

Проблема синтеза модели 3D объекта по его проекционным изображениям. Аналитический обзор

Т. В. Мошкова¹, С. И. Ротков², В. А. Тюрина³

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д.65, ННГАСУ

¹ ORCID: 0000-0003-1003-2914, ng.forever.mtv@gmail.com

² ORCID: 0000-0002-0662-7619, rotkov@nngasu.ru

³ ORCID: 0000-0002-0234-9041, 55555_73@mail.ru

Аннотация

В статье приводится обзор литературных источников, как российских, так и зарубежных, по проблеме синтеза моделей пространственных объектов по их изображениям, имеющихся на различных носителях информации (проекционные изображения в бумажном и электронном виде). Проблема синтеза моделей является ключевой в информационных технологиях, поскольку именно геометрическая 3D модель лежит в основе решения прикладных графических задач.

Задача синтеза 3D модели объекта по набору его проекционных 2D изображений относится к трудноформализуемой обратной задаче инженерной геометрии и до конца не реализована ни в алгоритмическом, ни в программном виде. Впервые проблема была сформулирована и поставлена как научная задача в 60-х годах 20-го века в СССР.

Приводится хронология и варианты решений поставленной задачи.

Работа выполнена по грантам РФФИ № 15-07-05110 и № 17-07-00543.

Ключевые слова: компьютерная геометрия и графика, обратная задача инженерной геометрии, синтез модели объекта, электронная модель изделия.

Постановка задачи

Визуализация любого 3D объекта произвольной степени структурной сложности и его работы начинается с задания его геометрической модели [1,2]. При этом основную технологическую проблему представляют собой процессы ввода данных о геометрии объекта и формирования по этим данным непосредственно самой модели.

С момента создания первой программы интерактивной компьютерной графики (1963 г, «SketchPad», США) произошло множество перемен в развитии аппаратных и программных средств [3, 4]. По оценке экспертов в мире насчитывается более 1000 различных используемых систем автоматизированного проектирования (САПР) [5].

Очередной скачок в развитии интегрированных САПР начался с середины 90-х годов, когда их разработка и внедрение стали рассматриваться ведущими

производителями как одна из составляющих CALS-технологий [6, 7].

Отсутствие электронной документации на продукцию стало рассматриваться зарубежными экспертами как средство ограничения доступа на международный рынок. Поэтому важнейшей задачей для развития отечественного промышленного производства является переход на безбумажную технологию проектирования, производства и сбыта продукции [7, 8].

Современные информационные технологии работают на различных этапах жизненного цикла изделия, но в большинстве своем в том или ином виде генерируют или обрабатывают геометрическую и графическую информацию об объекте проектирования и производства.

В течение всего жизненного цикла изделия различными системами проектирования (CAD), изготовления (CAM), инженерных расчётов (CAE) и другими системами используется одна и та же

геометро-графическая информация. Каждая из этих систем использует как ранее накопленную и введенную в электронный архив, так и создает свою, только ей присущую, информацию, которая и формирует в совокупности полную электронную модель проектируемого изделия.

На рис.1 показаны направления информационных потоков и размерность данных. Также надо учесть и тот факт, что все архивы технической документа-

ции, сформированные на различных предприятиях и производствах, как правило, на бумажном носителе, должны быть преобразованы в электронный вид и электронную модель изделия. Без этого преобразования говорить о широком применении систем класса PDM либо PLM не приходится, поскольку процесс проектирования и конструирования какого-либо нового объекта ведется на основе аналогов и прототипов.

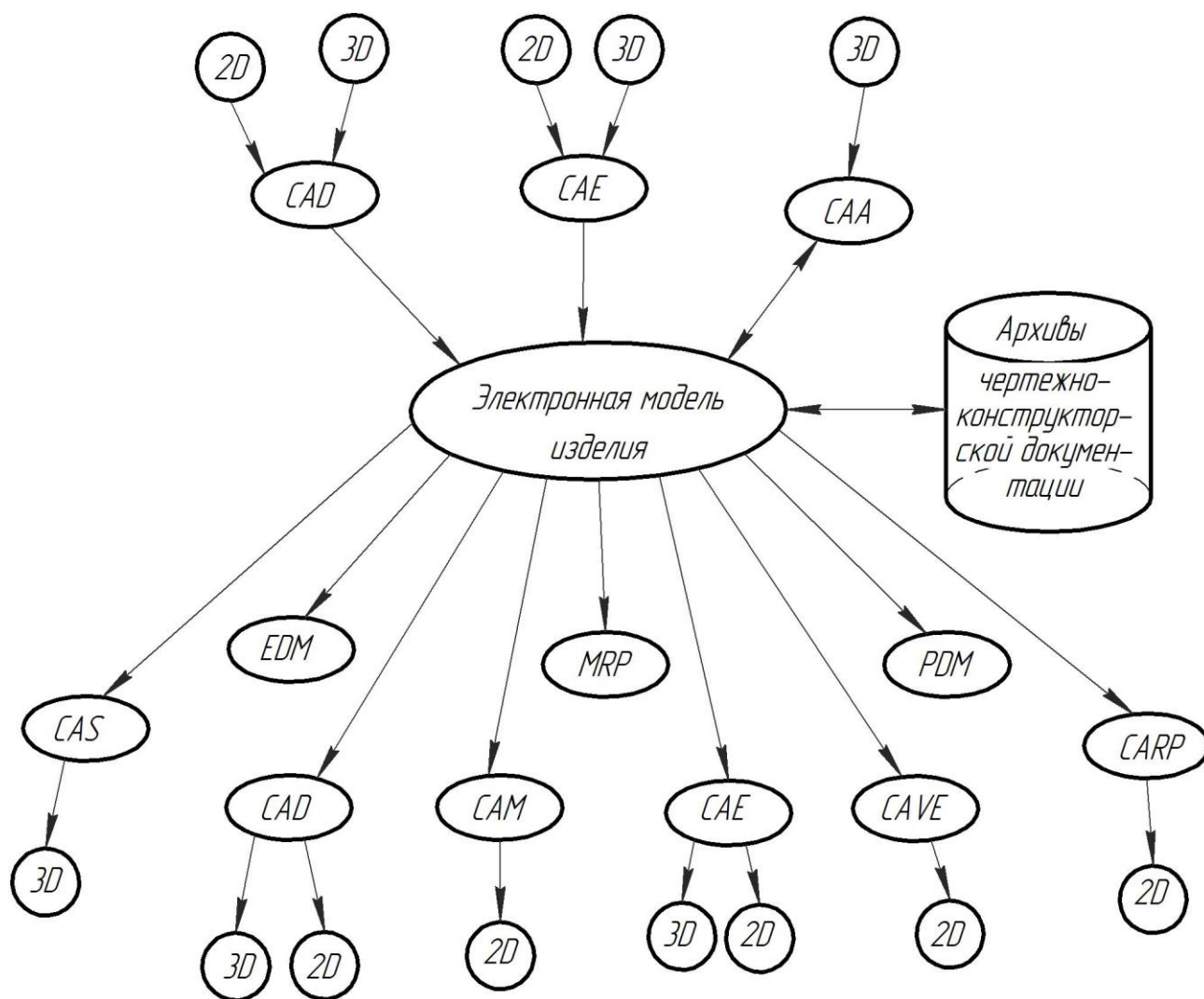


Рис. 1. Электронная модель изделия и ее связи с информационными технологиями

ГОСТ 2.052-2015 определяет электронную модель как «модель изделия, выполненную в компьютерной среде» и уточняет понятие электронной геометрической модели изделия как описывающую преимущественно геометрическую форму, размеры и иные свойства

изделия, зависящие от его формы и размеров [9].

На наш взгляд это определение требует введения дополнений, которые помогают понять некоторые аспекты обсуждаемой проблемы. Приведенные здесь и далее определение электронной модели и комментарии к ГОСТ 2.052-

2015 являются авторскими и отражают коллективную точку зрения.

Электронной моделью изделия называется комплекс информационных массивов, хранящийся на различных электронных носителях, удовлетворяющий требованиям национальных и международных стандартов и содержащий геометро-графические, текстовые и расчётные данные о проектируемом изделии.

При различных структурах данных и алгоритмах решения одних и тех же проблемных задач каждая из составляющих CALS технологий решает функциональную задачу преобразования размерности пространства данных, либо оставляет её без изменения [10, 11].

Так, например, системы автоматизированного черчения (CAD) имеют на входе и на выходе информацию о плоских (2D) геометрических объектах в виде проекционных изображений, в то время как системы автоматизированного проектирования (CAD) и инженерных расчетов (CAE) работают как с плоскими (2D), так и пространственными (3D) объектами. Системы автоматизации сборки (CAA) и моделирования поведения объекта (CAS), как правило, не изменяют размерности пространства моделирования. Системы визуализации (CAVE), быстрого прототайпинга или аддитивных технологий (CARP), управления станками с ЧПУ (CAM) преобразуют данные об объекте для перехода в пространство меньшей размерности.

