возможность, вместо этого делается упор на программную реализацию предлагаемой концепции. В некоторых случаях восстановление формальных определений не представляет затруднений. Все индивиды, используемые в модели, имеют тот или иной сорт. С логической точки зрения, индивидуальные аспекты и процессы - предикаты в многосортном языке первого порядка.
В рамках описания индивидуального аспекта ситуации фиксируются:
1) объекты, входящие в него, например для индивидуального аспекта Жидкость-В-Контейнере такими индивидами будут жидкость и сосуд;
2) предусловия его существования, т.е. условия нединамической природы, которые должны выводиться из каких-то внешних теорий. В нашем примере необходимо условие, что контейнер может содержать данную жидкость (медный сосуд не может содержать серную кислоту);
3) количественные условия его существования: для того, чтобы индивидуальный аспект Жидкость-В-Контейнере имел место, количество жидкости должно быть больше нуля;
4) зависимости между физическими величинами, характеризующими объекты, входящие в индивидуальный аспект. Возможны несколько типов отношений. Наиболее распространенные - это указания на монотонную зависимость одних физических величин от других, например, объем жидкости монотонно возрастает при увеличении ее количества. Зависимости между величинами можно присвоить свое имя.

В качестве другого примера рассмотрим индивидуальный аспект Трение-Движения. В него входят следующие индивиды: объект, поверхность, направление. Имеются два предусловия: наличие контакта скольжения между объектом и поверхностью, и ориентация вектора скорости вдоль направления. Количественное условие существования индивидуального аспекта: наличие процесса движения вдоль данного направления. Выполняются два отношения: всегда, когда существует этот индивидуальный аспект, имеется физическая величина - сила трения, которая монотонно возрастает при увеличении нормальной силы; в случае одномерного движения, знак силы трения противоположен знаку скорости объекта.

Как и в остальных подходах, в теории качественных процессов используется понятие физического пространства. Качественные значения w и z некоторого пространства, между которыми нет промежуточного элемента, называются соседними. Если у какого-то элемента имеется более одного соседа, он называется точкой разветвления.

Для описания динамики происходящих в мире изменений применяется другой примитив - процесс.

В рамках описания процесса фиксируются:

1) индивиды, участвующие в процессе. В качестве иллюстрации будем рассматривать процесс движения, в описании которого используются движущийся объект и направление движения;

2) предусловия его протекания. В нашем примере 3 предусловия: мобильность объекта, отсутствие неподвижного препятствия вдоль данного направления, ориентация вектора скорости вдоль направления;

3) количественные условия протекания процесса бывают двух типов: (а) неравенства между релевантными физическими величинами в начальный момент времени, и (б) статусы активности других процессов и аспектов. Для того, чтобы процесс движения был активен, необходимо, чтобы величина скорости объекта была больше нуля;

4) отношения между физическими величинами (тех же типов, что и в индивидуальном аспекте).

5) прямые влияния, т.е. утверждения о направлении изменения физической величины под воздействием протекающего процесса. Задаются в виде зависимостей между физической величиной, на которую влияет процесс, и физической величиной характеризующей протекающий процесс и не существующей вне его. В нашем примере такой физической величиной является скорость. Процесс движения влияет на положение объекта вдоль оси, определяемой направлением движения, и, в силу положительной ориентации вектора скорости, влияет положительно.

Прямые влияния определяют дифференциальные зависимости, указывая на вклад каждого процесса в производную той физической величины, на которую он влияет. Поэтому для вычисления производной некоторой физической величины, надо просуммировать (используя качественную арифметику) влияния на нее по всем процессам.

В качественной теории процессов вводится также понятие косвенного влияния. Физическая величина находится под косвенным влиянием, если она является функцией от другой физической величины, на которую влияет процесс. Функциональные зависимости между величинами представляются в виде дерева, в котором корень - зависимая физическая величина, а листья - "независимые" величины. Например, процесс растворения соли в воде прямо влияет на количество соли в растворе и косвенно влияет на концентрацию раство-

ра. Физическая величина не может быть под прямым и косвенным влиянием одновременно. Данное условие вызвано стремлением адекватно выразить причинные связи.
В качестве второго примера рассмотрим процесс ускорения. Индивиды, входящие в этот процесс, и его предусловия совпадают с соответствующими элементами процесса движения. Количественное условие возникновения процесса ускорения: величина равнодействующей сил больше нуля. Выполняются два отношения: всегда, когда протекает этот процесс, имеется физическая величина - "ускорение объекта", которая монотонно возрастает при увеличении равнодействующей сил и монотонно убывает при увеличении массы объекта (второй закон Ньютона). Ускорение объекта оказывает прямое влияние на скорость.
В [Fr2] формулируется важное утверждение: "В причинно-следственных рассуждениях люди не используют уравнения, выражающие зависимости между физическими параметрами, всеми возможными способами". Так, например, уравнение F= ma, в виде качественных пропорциональностей может быть переписано различными способами, если брать один из параметров как функцию двух других. Выбор той формы записи, которая используется в определении процесса ускорения, продиктован стремлением отразить причинные связи, существующие в каждой физической области. Только некоторые направления потока информации интуитивно соответствуют причинно-следственным изменениям. К.Форбас предлагает следующую гипотезу каузальной направленности: "Изменения в физических системах, которые воспринимаются как каузальные, обусловлены нашим восприятием их как соответствующих либо прямым изменениям, вызванным процессами, либо распространением этих прямых влияний через функциональные зависимости".
Центральное допущение теории качественных процессов - это допущение о единственности механизма каузации: "Все изменения в физической системе вызываются прямо или косвенно процессами". Отсюда следует, что качественная физика для некоторой области должна включать полный словарь процессов, возникающих в этой области. Поэтому входная модель физической области должна включать этот словарь, совокупность имеющихся объектов, их свойства, отношения между ними, включая возможные индивидуальные аспекты ситуаций. Важно подчеркнуть, что для описания конкретной ситуации не требуется отдельно задавать активные процессы и аспекты: разработанный алгоритм, проверив условия, при которых они возникают, делает это автоматически.
Возвращаясь к структуре обсуждаемой онтологической схемы, заметим, что она является развитием идей, заложенных в проект STRIPS [FN, Raf]. Но в отличии от STRIPS, правила удаления, модификации и добавления, осуществлявшие мета-контроль над описанием ситуации, включены в само описание ситуации. При этом ситуация перестает быть онтологическим примитивом и понимается как совокупность активных индивидуальных аспектов и протекающих процессов. Онтологический примитив история - это некоторый объем пространства и времени с естественными границами. В [Fr2] различаются истории параметров, аспектов и процессов. На основе предложенных примитивов можно строить более сложные понятия, например, понятие сращенной истории, позволяющее описывать динамические явления, в

ходе которых меняются влияния и отношения между релевантными физическими величинами. Пример такого явления - столкновение двух и более объектов.

Алгоритм, частично описанный в [Fr2, Fr4], позволяет решать задачу прогнозирования. В ходе работы алгоритма существенно используется представление о немонотонном характере проводимых рассуждений. Задача формулируется следующим образом. На входе имеется модель предметной области и конкретный сценарий, написанный в терминах этой модели. При этом не задаются уравнения или процессы, их порождение на основе модели области входит в задачу решателя. Выходом служит прогноз, состоящий из множества переходов между промежуточными ситуациями. Различаются два вида прогнозирования: прогнозирование достижимости и глобальное. Первое из них содержит все ситуации, которые можно достичь за конечное число переходов из фиксированной начальной, а второе - представляет собой объединение всех прогнозов достижимости из множества возможных начальных ситуаций. Под ситуацией здесь и далее понимается качественное состояние объектов предметного мира, представляющее собой некоторый класс поведений. В это состояние входят процессы и аспекты, активные в данном интервале времени, и значения соответствующих физических величин. Каждая ситуация однозначно представляется в решателе, как совокупность характеризующих ее допущений. Динамика этого множества допущений имеет немонотонный характер, поэтому в ходе решения задачи используется система поддержания истинности [dK1,McA2,McD2,RK]. Факты, справедливые в некоторой ситуации, - это утверждения выводимые с использованием допущений.