Одной из проблем при внедрении новых информационных технологий является противоречие между ручной технологией проектирования и требованием ввода в память ЭВМ данных о пространственной конструкции для автоматизированного расчёта и генерации изображения. Работа проектировщика традиционно основывается на применении проекционных изображений как основных носителей информации и документов, определяющих все стадии проектирования, расчёта и создания изделия. Поэтому лучшим языком общения человека с ЭВМ все-таки является проекционное изображение [12, 13].

Работы по преодолению этого противоречия велись и ведутся как у нас в стране, так и за рубежом. Наиболее разработанными являются вопросы создания и эксплуатации систем геометрического моделирования на плоскости (2D системы), позволяющие автоматизировать большой объём работ по подготовке технической документации.

Как отмечал профессор Полозов В.С. [14], системы геометрического моделирования могут быть разделены на две большие группы:

- связанные системы, ориентированные только на выпуск технической документации проектируемых объектов и, как следствие, получения различных изображений;
- несвязанные системы, предназначенные для формирования электронных геометрических моделей.

По уточнению Роткова С.И. [15], вторая группа делится на две категории:

- несвязанные системы 1-го рода, в которых по 3D модели объекта генерируется набор изображений, т.е. 2D геометрическая модель объекта. При этом в системе решается прямая задача инженерной геометрии, а именно, проецирование модели объекта на заданную картинную плоскость;
- несвязанные системы 2-го рода, в которых по набору изображений (2D модель) генерируется 3D модель объекта, и затем (при необходимости) формируется новый набор изображений (новая 2D модель), отличный от предыдущего. В таких системах одновременно решаются как прямая, так и обратная задачи инженерной геометрии [10, 16, 17, 18].

Известны программные реализации функционального оператора 2D→3D в некоторых системах, например, таких как Autodesk Inventor и Solid Edge [19], которые используют интерактивный подход к решению проблемы синтеза 3D геометрической модели объекта по проекциям.

В этих системах в качестве исходных данных берется 2D геометрическая мо-

дель, которая подвергается обработке, в частности, из расчета исключаются данные о размерах, текстовые пояснения и другая информация, т.е. остаются данные только о точках и линиях, составляющих изображение объекта. Далее, пользователь задает систему координат в 3D пространстве и указывает в ней плоскости, на которые будут помещены проекции объекта. После этого пользователь должен выделить одну из проекций и тип формообразующей операции (вращения, выдавливания и др.), которые являются частными случаями каркасно-кинематического способа формообразования [12,20]. В результате получают элементы модели, к которым далее применяется аппарат теоретико-множественных операций объединения, пересечения и вычитания.

Системы, реализующие подобный способ синтеза 3D модели, занимают промежуточное положение между системами 1-го и 2-го рода. Они требуют от проектировщика полного погружения в процесс конструирования объекта и не являются эффективными в проблеме преобразования архивов технической документации с бумажных носителей в электронную модель изделия.

Большинство существующих несвязанных систем являются системами 1-го рода. Они позволяют получать 3D образы пространственных объектов с помощью исходной информации, наиболее удобной для ввода в ЭВМ и решения задачи получения изображений с точки зрения программистов и математиков, а не конструкторов. Но наиболее полно удовлетворяют требованиям пользователей САПР системы 2-го рода, так как приемы работы в них максимально приближены к естественным приемам работы конструкторов и проектировщиков (примерами таких систем являются системы ИНГРАФО [14], КИТЕЖ [21,22]).

Существующие на сегодняшний день системы 2-го рода далеки от совершенства, так как наборы изображений, по которым в них могут быть сгенерированы 3D модели, наложены серьезные ограничения в силу ряда причин, таких как количественная и качественная не-

полнота функциональных операторов моделирования, реализующих не весь спектр способов и приемов конструирования.

Вопрос о снятии хотя бы части этих ограничений является необходимым для совершенствования систем моделирования 2-го рода, особенно в свете развития и внедрения CALS- и BIM-технологий.

Из всего вышесказанного становится очевидной важность проблемы синтеза геометрических моделей пространственных объектов по характерным для ручной технологии проектирования изображениям на плоскости, т.е. по совокупности проекционных изображений, имеющихся на бумажных или электронных носителях. Здесь и далее под проекционными изображениями будем понимать результат операции проецирования [12, 14, 23] пространственного 3D объекта, отнесенного к внутренней системе параметризации (декартовой системе координат), при помощи аппарата параллельного ортогонального проецирования.

Разработке алгоритмов решения задачи синтеза моделей по проекционным изображениям посвящено малое количество публикаций в литературе по геометрическому моделированию в силу нетривиальности как самой задачи, так и её программной реализации. Удалось получить информацию лишь о некоторых коллективах, которые смогли создать устойчиво работающий программный продукт промышленного уровня, реализующий различные подходы к решению поставленной проблемы. Это фирма MATRA DATAVISION (Франция) [24], университет Бен-Гуриона (Израиль), Ижевский государственный технический институт - группа проф. В.Н. Кучуганова [13, 25-27] и коллектив программистов НИИ Механики и ННГАСУ под руководством проф. С.И. Роткова [10, 21, 22, 28, 29, 30, 31, 32].

Процесс формирования и чтения проекционных изображений, в силу бесконечного многообразия возможных

изделий, является недостаточно детерминированным.

Задача синтеза трёхмерной модели по комплексу ортогональных проекционных изображений включает в себя процесс некоторого суммарного анализа множества графических объектов. Этот процесс сложно описать в терминах числовой модели, необходимой для автоматического воспроизведения с помощью ЭВМ.

Мы уже сделали вывод о необходимости представления исходных данных для получения 3D образов объектов в традиционном для проектирования виде, что подразумевает их соответствие правилам и нормам ЕСКД [33, 34]. На основании существующих в этой области исследований [33] можно сделать вывод, что необходимо решать следующие задачи:

1. Систематизация графической и иной, регламентированной ЕСКД информации, имеющейся на проекционном изображении и позволяющей, либо распознавать, либо восстанавливать с её помощью 3D модель геометрического объекта.
2. Создание баз данных такой информации. Решение вопроса о приоритетах данных.
3. Анализ проекционного изображения и разработка алгоритмов распознавания 3D образов объектов и считывания информации для наполнения созданных баз данных.

Все указанные задачи являются трудно формализуемыми. Для систематизации графической информации и анализа проекционного изображения необходим семиотический (смысловой) подход. Проблема семиотического анализа чертежа впервые была поставлена в 60-е годы в работах Полозова В.С. [35, 36] и в дальнейшем развита им и его учениками [28, 32, 33, 37, 38-41]. В этих работах обосновано применение проекционной машинной графики для формирования 3D моделей объектов. Кроме того, определены подходы к решению трудно формализуемых задач по анализу и ис-

пользованию информации, содержащейся на 2D модели.

В конце 60-х годов проблема «чтения чертежа» была поставлена также в работах Х.И. Тани [42-44] и В.А. Щеколдина [45, 46], но к входной информации добавлялись проекции "заготовки" объекта, тем самым, видоизменяя задачу синтеза.

Решения проблемы систематизации и анализа графической информации на проекционных изображениях также исследовались в работах В.Н. Кучуганова и его школы [13, 25-27]. Ими была разработана теория и средства синтеза частных баз знаний, сценариев графического инженерного диалога по проектированию объектов заданного класса и объектно-ориентированных САПР. В частности, успешно решена задача семантического анализа проекционного изображения путём распознавания графов образов двумерных моделей.

Для решения трудно формализуемых задач традиционно применяются следующие принципы [47]:

- эвристическое моделирование [12, 48];
- структурно-лингвистический подход [49, 50, 51, 52].

Эвристическое моделирование – это моделирование поведения человека в ходе решения некоторой задачи с целью выявления алгоритма её решения [48]. Достоинство эвристического подхода заключается в том, что в процессе решения задачи происходит подключение жизненного опыта человека.

Структурно-лингвистический подход заключается в эффективном применении для построения моделей процессов языковых моделей и является универсальным для решения трудно формализуемых задач вообще [53].

Выяснив, какие подходы используются для решения задач по систематизации графической информации и её анализу, необходимо рассмотреть, по каким принципам могут быть связаны

между собой 2D системы машинной графики и 3D системы геометрического моделирования в пространстве [54].