Прогноз о достижимости порождается следующим образом:

1) находятся все процессы и аспекты, активные в начальной ситуации;

2) определяются влияния на физические величины, чтобы найти знаки соответствующих производных. Поскольку доступна только качественная информация, не все влияния можно определить однозначно. В тех случаях, где остается неопределенность, надо добавлять допущения о неизвестных значениях производных. Так как физические величины зависимы, допущения надо добавлять в порядке, который определяется направлением функциональной зависимости. Если Q2 зависит от Q1, то вначале надо рассмотреть влияния на Q1, а лишь затем на Q2, поскольку знание знака производной Q1 может позволить определить знак производной Q2.

3) анализируются частично-упорядоченные множества значений рассматриваемых физических величин для того, чтобы определить какие переходы возможны. Поскольку каждый из переходов связан с прекращением существования одних и появлением других индивидуальных аспектов и процессов, шаг 3 получил название анализа пределов, а сам возможный переход назван предельной гипотезой (limit hypothesis).

4) до тех пор, пока не будут перебраны все точки разветвления и построенные на шаге 3 переходы, выбирается одна из предельных гипотез и строится новая ситуация.

5) если построенная ситуация уже встречалась ранее, делается объединение.

6) если на шаге 5 была порождена хотя бы одна новая ситуация, ал-

горитм продолжает работу с шага 1, иначе он останавливается.
Для уменьшения перебора, возникающего, в основном, на шаге 3, можно использовать эвристики, предложенные в уже упоминавшейся работе [Ku3]. К сожалению ее автор не высказал никаких соображений относительно условий сходимости своей итеративной процедуры.
Приведенный выше алгоритм нельзя использовать для построения глобального прогноза, поскольку он начинает работу с выделенной начальной ситуации. Построения именно глобального прогнозирования важно потому, что только оно может использоваться для решения задачи интерпретации измерений, поскольку определение начальной ситуации есть часть этой задачи. Интерпретация измерений, в свою очередь, - важная составная задачи диагностики [Fr5, YH]. Для того, чтобы избежать перебора всех начальных ситуаций, в [Fr4] предложена иная архитектура алгоритма, существенно использующая систему поддержания истинности, основанную на допущениях [dK1, dK3] (заметим, что предыдущая версия алгоритма была основана на системе [McA1]).

ЛИТЕРАТУРА.

В приводимом списке литературы используются следующие сокращения:
AAAI - American Association of Artificial Intelligence,
AI - Artificial Intelligence,
IJCAI - International Joint Conference on AI,
NCAI - National Conference on Artificial Intelligence,

1. "Commonsense summer: final report", Center for the study of language and information, Rep. No. CSLI-85-35, Stanford, 1985
2. J.R.Hobbs,R.C.Moore (Eds) "Formal theories of the commonsense world", Norwood(NJ),"Ablex", 1985.
3. "Artificial Intelligence", 1984,v.24,N.1-3, "Special volume on qualitative reasoning".
4. "International J. for Artificial Intelligence in Engineering", 1988, V. 3: Proceedings of the 1st Qualitative Physics Workshop (Urbana, IL, May 1987).

Al J.Allen "Towards a general model of action and time", AI, 1984, v.23, N 2, p. 123-154

AlH J.Allen, P.Hayes "Moments and points in an interval-based temporal logic", Computational Intelligence, 1989, v.5, N 4, p. 225-238

BhN R.Bhaskar, A.Nigam "Qualitative physics using dimensional analysis", AI, 1990, v. 45, N 1-2, p. 73-111

BL Н.Н.Баутин, Е.А.Леонтович "Методы и приемы качественного исследования динамических систем на плоскости",М.,"Наука",1976

Da1 E.Davis "Reasoning, commonsense", In: "Encyclopedia of artificial intelligence", Editor-in-chief St.Shapiro, v.2, 1987, p. 833-840

Da2 E.Davis "A logical framework for commonsense predictions of solid object behavior", In: [4], V. 3, N 3, p. 125-140

Dav M.Davis "Applied non-standard analysis", N.Y., 1977, "John Wiley& Sons"; русский перевод: М.Дэвис "Прикладной нестандартный анализ", М., 1980, "Мир", 236 стр.