2D системы, имеющие очень большое распространение, позволяют вводить двумерную геометрическую и графическую пояснительную алфавитно-цифровую информацию, редактировать её, используя при этом аналитический аппарат геометрических построений на плоскости, а также создавать и хранить в архивной форме типовые изображения для дальнейшего использования в других проектах. Системы данного класса дают пользователю достаточно удобные средства извлечения информации о геометрии двумерных объектов, используемых как при расчётах, так и при технологической подготовке производства. Кроме того, 2D системы имеют следующие возможности для осуществления перехода к 3D геометрическим моделям:

- предоставлять данные о координатах точек и топологии их соединения в любом изображении, входящем в состав проекционного изображения;
- передавать полученную информацию с помощью пре- и пост-процессоров в различные САПР.

3D системы геометрического моделирования используют подходы, в результате которых синтезируется каркасное, граничное либо конструктивное представление пространственного объекта. Напомним, что в наиболее развитых 3D системах используется обобщённая модель пространственного объекта, включающая в себя информационные массивы, соответствующие всем видам представления объектов, но изначально синтезируется именно каркасная модель, а уже от неё происходит переход к обобщённой модели. Поэтому для решения задачи получения трёхмерных моделей по информации, импортируемой из 2D систем, наиболее предпочтительна каркасная модель [33]. Кроме того, она наиболее удобна

именно для импортирования и экспортирования из других систем графики.

Итак, для решения проблемы связи 2D→3D (проблему связи 3D→2D мы не рассматриваем, т.к. она достаточно изучена), а именно, проблемы синтеза трёхмерных моделей по информации, содержащейся на проекционных изображениях объекта, и полученной из 2D системы, необходимо извлекать из 2D пакетов машинной графики координаты точек объекта по всем трём осям декартовой системы координат (вершины) и информацию об их соединении (рёбра), а также интерпретировать различную текстовую информацию. Важной задачей здесь является необходимость выбора наиболее подходящих двумерных систем координат для правильного восстановления координат вершин.

Заметим, что иностранными авторами предпринимались попытки решить задачу получения 3D моделей иным путём, не используя в качестве посредника 2D системы. Известны работы I.E. Sutherland, посвящённые разработке аппаратного и математического обеспечения для «скалывания». В них предложены методы генерирования трёхмерных вершин с помощью скалывания с двух проекций [55]. Работы R.W. Thornton, описывают интерактивную технику трёхмерного ввода с двумерных проекций [56]. Но ни тот, ни другой авторы не исследовали алгоритмы восстановления моделей геометрических тел по их проекциям.

Впервые в мире задача восстановления объекта по его проекциям как научная проблема была рассмотрена в работе "Использование математических методов и электронной вычислительной техники в машиностроении", опубликованной в 1965 году в сборнике трудов Проектно-Технологического Научно-Исследовательского Института (ПТНИИ) ВВСНХ в г. Горьком [35]. В

ней были описаны схемы алгоритма задачи анализа пространственной ситуации по линиям чертежа. При этом использовалась геометрическая схема производственного чертежа, предложенная В.С. Полозовым в 1962 г. [36]. Схема является моделью действий конструктора при формировании многовидового чертежа из ортогональных проекций. На основе информации о линиях проекций производилась оценка взаимного расположения элементов оригинала в пространстве. Данная работа доказывает приоритет России в вопросе первенства постановки и начала решения задачи синтеза пространственного образа объекта по проекциям.

Сходная задача была сформулирована в 1966 г. в работе Х.И. Тани «Алгоритм построения пространственного описания тела, заданного проекциями» [42, 43, 44]. Основным принципом предложенного подхода заключался в последовательном удалении кусков лишнего материала из тела заготовки. В качестве заготовки предлагалось использовать любое тело, заведомо включающее в себя искомый объект. Алгоритм решения выглядит следующим образом.

1 блок. Построение описания пространственной формы исходной заготовки.

2 блок. Построение описания проекций заготовки.

3 блок. Сравнение проекций заготовки и исходного чертежа.

Совпадение проекций означает, что полученная заготовка и есть искомая деталь. Если имеется хотя бы одна недостающая линия (НЛ) или лишняя линия (ЛЛ), то необходимо вырезать некоторый кусок избыточного материала, чтобы ликвидировать обнаруженное несоответствие проекций; в этом случае осуществляется переход к блоку 4.

4 блок. Построение куска лишнего материала (КЛМ).

После этого блок 1 строит пространственное описание заготовки, из которой вырезан этот кусок, а блок 2 определяет ее новые проекции. Затем опять сравниваются проекции заготовки и исходного чертежа. И так до тех пор, пока эти проекции не совпадают.

Алгоритм, предложенный в работах Х.И. Тани, предусматривал ряд ограничений на входную информацию, основные из которых:

- класс тел – многогранники;
- чертеж имеет только одно решение;
- чертеж состоит только из 3 проекций;
- отсутствие ложных геометрических элементов.

Следующий метод – согласованного обхода контуров [44] – позволил добавить к классу многогранников еще и тела вращения, составленные из цилиндрических ступенек.

Но следует заметить, что задача, решаемая Тани, отличается от классической задачи "автоматического чтения чертежа", так как наряду с проекциями объекта в качестве исходной информации для основного алгоритма используются проекции "заготовки". Их сравнение происходит на уровне $2D \leftrightarrow 2D$, т.е. нарушена общая постановка задачи: $2D \leftrightarrow 3D$.

В работах В.А. Щеколдина [45, 46] представлено дальнейшее развитие предложенного подхода, сняты некоторые ограничения (число проекций от 2 до 6, добавлена обработка сечений и разрезов, класс тел расширен до цилиндрических, конических и тел вращения с произвольной формой меридиана).

К сожалению, практической реализации данного метода найти не удалось, алгоритм приведен на уровне идей и не подтвержден значимыми примерами. Следует, однако, заметить, что данный подход представля-

ется перспективным и отличается от общепринятого подхода, речь о котором пойдет ниже.

Идеи Щеколдина были впоследствии развиты и дополнены в работах М.И. Лиогонького [57]. Его методы интересны тем, что в них рассматривается возможность использования как входной информации сечений и разрезов в дополнение к основным видам.

Подход, предложенный И.И. Котовым, В.С. Полозовым и Л.В. Широковой в книге «Алгоритмы машинной графики» в 1977 г. [12], получил в дальнейшем развитие в одно и то же время как у нас в стране, так и за рубежом. Следует заметить, что алгоритм Полозова охватывает всю проблему целиком и предлагает решение в общем виде, на основе эвристического подхода. Общая схема алгоритма следующая:

- 1 шаг. Формирование массива координат 3D вершин по проекциям.
- 2 шаг. Формирование матрицы смежности вершин.
- 3 шаг. Формирование циклов, принадлежащих одной плоскости.
- 4 шаг. Формирование матрицы инцидентности ребер циклам.
- 5 шаг. Исследование содержания циклов.
- 6 шаг. Построение анализирующих сечений.
- 7 шаг. Удаление ложных вершин и ребер.

Кроме того, в случае необходимости предусматривается использование алгоритма узнавания оригинала по его проекциям. Этим реализуется эвристическое утверждение, что «... в процессе чтения чертежа присутствуют тесно переплетающиеся между собой узнавание объекта по его проекциям и геометрический анализ формы и положения объекта по чертежу» [12].

Шаг 1 и Шаг 2 алгоритма В.С. Полозова основан на следующем утверждении: «Две точки в 3D пространстве соединены (смежны) между собой, когда соединены (смежны) между собой все три их соответствующие проекции (горизонтальная, профильная и фронтальная) на поле многовидового технического чертежа».

Приведенное утверждение не накладывает ограничений на тип соединяющих линий (основная, тонкая, штрихпунктирная, видимая или невидимая и пр.) и порядок уравнений линий (первого и более высоких порядков).

Данный метод предназначен для многогранников с той оговоркой, что любая форма может быть аппроксимирована многогранником.

Метод реализован практически и лежит в основе системы моделирования КИТЕЖ [21, 22].

Программная реализация и экспериментальное исследование алгоритма В.С. Полозова [12] показало вычислительную неустойчивость шагов 5, 6 и 7 за счет использования в алгоритме процедур, основанных на использовании операций с вещественными числами, и подтвердило необходимость разработки других алгоритмов анализа ситуаций, построенных на операциях с целочисленной арифметикой, что в дальнейшем было реализовано В.А. Тюриной [58].

Эта особенность, а также ограничения программной реализации, не более 256 вершин и соответствующих линий в синтезируемой модели, обусловленных примененными методами и способами программной реализации, не позволили довести разработку до уровня промышленного использования.

Первой попыткой среди иностранных ученых сконструировать модели геометрических тел по проекциям была предпринята Idesawa в 1973 г. [59, 60]. Он использовал алгоритм,

состоящий из четырех основных шагов (общая схема которых совпадает с подходом Полозова, но лишь внешне), которые легли в основу всех последующих алгоритмов, разработанных его последователями.

1 шаг. Сформировать трёхмерные вершины из двумерных вершин.

2 шаг. Сформировать трёхмерные ребра из трёхмерных вершин.

3 шаг. Сформировать отсеки поверхностей из трёхмерных рёбер.

4 шаг. Собрать объект из отсеков поверхностей.

При таком подходе (называемом «снизу-вверх») могут быть сгенерированы ложные геометрические элементы. Под ложными элементами понимаются вершины, ребра и отсеки поверхностей, которые формально возникли в процессе синтеза объекта, но отсутствуют на его поверхности фактически. Idesawa предложил ряд критериев для удаления ложных элементов. Например, трёхмерная вершина, принадлежащая только одной поверхности, является ложной.

G. Lafue [61] добавил эвристическую процедуру для удаления ложных и отыскания истинных элементов. Этот подход имеет два недостатка. Во-первых, с помощью этого метода нельзя удалить все всевозможные ложные элементы, но можно удалить некоторые действительные элементы. Во-вторых, он требует, чтобы входные данные были заданы в предписанном формате. Например, вводится требование, чтобы двумерные входные линии вводились в таком порядке, что последовательность линий ограничивала бы поверхность.

Алгоритм работает только на многогранниках.

K. Preiss [63, 63] освободил входные данные от заранее заданного формата. Он предложил формировать видимые поверхности из многоугольников с ортогональных проекций. В

его работе утверждается, что могут быть сформированы и невидимые поверхности, используя для этого технику анализа сцены, но не дано описание этого метода.

Одна из интересных особенностей алгоритма – то, что эквивалентные 2D вершины сортируются по увеличению x , y или z координаты, в зависимости от рассматриваемого вида. Это приводит к уменьшению времени поиска.

Алгоритм состоит уже из пяти основных шагов. Первый – ввод данных. Второй – выделение циклов (замкнутых путей), которые проектируются в идентифицируемые грани. На третьем шаге для каждого замкнутого пути находится интерпретация в трех измерениях по определенной процедуре поиска. Четвертый шаг состоит в определении всех возможных интерпретаций для каждой штриховой 2D линии (т.е. учитывается тип линий на чертеже). На пятом шаге 3D грани и ребра, на основе информации четвертого шага, собираются в твердое тело. Предлагается использовать эту технику для анализа сцен при синтезе сборок из твердых тел. Детали алгоритма в работах [62, 63] не приводятся.

Алгоритм Haralick и Queeney [64] предназначен для многогранников и состоит из четырех основных шагов. На первом шаге определяется множество 3D точек, которые могут быть 3D вершинами объекта. На втором шаге определяется множество поверхностей, составляющих объект. На третьем шаге для каждой видимой поверхности определяется последовательность возможных 3D вершин, которые определяются анализом вида поверхности. На четвертом шаге выбранные отсеки поверхностей подгоняются к другим выбранным отсекам. Работа, описывающая алгоритм, содержит всего один простой пример работы алгоритма, как он работает на сложных примерах – не показано. Кроме того, алгоритм не позволяет

рассматривать случаи мультипликативных решений.

G. Markovsky и M.A. Wesly [65-67] решали проблему математическими, формальными способами, поэтому сумели преодолеть некоторые трудности, не разрешаемые в предыдущих работах. Их наиболее интересным результатом является метод сборки поверхностей. Его сущность заключается в том, что соединяющиеся поверхности, полученные в процессе анализа проекций, делят бесконечное пространство на подпространства. Далее рассматриваются все возможные комбинации этих подпространств. Те из них, которые дают проекции, соответствующие входным, являются образцами моделируемого объекта. Таким образом, их подход позволяет найти все возможные решения.

Все описанные выше методы касаются плоских многогранных объектов, чьи проекции содержат только прямые. Дальнейшие работы в этом направлении в основном касаются расширения подхода Markovsky и Wesly.

Woo и Hammer [68] рассматривают объекты из плоских и цилиндрических граней. Конструирование объекта состоит из трех шагов. На первом генерируются 3D рёбра, прямые и круговые. На втором происходит конструирование граней по созданным рёбрам. Третий шаг – сборка граней, которые физически соответствуют объекту и удовлетворяют входным проекциям. Это приводит к неоднозначным решениям.

Алгоритм Adelfeld [69, 70] также допускает во входных данных прямые линии и дуги. Метод поиска решений в основном базируется на обнаружении частей, состоящих из нескольких элементарных объектов, и распознавании их по специфическим областям на проекциях. Однако, в некоторых случаях список распознанных объектов может включать в себя составные объекты, дающие двойственность в

различных композициях областей. В этих случаях алгоритм работает неверно.

Другая особенность алгоритма B. Adelfeld в том, что составные элементарные объекты должны быть выпуклыми по форме. Это ограничение приводит к строгим требованиям к генерируемым объектам. Предназначенный для плоских и цилиндрических поверхностей, алгоритм дает только единственные решения. Кроме того, существенным ограничением является требование параллельности осей цилиндров одной из трех проекционных плоскостей.

H. Sakurai и D.C. Gossard [71] оперируют с плоскими, цилиндрическими, сферическими, коническими и тороидальными поверхностями. Алгоритм является расширением алгоритма Markovsky и Wesly. Сняты ограничения на порядок и направление линий и дуг на каждом из входных видов. Вводятся некоторые ограничения, например, что оси поверхностей должны быть параллельны одной из координатных осей. В работе Sakurai и Gossard продемонстрирована работа алгоритма на ряде инженерных объектов.

В работе H. Yoshura, K. Fujimura, T.L.Kunii [72] также декларируется возможность использования цилиндрических, сферических, конических и тороидальных поверхностей. Используется метод «снизу-вверх» с применением «естественного языка чертежа». Сведений о возможности мультипликативных решений, а также реальных примеров сгенерированных тел не приводится. Алгоритм разработан, но не реализован практически.

В работе Remi Lequette [73] представлен алгоритм, позволяющий построить все возможные тела по 2 или 3 двумерным видам. Тела могут быть ограничены плоскими, цилиндрическими, коническими и тороидальными поверхностями. Оси криволиней-

ных поверхностей должны быть параллельны направлениям проецирования. Сначала алгоритм строит промежуточную каркасную модель, затем с помощью эвристик находятся касательные ребра, которые обычно не указываются на чертеже, и добавляются в каркас. Затем на его основе строятся грани, из которых конструируется твердое тело. Алгоритм представляет собой расширение метода Sakurai и Gossard. Разница заключается в методе формирования касательных ребер, которые Sakurai находит из особенностей проекций, а Lequette непосредственно на поверхностях, а также в методе выделения сферических и тороидальных поверхностей: Sakurai находит их по проекциям, а Lequette – из анализа ребер. Различается также способ конечной генерации объекта. Sakurai применяет способ проверки различных комбинаций возможных частей объекта, а Lequette предлагает способ «ориентации граней поодиночке».

В работе А. Kargas, Р. Cooley, Т. Н. Е. Richards [74] разработана теоретиче-

ская основа для алгоритмов конструктивной твердой геометрии для (CSG – Constructive Solid Geometry). Рассмотрены вопросы преобразования данных с ортогональных видов в трехмерные представления. Класс тел ограничен призматическими телами, но предложен метод аппроксимации моделей для обобщения подхода.

Предусмотрена роль оператора в процессе генерации моделей, см. рис.2. Данная схема применима и для других методов, предполагающих интерактивный подход.

В работах С.И. Роткова и А.А. Зудина [10, 18, 28, 29-32, 38] разработаны и реализованы алгоритмы восстановления трехмерных образов объектов по трем ортогональным проекциям, включающим невидимые линии. Допускаются прямые линии и дуги окружностей. Возможно восстановление объектов, ограниченных плоскими, цилиндрическими, коническими, сферическими, тороидальными поверхностями.