De1 R.Dechter "Enhancement schemes for constraint processing: backjumping, learning, and cutset decomposition",AI,1989/90, v. 41, N 3, p. 273-312

De2 R.Dechter "From local to global consistency", In: 8th biennual Confer. of Canadian Society for Computational Study of Intelligence (CSCSI'90), Proceedings, Ottawa,1990,p. 231-237

dK1 J.de Kleer "An assumption-based truth maintenance system (ATMS)", AI, 1986, v.28, N 2, p. 127-162

dK2 J.de Kleer "Qualitative physics", In: "Encyclopedia of artificial intelligence", Editor-in-chief St.Shapiro, v.2, 1987, p. 807-813

dK3 J.de Kleer "A general labeling algorithm for assumption based truth maintenance system (ATMS) ", XEROX PARC, System Science Lab., 1988, Working Paper No P88-00060

dK4 J. de Kleer "Propositional inference in CSP and ATMS techniques", XEROX PARC, System Science Lab., March 1989, Working Paper No P89-00023, 22 p.

dKB1 J.de Kleer,J.S.Brown "The origin, form and logic of qualitative physical laws", In: 8th IJCAI (Karlsruhe), 1983, v.2, p. 1158-1168

dKB2 J.de Kleer,J.S.Brown "A qualitative physics based on confluences", In: [3], p. 7-83; also in: [2], p. 109-183

dKB3 J.de Kleer, J.S.Brown "Theories of causal ordering",AI,1986, v. 29, N 1, p. 33-61

dKBo J.de Kleer,D.Bobrow "Qualitative reasoning with higher-order derivatives", In: AAAI, 4th NCAI (Austin,TX), 1984,p. 86-91

dKW J.de Kleer,B.C.Williams "Back to backtracking: controling the ATMS", AAAI, 5th NCAI (Philadelphia, PA),1986, v.2,p. 910-917

DoRa J.L.Dormoy, O.Raiman "Assembling a device", In: [4], V. 3, N 4, p. 216-226

Dr O.Dressler "Problem solving with the non-monotonic ATMS", In: 3d International Workshop on Non-Monotonic Reasoning, (South Lake Tahoe, Ca), Proceedings, 1990, p. 44-57

Fa B.Faltings "Qualitative kinematics in mechanisms", AI, 1990, v. 44, N 1-2, p. 89-119

Fl M.Fleck "Representing space for practical reasoning", Image and Vision Computing, 1988, v.6, N 2, p. 75-86

FN R.Fikes, N.Nilsson "STRIPS: a new approach to the application of theorem proving to problem solving", AI, 1971, v. 2, p.198-208; русский перевод: "Система STRIPS - новый подход к применению методов доказательства теорем при решении задач", в сб.: "Интегральные роботы", вып. 1, Москва, "Мир", 1973.

FNF K.Forbus, P.Nielsen, B.Faltings "Qualitative kinematics: a framework", In: 10th IJCAI (Milan), 1987, v.1, p. 430-435

Fr1 K.Forbus "Qualitative reasoning about space and motion", In: D.Gentner, A.Stevens (Eds) "Mental models", Hillsdale, 1983, p. 53-73

Fr2 K.Forbus "Qualitative process theory", In: [3], p. 85-168; also in: [2], p. 185-226

Fr3 K.Forbus "Commonsense physics: a review", In: J.F.Traub et al. (Eds) "Annual review of computer science", 1988, v. 3, p. 197-232