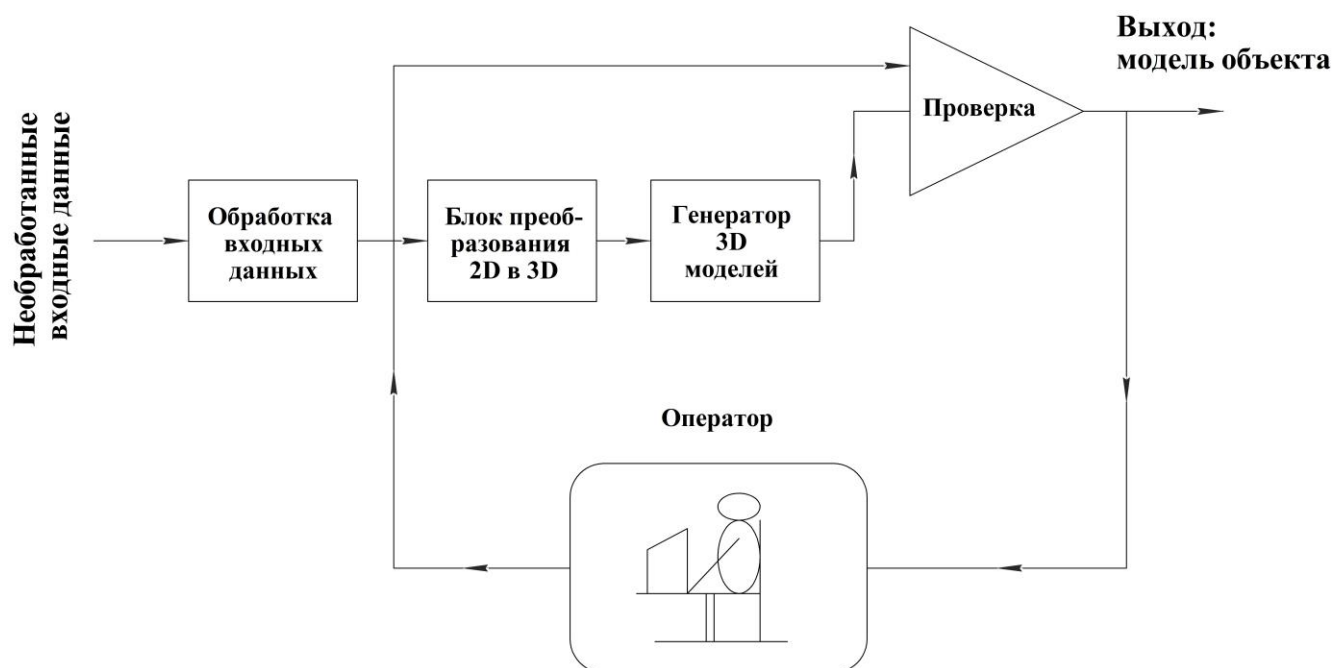


Рис. 2. Схема работы с данными в процессе генерации тел по проекциям [71]

В работах С.И. Роткова и В.А. Тюриной [37, 41, 75, 76] предложен метод преобразования каркасной модели трехмерного объекта в граничную на основе построения фундаментальной системы циклов графа, описывающего каркасную модель. За счет использования для преобразования только топологической информации метод позволяет выделять грани независимо от принадлежности к определенному типу поверхностей. Задача определения поверхностей выделяется в отдельную подзадачу.

В работах Hanmin Lee, Soonhung Han [77] используются методы CSG и анализ 2 или 3 ортогональных видов дает единственное решение, но только на классе объектов, ограниченных плоскостями и цилиндрическими поверхностями.

В работах Z.Wang и M.Latif [78] для анализа ортогональных проекций объекта предлагается использовать методы нечеткой логики. Алгоритм, предложенный данными авторами, позволяет получать единственное решение для призматических тел и тел вращения. Отметим также, что данная работа интересна применением математического аппарата теории нечетких множеств, которая подводит теоретический базис под предложенный В.С. Полозовым метод эвристического моделирования.

В работах R.Furferi, L.Governi, M.Palai и Y.Volpe [79] анализируются 3 ортогональных вида с невидимыми линиями и на основе В-гер-представления возможно восстановление единственного объекта с плоскими гранями, т.е. из очень узкого класса 3D объектов.

В работах А.А. Захарова [80] на основе В-гер-представления и алгоритмов распознавания конструктивных элементов на чертеже, добавленным к известным ранее методам, основанным на алгоритмах Markovsky и Wesley, описывается возможность восстановления моделей тел, ограниченных поверхностями второго порядка.

Подход, расширяющий алгоритм Markovsky и Wesley за счет анализа невидимых линий предложен в работе А.А. Никанорова [81].

В таблице 1 приведены обобщенные сведения об известных методах преобразования 2D в 3D, входных требованиях алгоритмов, имеющих ограничения на тип рассматриваемых объектов и т.д.

Данная таблица является расширением таблицы, приведенной в работе I.V. Nagendra [82] и в дальнейшем дополняемой в обзорных исследованиях, например, в работе В.А. Тюриной [58]. Авторам не удалось найти данных о текущем состоянии программных разработок по реализации рассматриваемых алгоритмов и систем.

С помощью представленной ниже таблицы можно проследить хронологию разработки различных методов синтеза объектов по чертежам, процесса расширения классов возможных для синтеза объектов и обобщить достоинства и недостатки представленных методов.

Для большей наглядности на рис.3 показано дерево решений задачи синтеза, позволяющее представить пути дальнейшего развития данного научного направления. Наиболее развитая ветвь выделена утолщенными линиями.

Следует заметить, что выделение и объединение наиболее ценных идей из всех рассмотренных методов представляется логичным и перспективным подходом к проблеме.

Отметим также тот факт, что ни в одной из рассматриваемых публикаций, посвященных решению задачи генерации 3D модели объекта по ортогональным проекциям, совершенно не затрагивается технологическая проблема ввода данных о чертеже, за исключением работ С.И. Роткова и А.А. Зудина [21, 22, 28, 32], в которой был предусмотрен простейший графический редактор 2D проекций, интегрированный с программой ОБРАЗ, синтезирующий модель 3D.

Проблема ввода данных с чертежа может быть решена различными способами, в частности, сканированием бумажного носителя с последующим преобразованием «растр-вектор». При этом возникает задача проверки достоверно-

сти исходных данных в связи с тем, что на бумажном носителе могут быть различные неточности, допустимые при ручной технологии создания чертежно-конструкторской документации, например, несовпадение значения проставленного размерного числа с истинной длиной вводимой линии.

Достоверность введенной информации о чертеже является краеугольным камнем для устойчивой работы любого алгоритма и программной реализации обратной задачи компьютерной геометрии и графики – синтеза 3D модели по проекционным изображениям.

Таблица 1

Автор	Год	Тип поверхно- стей	Число решений	Входные требования	Метод синтеза
В.С. Полозов	1965- 1977	Плоскости	Единств.	Линии	«Снизу-вверх»
Х.И. Тани	1966	Плоскости	Единств.	Линии	Обход контуров
В.А. Щеколдин	1969	Плоские, цилиндрические	Множество	Линии	Удаление лишних ча- стей из заготовки
М. Idesawa	1973	Плоскости	Единств	Линии	«Снизу-вверх»
G. Lafue	1976	Плоскости	Единств	Грани и искусственные ли- нии при задании отверстий	«Снизу-вверх»
T.C. Woo, J.M. Hammer	1977	Плоские и цилиндрич.	Единств	Линии	«Снизу-вверх»
K. Preiss	1981	Плоскости	Единств	Линии	Смесь «Снизу- вверх» поиск граней
G. Markowsky, M.A. Wesley	1981	Плоскости	Множество	Линии	«Снизу-вверх»
R.M. Haralick, D. Queeney	1982	Плоскости	Единств	Линии	Смесь «снизу-вверх» и интерпретация граней
B. Adelfeld	1983	Плоские и ци- линдр.	Единств	Линии	Распознавание элем. объектов по входным данным и их комбини- рование, CSG
H. Sakurai, D.C. Gossard	1983	Плоские, цилиндрич., конич., сферич., тороидальные	Множество	Линии	«Снизу-вверх»
B. Al de eefeld	1984	Плоские и ци- линдр.	Единств	Линии и осевые	Прикладная процедура пользователя, затем как *
K. Preiss	1984	Плоские и ци- линдр.	Единств	Линии	Смесь «Снизу-вверх» поиск граней
М.И. Лиогонький	1984	Плоскости	Множество	Линии	Смесь «снизу-вверх» и поиск граней

H. Yoshura, K.Fujimura, T.L.Kunii	1984	Плоские, цилиндрич., конич., сферич., тороидальные	Нет инф.	Линии и некоторые прави- ла	Естественный язык и «Снизу-вверх»
A. Kargas, P. Cooley, T.H.E.Richards	1988	Призматические тела	Множество	Линии	Методы CSG (распо- знавание тел)
Remi Lequette	1988	Плоские, цилиндрич., конич., сферич., тороидальные	Множество	Линии	«Снизу-вверх» плюс ориентация граней
С.И Ротков, А.Зудин	1995	Плоские, цилиндрич., ко- нич., сферич., то- роидальные	Множество	Линии	Смесь «снизу-вверх» и поиск граней
С.И Ротков, В.А. Тюрина	2003	Плоскости, поверхности 2 порядка	Множество	Псевдо-каркасная модель	Поиск и построение граней
Hanmin Lee, Soonhung Han	2005	Плоскости, цилиндрические поверхности	Единств.	2 или 3 ортогональных вида	Методы CSG
Z.Wang, M.Latif	2007	Призматические тела и тела вращения	Единств.	3 ортогональных вида, до- пускаются отрезки и дуги окружности	«Снизу-вверх» с при- менением методов не- чёткой логики
R.Furferi, L.Governi, M.Palai, Y.Volpe	2010	Плоскости	Единств.	3 ортогональных вида с не- видимыми линиями	В-гер-представление
А.А. Захаров	2010	Плоскости, поверхности 2 порядка	Нет инф.	Линии (отрезки и дуги окружностей)	В-гер- представление плюс распознавание конструктивных эле- ментов
А.А. Никаноров	2014	Плоскости	Множество	с невидимыми линиями	Алгоритм «Markowsky- Wesley» с анализом не- видимых ребер

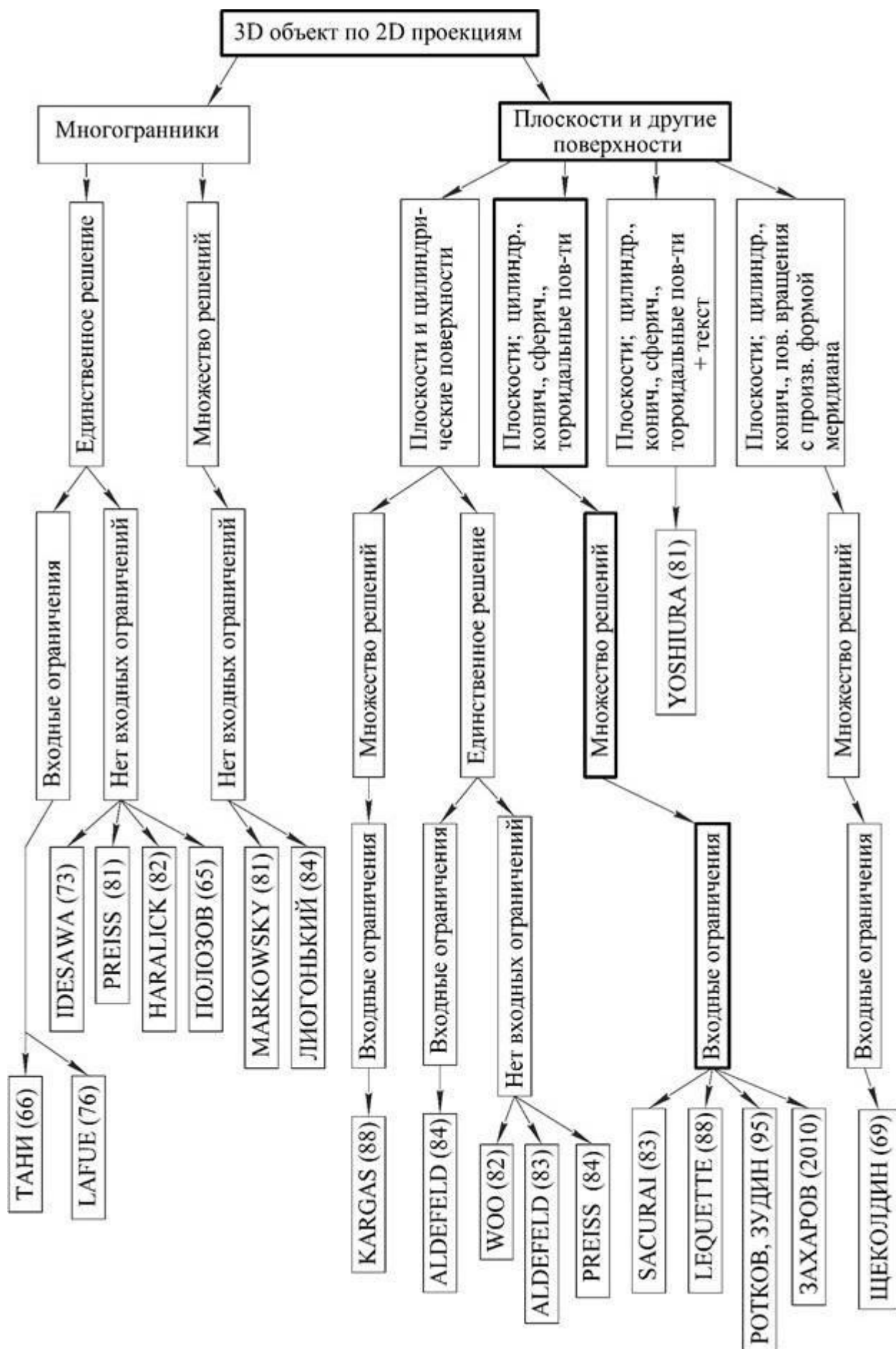


Рис. 3. Дерево решений задачи

Анализируя имеющиеся подходы к решению задачи синтеза, можно сделать вывод, что наибольших успехов различные авторы достигли с помощью подхода «снизу-вверх», в совокупности с некоторыми эвристическими методами.

Выводы

Проблема синтеза 3D модели геометрического объекта по его изображениям является весьма актуальной в условиях развития различных информационных технологий, как традиционных (CAD, CAM, CAE, PDM, PLM и т.п.), так и новых (аддитивные), использующих 3D модель для решения различных научных, технических и технологических задач.

Вместе с тем надо отметить имеющиеся противоречия между старой, ручной, подготовкой чертежно-конструкторской документации и проблемой ввода геометро-графических данных, и функциональными возможностями современных программных систем, реализующих информационные технологии.

Также надо отметить и тот факт, что на предприятиях различных отраслей промышленности за много лет накопились значительные объемы архивов чертежно-конструкторской документации на бумажном носителе, без ввода данных с которых невозможно полноценное использование современных технологий.

Обсуждаемая в аналитическом материале проблема синтеза 3D модели по проекционным изображениям до конца не решена ни в алгоритмическом, ни в практическом аспекте в виде устойчиво работающего промышленного программного продукта, и в силу этих обстоятельств любой вариант решения этой трудно формализуемой обратной задачи геометрии и графики является актуальным и представляет научную значимость. Как отмечал академик Н.Ф. Четверухин, еще никто не доказал, что обратная задача геометрии и графики может быть решена в общем виде, но никто и не доказал обратного.

Имеющиеся в различных системах функциональные операторы геометрического моделирования не покрывают всего многообразия ситуаций, возникающих в реальном проектировании, и вынуждают пользователя работать в ограниченных условиях, в том числе, ввода данных сразу в 3D пространстве, что противоречит методам и алгоритмам решения различных геометрических и графических задач.

Анализ литературных данных показывает, что во многих странах мира сохраняется устойчивый интерес к решению описываемой задачи синтеза 3D модели по его проекционным изображениям, несмотря на трудности практической реализации решения этой проблемы.

Литература

1. Андреев С.В., Бондарев А.Е., Бондаренко А.В., Визильтер Ю.В., Галактионов В.А., Гудков А.В., Желтов С.Ю., Жуков В.Т., Иловайская Е.Б., Князь В.А., Мануковский К.В., Новикова Н.Д., Ососков М.В., Силаев Н.Ж., Федоритова О.Б., Бондарева Н.А. Моделирование и визуализация работы узла лопастей сложной формы в энергетической установке. // Журнал «Научная визуализация», 2015, т.7, №4, стр.1-12
2. Андреев С.В., Бондарев А.Е., Бондаренко А.В., Визильтер Ю.В., Галактионов В.А., Гудков А.В., Желтов С.Ю., Жуков В.Т., Иловайская Е.Б., Князь В.А., Мануковский К.В., Новикова Н.Д., Ососков М.В., Силаев Н.Ж., Федоритова О.Б. Поиск оптимальной формы узла лопастей энергоустановки // Труды 26-ой Международной конференции по компьютерной графике и визуализации GraphiCon 2016, Нижний Новгород, ННГАСУ, 2016, стр. 121-125
3. Клишин, В.В. Моделирование трёхмерных объектов на основе объёмных базовых элементов формы: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. /В.В.Клишин. – М., МЭИ, 1983. – 22 с.