Fr4 K.Forbus "Qualitative Process Engine: using ATMS for qualitative simulation", In: [4], v. 3, N 4, p. 200-215

Fr5 K.Forbus "Interpreting of observations", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernatics, 1987, v. 17, N 3

Ga1 A.Galton "A critical examination of Allen's theory of action and time", AI, 1990, v.42, N 2-3, p. 159-188

Ga2 A.Galton "Reified temporal theories and how to unreify them", In: 12th IJCAI (Sidney), 1991, v.2, p. 1177-1182

Hb J.R.Hobbs et.al. "Commonsense metaphysics and lexical semantics", Computaional Linguistics, 1987,v.13,N. 3-4,p. 241-250

Hg G.Hager "Naive physics of materials: a recon mission", In: [1], p. 3.1 - 3.33

Hs1 P.Hayes "The second naive physics manifesto",In: [2], p.1-36 also: R.Brachman, H.Levesque (Eds) "Readings in knowledge representation", 1985, "Morgan Kaufmann", p. 467-485

Hs2 P.Hayes "Naive physics 1: Ontology for liquids", In: [2], p. 71-107

Hs3 P.Hayes " What the frame problem is and isn't ", In:

Z.W.Pylyshyn "The robot's dilemma: the frame problem in AI", Norwood(NJ), "Ablex Publ.", 1987, p. 123-137

Iw1 Y. Iwasaki "Qualitative physics", In: A.Barr et al. (Eds) "The Handbook of AI", v. 4, Reading (Mass.), "Addison-Wesley Publ.", 1989, p. 325-415

Iw2 Y.Iwasaki "Causal ordering analysis", In: P.A.Fishwick, P.A. Luker (Eds) "Qualitative simulation, modelling and analysis" (ser. "Advances in simulation", vol. 5), N.Y., "Springer", 1991, Ch. 5, p. 98-118

IwS Y.Iwasaki, H.Simon "Causality in device behavior", Artificial Intelligence, 1986, v. 29, N 1, p. 3-32

Jef C.Jeffries, V.Klee, P.van den Driessche"When is matrix sign stable ?", Canadian J. of Mathematics, 1977, vol. 29, N 2, p. 315-326

Ka H.Kautz "Formalizing spatial concepts and spatial language", In: [1], p. 2.1 - 2.45

Kle V.Klee, P.van den Driessche "Linear algorithm for testing the sign stability of a matrix and for finding z-maximum matchings in acyclic graphs", Numerische Mathematic, 1977, v. 28, N 3, p. 273-285

Ko M.Kokar "Critical hypersurfaces and the quantity space", In: AAAI, 6th NCAI (Seattle, Wa), 1987, v.2, p. 616-620

Ku1 B.Kuipers "Commonsense reasoning about causality: deriving behavior from structure" , In: [3], p. 169-203

Ku2 B.Kuipers "Qualitative simulation",AI,1986,v.29,N 3,p.289-338

Ku3 B.Kuipers "Abstraction by time-scale in qualitative simulation", In: AAAI, 6th NCAI (Seattle,Wa), 1987, v.2,p. 621-625

Le D.B.Lenat "Ontological vs. knowledge engineering", In: IEEE Transactions on knowledge and data engineering, 1989, v. 1, N 1, p. 84-88

LeG D.B.Lenat, R.V.Guha "Building large knowledge-based systems. Representation and inference in the CYC project", Reading (Mass.), "Addison-Wesley", 1990, 372 p.

McA1 D.McAllester "Reasoning utility package user's manual", Massachusetts Inst. of Technol., Artif. Intell. Labor., AI MEMO No 667, MIT, Cambridge(MA), 1982, April, 52 p.

McA2 D.McAllester "Truth maintenance", In: AAAI, 8th NCAI, 1990, v.2, p. 1109-1116

Mc1 J.McCarthy "Epistemological problems of artificial intelligence", In: 6th Intern. Joint Conference on Artif. Intellig. (Cambridge,MA), 1977, Proceedings, v. 2, p. 1038-1044; also: R.Brachman, H.Levesque (Eds) "Readings in knowledge representation", 1985, "Morgan Kaufmann", p. 23-30

McD2 D.McDermott "A general framework for reason maintenance", Artificial Intelligence, 1991, v. 50, N 3, p. 289-329

MH J.McCarthy, P.Hayes "Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence", In: "Machine Intelligence", v.4,N.Y.,1969, p. 463-502 (русский перевод: "Кибернетические проблемы бионики", вып. 2, М.,"Мир",1972)

Mo R.Montague "Deterministic theories", In: R.H.Thomason (Ed.) "Formal philosophy: selected papers of R.Montague ", New Haven, 1974, ch. 11, p. 303-359

MSS J.McKinsey, A.Sugar,P.Suppes "Axiomatic foundations of classical particle mechanics", Journal of Rational Mechanics and Analysis, 1953, v.2, p. 253-272

NBh A.Nigam, R.Bhaskar "Qualitative reasoning about engineering systems using dimensional analysis", In: 3d Intern. Symposium on Methodologies for Intelligent Systems (Turin, IT), Proceedings, Z.W.Ras, L.Saitta (Eds.), 1988, p. 273-290

Rai O.Raiman "Order of magnitude reasoning", In: AAAI, 5th NCAI, (Philadelphia,PA), 1986, v.1, p. 100-104

RK R.Reiter, J.de Kleer "Foundations of ATMS", In: AAAI, 6th NCAI (Seattle, WA), 1987, v.1, p. 183-188

Rob A.Robinson "Introduction to model theory and to the metamathematics of algebra", Amsterdam,1963, "North-Holland Publ"; русский перевод: "Введение в теорию моделей и метаматематику", М., 1967, "Наука", 376 стр., глава IX.

Sa1 E.Sacks "Qualitative analysis by piecewise linear approximation", In: [4], v. 3, N 3, p. 151-155

Sa2 E.Sacks "A dynamic system perspective on qualitative simulation", AI, 1990, v.42, N 2-3, p.349-362

Se В.М.Сергеев "Типы концептуального осмысления политического развития", в: "Ученые записки Тартусского государственного университета", вып. 751 ("Модели диалога в системах ИИ"), стр. 127-139, Тарту, 1987

Sha1 M.Sharir "Algorithmic motion planning in robotics", Computer, 1989, v. 22, N 3, p. 9-20

Sho1 Y.Shoham "Naive kinematics: two aspects of shape", In: [1],

p. 4.1 - 4.25 (см. также: 9th IJCAI (Los Angeles),1985, v.2, p. 436-442)

Sho2 Y.Shoham "Reified temporal logics: semantical and ontological considerations", In: 7th European Conf. on Artif. Intell. (Brighton, UK), 1986, Proceedings, p. 390-397.

SS1 J.T.Schwartz, M.Sharir "A survey of motion planning and related geometric algorithms", Artific. Intellig., 1988, v.37, N 1-3, p. 157-169

Str P.Struss "Mathematical aspects of qualitative reasoning", In: [4], V. 3, N 3, p. 156 -169

Ta1 L.Talmy "Semantics and syntax of motion", In: J.Kimball (Ed) "Syntax and semantics", v.4, N.Y.,"Academic Pr.", 1975

Ta2 L.Talmy "How langauge structures space", In: H.Pick, L.Acredolo (Eds) "Spatial orientation: theory, research and application" , N.Y., "Plenum", 1983, p. 225-282

Ta3 L.Talmy "Force dynamics in langauge and cognition", Cognitive Science, 1988, v. 12, N 1 (Jan.-March), 44 pp.