4. Фоли, Дж. Основы интерактивной машинной графики. / Дж. Фоли, А.Вэн Дэм. – В 2-х т. – М.: Мир, 1985. – т.1. – 368 с., т.2. – 368 с.
5. Гельмерих, Р. Введение в автоматизированное проектирование / Р. Гельмерих, П. Швиндт. – Пер. с нем. – М.: Машиностроение, 1990. – 176 с.
6. Давыдов, А.Н. CALS-технологии или информационная поддержка жизненного цикла продукта / А.Н. Давыдов, В.В. Барабанов, Е.В. Судов, В.Г. Подколотин // Проблемы продвижения продукции и технологий на внешний рынок: Сб. материалов 4-ой Международной конференции. – М., 1998. – С. 27 – 32.
7. Давыдов, А.Н. Актуальность разработки и реализации CALS-технологий в отечественной промышленности / А.Н. Давыдов, В.В. Барабанов, В.В. Сало, В.Н. Везров // Проблемы продвижения продукции и технологий на внешний рынок: Сборник, спец. выпуск. – М., 1997. – С. 3 – 7.
8. Глушков, В.М. Основы безбумажной информатики / В.М. Глушков. – М.: Наука, 1982. – 552 с.
9. ГОСТ 2.052-2015 Электронная модель изделия.
10. Ротков, С.И. Средства геометрического моделирования и компьютерной графики пространственных объектов для CALS-технологий: Дис. докт. техн. наук: 05.01.01 / С.И. Ротков. – Н. Новгород, 1999. – 287 с.
11. Попов, Е.В. Метод натянутых сеток в задачах геометрического моделирования: Автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.01.01 / Е.В. Попов – Н. Новгород, 2001. – 45 с.]
12. Котов, И.И. Алгоритмы машинной графики / И.И. Котов, В.С.Полозов, Л.В. Широкова. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
13. Кучуганов, В.Н. Автоматический анализ машиностроительных чертежей / В.Н. Кучуганов. – Иркутск: Изд-во Иркутск. Ун-та, 1985. – 112 с.
14. Полозов, В.С. Моделирование и синтез операторов геометрического расчета и машинной графики в системах автоматизированного проектирования и автоматизации технологической подготовки производства: Автореф. дис. ... докт. тех. наук: 05.01.01. / В.С. Полозов. – М.: МАИ, 1983. – 41 с.
15. Ротков, С.И. Анализ некоторых систем геометрии и графики пространственных объектов / С.И. Ротков // Проблемы информационных систем: сб.ст. – М.: МЦНТИ, 1988. – № 5.
16. Первикова, В.Н. Основы обратимых отображений линейных пространств в применении к чертежам многомерных фигур. / В.Н. Первикова. // Вопросы прикладной геометрии: Сб. статей аспирантов и соискателей. – М.: МАИ, 1965.
17. Ротков, С.И. Интеграция 2D и 3D систем геометрии и графики / С.И. Ротков // Сб. трудов междунар. конф. "Графикон-93", С. Петербург, 1993.
18. Ротков, С.И. Синтез моделей пространственных объектов по многовидовому чертежу / С.И. Ротков // Сб. трудов 4-ой международной конференции по компьютерной графике и визуализации Графикон-94, Н. Новгород, 1994. – С. 37 – 39.
19. Рубен Боргоньен: Учимся 3D-моделированию вместе с Solid Edge: пер. с англ. Общества с ограниченной ответственностью «Сименс Индастри Софтвер». – М.: ДМК Пресс, 2012. – 594 с.: ил.
20. Осипов В.А. Машинные методы проектирования непрерывно-каркасных поверхностей. М., Машиностроение, 1979 г., 245 стр.
21. Аристова, Е.В. КИТЕЖ – система геометрии и графики пространственных объектов / Е.В. Аристова, А.А. Зудин, С.В. Митин, С.И. Ротков, В.П. Шубин // Сб. тезисов 5-ой Всесоюзной конференции по проблемам машинной графики. – Новосибирск, 1989.
22. Аристова, Е.В. Система геометрического моделирования пространственных объектов КИТЕЖ / Е.В. Аристова, А.А. Зудин, С.Е. Лабутич, С.В. Митин, С.И. Ротков, В.П. Шубин // Сб. трудов 4-ой Междунар. конф.

- по комп. графике и визуализации ГРАФИКОН-94. – Н. Новгород. – 1994. – С. 72 – 74.
23. Полозов, В.С. Геометрические и графические задачи: Автоматизированное проектирование / В.С. Полозов, О.А. Будеков, С.И. Ротков, Л.В. Широкова. – М.: Машиностроение, 1983. – 280 с.
 24. EUCLID. Technical Report. MATRA Datavision, France, 1988.–2000.
 25. Кучуганов, В.Н. Автоматический анализ деталей в САПР / В.Н. Кучуганов, А.А. Чистяков, В.Н. Захаров // Математическое обеспечение систем с машинной графикой: Материалы Всесоюзн. научн.-техн. семинара. – Ижевск, 1979. – С. 22 – 25.
 26. Кучуганов, В.Н. Анализ форм деталей в задачах САПР / В.Н. Кучуганов. – М.: ВИНТИ. – ДР 1539, 1981. – 175 с.
 27. Кучуганов, В.Н. Методология и инструментальные средства синтеза сценариев графического инженерного диалога и объектно-ориентированных САПР: Автореферат дис. докт. техн. наук: 05.13.12 / В.Н. Кучуганов. – Ижевск: ИМИ, 1993, 43 с.
 28. Зудин, А.А. Моделирование пространственных объектов с криволинейными поверхностями методом чтения чертежа / А.А. Зудин, С.И. Ротков // Сб. докл. Всесоюзного научно-технического семинара «Машинная графика и автоматизация проектирования в радиоэлектронике» – Челябинск, 1990.
 29. Зудин, А.А. Графические диалоговые средства построения конечно-элементных сеток в системе «КИТЕЖ» / А.А. Зудин, С.И. Ротков // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Численное моделирование физико-механических процессов: Сборник ст. – Горький, 1988.
 30. Зудин, А.А. Диалоговый синтез моделей пространственных объектов / А.А. Зудин, С.И. Ротков: Сб. тез. 4-ой Всесоюзной конференции по проблемам машинной графики. – Протвино, 1987.
 31. Зудин, А.А. К автоматизации расчета типовых элементов конструкций в трехмерной постановке. Численная реализация физико-механических задач прочности / А.А. Зудин, С.В. Ладилов, В.А. Пахомов, С.И. Ротков // Тез. докл. Всесоюзной конференции. – Горький, 1987. – с. 102 – 103.
 32. Зудин, А.А. Новая технология геометрического моделирования твердых тел / А.А. Зудин, С.И. Ротков // Сб. тезисов Междунар. конф. «VAI-91». – Новосибирск, 1991.
 33. Балабан, О.М. Интерфейс 2D-3D в графических системах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.01.01. / О.М. Балабан. – Н. Новгород, 1995. – 21 с.
 34. Распознавание деталей и фрагментов общемашиностроительного применения: Тез докл. Всесоюзн. конф. "Методы и средства обработки сложноструктурированной семантически насыщенной графической информации". – Горький, 1983. – С. 74.
 35. Полозов, В.С. Алгоритмическое описание некоторых конструкторских задач для решения их с помощью ЭЦВМ / В.С. Полозов // Использование математических методов и электр.-вычислит. техники в машиностроении: Труды ПТИНИИ ВВСНХ. – Горький, 1965.– Выпуск 2 (9). – С. 57 – 69.
 36. Полозов, В.С. К вопросу о способе построения технического чертежа / В.С. Полозов // Вопросы психологии (АПН РСФСР). – 1962. – №26.
 37. Тюрина, В.А. Информационная модель каркаса трёхмерного геометрического объекта для задачи синтеза 3D объекта по ортогональным проекциям / В.А. Тюрина, С.И. Ротков // Начертательная геометрия, инженерная и компьютерная графика: Сборник статей. – Н. Новгород, 1999. – Вып.4. – С. 149 – 156.
 38. Зудин, А.А. Использование системы «КИТЕЖ» для моделирования пространственных объектов сложных технических форм и структур / А.А. Зудин, С.В. Митин, С.И. Ротков, В.П. Шубин // Тез. докл. Всесоюзного