Wil B.C.Williams "MINIMA: a symbolic approach to qualitative algebraic reasoning", In: American Association of AI, 7th Nation. Conf. on Artif. Intell. (Saint Paul, MN), Proceedings, 1988, v.1, p. 264-269

WP С.О.Варосян,Д.А.Поспелов "Неметрическая пространственная логика", Известия АН СССР, сер. Техническая кибернетика, 1982, N 5, стр. 86-99

Ya C.-K.Yap "Algorithmic motion planning", In: J.T.Schwartz and C.-K.Yap (Eds) "Algorithmic and geometric aspects of robotics" ("Advances in robotics", v.1), Hillsdale (NJ),1987, p. 95-143

YH W.C.Yoon, J.M.Hammer "Aiding the operator during novel fault diagnosis", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1988, v. 18, N 1, p. 142-147

Appendix (unpublished)

ПЛАНИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ

Рассмотрим простейшую задачу планирования движения робота по горизонтальной поверхности в помещении с препятствиями. Будем считать, что робот стоит на полу в некоторой точке помещения и держит некоторый предмет. Пусть нам заданы размеры всех предметов в помещении, в том числе и робота, а также расстояния между всеми объектами. Говоря о размерах объектов, мы предполагаем, что они представляют собой либо параллелепипеды (прямые бруски), либо являются объединением конечного числа параллелепипедов, поэтому размеры задаются как упорядоченные тройки <длина, ширина, высота>. Мы будем рассматривать только случай, когда робот может совершать поступательные движения по полу помещения, т.е. повороты запрещены, и при этом предмет, который он держит, остается неподвижным относительно робота. Это предположение существенно, т.к. теперь для описания движения робота с предметом достаточно двух степеней свободы. Задача состоит в том, чтобы найти кратчайший путь из исходной точки в заданную, при перемещении вдоль которого не произойдет столкновений между роботом и другими объектами.

Для дальнейшего нам понадобится понятие конфигурационного пространства, введенное в [LPW] и получившее дальнейшее развитие в [LP]. Пусть система координат связана с одной из вершин робота, например левой, нижней, дальней, в начальный момент времени. Будем обозначать робота с предметом, который он держит, как многогранник A, вершину с которой связана система координат обозначим rv. Остальные объекты в помещении будем обозначать через B с индексом. Конфигурацией многогранника называется множество независимых параметров, характеризующих его положение. Таким образом, конфигурация A может рассматриваться как точка x в d-мерном пространстве пространстве конфигураций, где d - число степеней свободы A. Это d-мерное конфигурационное пространство обозначим Cspace(A), многогранник A в конфигурации x обозначим (A)x, A в начальной конфигурации обозначим (A)o.

Не все конфигурации в Cspace(A) являются допустимыми, в частности, те конфигурации, в которых пересечение A и некоторого Bj непусто, незаконны, т.к. они приводят к столкновениям.

Конфигурационным препятствием CO(A/B), порожденным объектом B, назовем множество:

CO(A/B) = { x из Cspace(A) / пересечение (A)x и B непусто }

В случае, когда A и B - выпуклые многогранники, если rv находится вне кофигурационного препятствия, то A и B не сталкиваются, другими словами, каждое из препятствий "растягивается" на величину движущегося объекта в направлении, зависящем от выбора вершины координат. Это простое понятие позволяет свести задачу планирования движения A среди препятствий Bj, к задаче планирования движения точки rv среди препятствий CO(A/B). Если A и Bj - невыпуклые многогранники, то конфигурационное препятствие можно вычислить как объединение соответствующих кусков для каждого из параллелепипедов, образующих A и Bj.

Для вычисления CO(A/Bj) нам понадобится следующее простое утверждение, подобное доказанному в [LP]:

CO(A/Bj) = Pr [Bj - (A)o], (1)

где

B - A = { b-a / "a" принадлежит A, "b" принадлежит B },

A + B = { a+b / "a" принадлежит A, "b" принадлежит B },

Pr(D) - проекция многогранника D на прямоугольник, по которому перемещается робот.

Обозначим conv(D) - выпуклую оболочку многогранника D, а vert(D) - множество вершин этого многогранника. В [LP] доказывается:

conv(A + B) = conv(A) + conv(B)= conv(vert(A) + vert(B))

Поскольку мы считаем, что нам задано разбиение A на параллелепипеды APi и разбиение каждого из Bj на параллелепипеды BjPk, то в силу выпуклости APi и BjPk, мы получаем:

$$APi + BjPk = conv(vert(APi) + vert(BjPk)), \qquad (2)$$

следовательно,
CO(A/B) = Pr [Объединение по i,j,k (BjPk - (APi)o)] ı
Pr[Объединение по i,j,k conv(vert(BjPk) - vert(APi)o)] (3)
Для вычисления в (2) выпуклой оболочки от 64 точек, получающихся в результате попарного сложения (вычитания) вершин APi и BjPk, можно использовать любой из алгоритмов описанных в [PSh], либо какой-либо прямой метод, например, использующий лексикографическое упорядочение вершин. В любом случае, этот алгоритм требует некоторую константу C операций. Если исходная сцена состоит из n параллелепипедов, то вычисление CO(A/Bj) для всех препятствий требует Cn операций.
Итак, мы свели задачу к поиску траектории точки внутри прямоугольника (пол помещения), не пересекающей ни один из многоугольников CO(A/Bj). Для решения этой задачи кажется естественным воспользоваться свойствами диаграммы Вороного [PSh], планарный граф, носящий это название, неоднократно использовался в работах, посвященных планированию движения [Sha1, SS1, Ya]. Наиболее привлекательное свойство диаграммы Вороного - то, что она является деформационным ретрактом свободного пространства, т.е. любая траектория, не пересекающая препятствия, может быть непрерывно отображена в диаграмму Вороного, и, кроме того, зазор между движущейся точкой и препятствиями максимален в случае, если движение осуществляется вдоль ребер диаграммы Вороного.
Вычисление точной диаграммы Вороного для нашего множества многоугольников потребует вычисления криволинейных ребер, т.к. множество точек равноудаленных от некоторой из вершин и некоторой из сторон многоугольника представляет собой параболу [Kir]. Поэтому мы будем вычислять диаграмму Вороного для множества вершин многоугольников, образующих препятствия. Поскольку некоторые из ребер такой вершинной диаграммы проходят через конфигурационные препятствия, их необходимо удалять при построении диаграммы. В [PSh] описан эффективный алгоритм типа "разделяй и властвуй" для построения вершинной диаграммы Вороного, требующий O(nlog n) операций.
Таким образом, наша первоначальная задача сведена к задаче поиска кратчайшего пути в планарном графе, поскольку веса ребер вычисляются исходя из информации на входе задачи. Эта последняя задача может быть решена, например, алгоритмом Дейкстры.

Литература:
[LPW]. T.Lozano-Perez, M.A.Wesley "An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles", //Communications of the ACM, 1979 (Oct.), v. 22, N 10, p.560-570
[LP]. T.Lozano-Perez "Spatial planning: a configuration space approach",// IEEE Transactions on Computers, 1983 (Febr.), v.32, N 2, p. 108-120
[PSh]. F.P.Preparata, M.I.Shamos "Computational geometry: an introduction"// N.Y., "Springer", 1985; русский перевод: Ф.Препарата, М.Шеймос "Вычислительная геометрия: введение", М., "Мир", 1989, 478 стр., глава 5

[Sha1] M.Sharir "Algorithmic motion planning in robotics"// Computer, 1989, v. 22, N 3, p. 9-20
[SS1] J.T.Schwartz, M.Sharir "A survey of motion planning and related geometric algorithms"//Artific. Intellig., 1988, v.37, N 1-3, p. 157-169
[Ya] C.-K.Yap "Algorithmic motion planning"// J.T.Schwartz and C.-K.Yap (Eds) "Algorithmic and geometric aspects of robotics" ("Advances in robotics", v.1), Hillsdale (NJ),1987, p. 95-143
[Kir] D.G.Kirkpatric "Efficient computation of continuous skeletons"// 20th Symposium on Foundations of Computer Science, FOCS-79, IEEE, 1979 (October), Proceedings, p. 18-27