- научно-технического семинара «Опыт разработки и внедрения САПР объектов химического и нефтяного машиностроения». – М.: Наука, 1988.
39. Иванов, А.А. Параллельный процесс контроля геометрических построений в чертежно-конструкторских редакторах / А.А. Иванов, С.И. Ротков // Начертательная геометрия, инженерная и компьютерная графика: Международный межвузовский сборник трудов кафедр графических дисциплин. – Вып. 4. – Н. Новгород, 1999. – С. 201 – 207.
40. Иванов, А.А. Сравнение форматов графического обмена в чертежных системах / А.А. Иванов, С.И. Ротков // Сб. трудов 4-ой Международной конференции по компьютерной графике и визуализации ГРАФИКОН-94 – Н. Новгород, 1994. – С. 74 – 86.
41. Тюрина, В.А. Нахождение множества ложных геометрических элементов каркасной модели 3D объекта, восстановленной по трём неоднозначно читаемым ортогональным проекциям / В.А. Тюрина // Сб. тр. междунар. научн. конф. по комп. графике и анимации “Графикон-2002”. – Н. Новгород, 2002. – т.2. – С. 112 – 116.
42. Тани, Х.И. Автоматическое чтение геометрического рисунка машиностроительных чертежей / Х.И. Тани // Тез. докл. научн.-техн. конф. по механизации и автоматизации инженерного и управленческого труда в промышленности. – Киев, 1967.
43. Тани, Х.И. Алгоритм построения пространственного описания тела, заданного проекциями / Х.И. Тани // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1966. – № 6.
44. Тани, Х.И. Ввод чертежей и синтез пространственного образа тел в ЦВМ: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Х.И. Тани. – Минск, 1968. – 23 с.
45. Щеколдин, В.А. Итерационный метод построения пространственного описания тела, заданного своими проекциями / В.А. Щеколдин // Вычислительная техника в машиностроении: Сб. ст. – Минск. – ИТК АН БССР, 1969.
46. Щеколдин, В.А. Построение на ЭВМ пространственного описания многогранного тела по описаниям его проекций / В.А. Щеколдин // Вычислительная техника в машиностроении: Сб. ст. – Минск. – ИТК АН БССР, 1968.
47. Надь, Г. Распознавание образов (обзор): Труды ИИЭР / Г. Надь. – М.: ИИЭР, 1968. – т. 56. – № 5. – С. 334 – 361.
48. Полозов, В.С. Эвристическое моделирование. Управляющие системы и машины / В.С. Полозов. – К.: 1981. – № 3. – С. 7 – 11.
49. Апресян, Ю.Д. Лексическая семантика. Семиотические средства языка / Ю.Д. Апресян. М.: Наука, 1974. – 366 с.
50. Гладкий, А.В. Формальные грамматики и языки / А.В. Гладкий. – М.: Наука, 1973. – 368 с.
51. Ершов, А.П. Человек и машина / А.П. Ершов. М.: Знание, 1985. – 21 с.
52. Уинстон, П. Искусственный интеллект: Пер. с англ. / П. Уинстон. – М.: Машиностроение, 1991. – 560 с.
53. Толковый словарь по вычислительным системам / под ред. В. Иллингурта и др.: Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1991. – 560 с.
54. Митин, С.В. Информационная связь изображений в проекционной машинной графике / С.В. Митин, В.С. Полозов, С.И. Ротков // Методы и средства обработки графической информации: Сб. ст. – Горький, 1986.
55. Sutherland, I.E. SCETCHPAD: A Man-Machine Graphical Communication System / I.E. Sutherland. – Proc. SJCC 23, 1963. – P. 329.
56. Thornton, R.W. Interactive Modelling in Three Dimensions through Two-Dimensional Windows / R.W. Thornton // Third International Conference and Exhibition on Computer in Engineering and Building Design, 1978.
57. Лиогонький, М.И. К проблеме автоматизации процесса формирования чертежа пространственного объекта. Алгоритм восстановления простран-

- ственного описания по чертежу // М.И. Лиогонький // Автоматизация обработки сложной графической информации: Межвузовский сб. – Горький, 1984. – С. 44 – 59.
58. Тюрина, В.А. Разработка методов преобразований каркасной модели в задаче синтеза образа 3D-объекта по его проекциям: Дисс. канд. техн. наук: 05.01.01 / В.А. Тюрина. – Н. Новгород, 2003. – 170 с.
 59. Idesawa, M. A Automatic Input of Line Drawing and Generation of Solid Figure from Three-View Data / M.A. Idesawa, T. Soma, E. Goto, S. Shibata // Proceedings of the International Joint Computer Symposium, 1975. – P. 304 – 311.
 60. Idesawa, M. A System to Generate a Solid Figure from a Three View / M.A. Idesawa, Bull. JSME 16. – February, 1973. – P. 216 – 225.
 61. Lafue, G. Recognition of Three Dimensional Objects from Views / G. Lafue // Computer Graphics. – 1976. – Vol. 10, № 2.
 62. Preiss, K. Constructing the 3-D Representation of a Plane-Faced Object from a Digitized Engineering Drawings / K. Preiss // Fifth International Conference and Exhibition on Computer in Engineering and Building Design, 1980.
 63. 63. Preiss, K. Constructing the Solid representation from engineering projections / K. Preiss // Computer & Graphics. – 1984. – Vol. 8, № 4. – P. 381 – 389.
 64. Haralick, R.M. Understanding engineering drawings / R.M. Haralick, D. Queeney // Comp. Graphics and Image Processing. – 1982. – Vol.20, № 3. – P. 244 – 258.
 65. 65. Markowsky G. Fleshing out projections / G.Markowsky, M.A. Wesley // IBM J. Res& Develop. November, 1981. – Vol. 25, № 6. – P. 934 – 954.
 66. Markowsky, G. Fleshing out wire frames / G. Markowsky, M.A. Wesley // IBM J. Res.& Develop. – sept. 1980. – Vol. 24, № 5. – P. 582 – 587.
 67. Markowsky, G. Generation of solid models from two-dimensional and three- dimensional data / G. Markowsky, M.A. Wesley // in Pickett, MS and Boyse, J M (eds). Solid modelling by computer: from theory to application: Plenum, 1986. – P. 23 – 51.
 68. Woo, T.C. Recognition of Three Dimensional designs from orthographic projections / T.C. Woo, J.M. Hammer // Proc. 9th CIRP Conference: Cranfield Institute of Technology, Cranfield, England, 1977. – P.247 – 255.
 69. Aldefeld, B. On automatic recognition of 3D structures from 2D representations / B. Aldefeld // Computer-Aided Design. – 1983. – Vol. 15, № 2. – P. 59 – 64.
 70. Aldefeld, B. Semiautomatic three-dimensional interpretation of line drawings / B. Aldefeld, H. Richter // Comp.& Graphics. – 1984. – Vol. 8, № 4. – P. 371 – 380.
 71. Sakurai, H. Solid Model Input Through Orthographic Views / H. Sakurai, D.C.Gossard // Computer Graphics. – 1983. – Vol.17, №3. – P. 243 – 252.
 72. Yoshiura, H. Top-down construction of 3-D mechanical object shapes from engineering drawings / H. Yoshiura, K. Fujimura, T.L.Kunii // IEEE Comp. Magazine, dec. 1984. – P. 32 – 40.
 73. Lequette, R. Automatic construction of curvilinear solids from wire frame views / R. Lequette // France. – 1988. – Vol.20, №4. – P.171–178
 74. Kargas, A. Interpretation of engineering drawings as solid models / A. Kargas, P. Cooley, T.H.E. Richards // Computer-Aided Engineering Journal. – april 1988. – P. 67 – 78.
 75. Ротков, С.И. Преобразование каркасной модели трёхмерного геометрического объекта в конструктивную модель / С.И. Ротков, В.А. Тюрина // Труды 6-й Междунар. конф. по комп. графике и визуализации Графикон-96. – С.-Петербург, 1996. – С. 56 – 58.
 76. Тюрина, В.А. Алгоритм проверки истинности каркаса в задаче преобразования каркасной модели пространственного объекта в граничную модель / В.А. Тюрина // Начертат. геометрия, инженерн. и компьютерн. графика: Материалы семинара-совещания зав. каф. начертат. гео-

метрии, инженерн. и компьютерн. графики вузов Центральной, Поволжской, Южной, Уральской и Северо-западной зон РФ. – Н.Новгород, 1997. – С.102 – 105.

77. Lee, H. & Han, S. (2005). Reconstruction of 3D interacting solids of revolution from 2D orthographic views. *Computer-Aided Design*, 37, 1388-1398.
78. Wang Z., Latif M. Reconstruction of 3D Solid Models Using Fuzzy Logic Recognition//*Proceedings of the World Congress on Engineering*. 2007. V. 1. pp. 37-42.
79. Governi L., Furferi R., Palai M., Volpe Y. 3D Geometry Reconstruction from Orthographic Views: a Method Based on 3D Image Processing and Data Fitting // *Computers in Industry*. 2013. № 64. P. 1290-1300.
80. Захаров А.А. Исследование алгоритмов формирования трехмерной модели по ортогональным видам// *Алгоритмы, методы и системы обработки данных: Сборник научных статей* – М.: ООО «Центр информационных технологий в природопользовании», 2010. – С. 4 – 9.
81. Никаноров, А.А. Разработка программы восстановления каркасных 3D-объектов по 2D-проекциям // *Альманах современной науки и образования*. Тамбов: Грамота, 2014. № 8. С. 117-128.
82. Nagendra, I.V. 3D Objects from 2D orthographic views – A Survey / I.V. Nagendra, U.G. Gujar // *Computer&Graphics*. – 1988. – Vol.12, №1. – P. 111 – 114.