

На правах рукописи



АФАНАСЬЕВ МАКСИМ ЯКОВЛЕВИЧ

**Разработка и исследование  
многоагентной системы для решения задач  
технологической подготовки производства**

Специальность 05.11.14 – Технология приборостроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (НИУ ИТМО)

*Научный руководитель:*

кандидат технических наук,  
доцент,

**Филиппов Александр Николаевич**

*Официальные оппоненты:*

доктор технических наук,  
профессор,

**Васильков Дмитрий Витальевич**

кандидат технических наук,  
доцент,

**Травин Александр Игоревич**

*Ведущая организация:*

Открытое акционерное общество  
«Светлана»

Защита состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.227.04 при НИУ ИТМО, расположенном по адресу: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, ауд. \_\_\_\_ .

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИУ ИТМО.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя учёного секретаря диссертационного совета.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 212.227.04,

кандидат технических наук, доцент



Кисилёв С. С.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы диссертации.** Всё возрастающая конкуренция на рынке подталкивает современные приборостроительные предприятия к постоянному улучшению и развитию производства. В настоящее время одним из наиболее перспективных способов достижения высокой конкурентоспособности является повышение эффективности технологической подготовки производства (ТПП) за счёт применения современных средств автоматизации. Особенно это актуально для предприятий, использующих передовые технические решения и технологии, требующие дополнительных инженерных изысканий.

Большой вклад в разработку базовых принципов построения и взаимодействия автоматизированных систем технологической подготовки производства (АСТПП) внесли С. П. Митрофанов, В. И. Аверченков, Г. К. Горанский, В. Д. Цветков, Н. М. Капустин, В. В. Павлов, В. М. Вальков, А. Н. Филиппов, Д. Д. Куликов, Б. С. Падун, Е. И. Яблочников и многие другие. Тем не менее, в условиях современного наукоёмкого производства многие из этих принципов нарушаются. В первую очередь это связано с отсутствием универсальной интеграционной среды, способной собрать воедино различные инструментальные средства автоматизации ТПП.

Решение данной проблемы наиболее целесообразно с применением методов распределённого искусственного интеллекта, базовой дисциплиной которого является теория интеллектуальных многоагентных систем (МАС). Применение МАС для решения задач технологической подготовки производства позволит создать открытую интеллектуальную среду интеграции технологических данных и знаний, построенную на простой единой модели расширения функциональности и горизонтального масштабирования всего информационного поля ТПП.

На сегодняшний день существует достаточное количество работ, посвящённых применению многоагентных систем в промышленности и производстве, но ни в одной из них не представлено детальное исследование рассматриваемой предметной области — технологической подготовки приборостроительного производства. На основе проводимого исследования необходимо подготовить методику, применение которой позволит повысить уровень автоматизации при решении задач технологической подготовки и увеличит структуризацию информационного поля современного приборостроительного предприятия.

Всё вышесказанное подтверждает актуальность проектирования и разработки многоагентной системы, являющейся единым интеграционным ядром автоматизированной среды технологической подготовки приборостроительного производства.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования является многоагентная система, ориентированная на интеллектуальную интеграцию средств автоматизации технологической подготовки производства. Многоагентная система представляет собой совокупность автономных модулей, единой сетевой среды и модели взаимодействия.

Предметом исследования являются модели и методы многоагентной интеграции, инструментальные средства, а также программное и аппаратное обеспечение, позволяющее построить многоагентную систему в рассматриваемой области.

**Цель диссертационной работы** состоит в исследовании и разработке многоагентной системы, являющейся единым интеграционным ядром информационно-управляющей платформы для решения задач технологической подготовки производства.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе потребовалось решить следующие **основные задачи**:

- Исследовать существующие методы построения распределённых одноранговых многоагентных систем, их архитектуры и области применения.
- Описать математические модели многоагентной среды и многоагентной системы, а также язык представления технологических данных и знаний, используемый агентами.
- Исследовать и разработать базовые методы взаимодействия агентов внутри многоагентной системы технологического назначения.
- Проанализировать основные инструментальные средства проектирования и разработки многоагентных систем.
- Разработать систему моделирования информационного поля технологической подготовки приборостроительного производства, базирующуюся на концепции «облачных вычислений».
- Разработать и программно реализовать модель многоагентной интеллектуальной интеграции автоматизированных систем технологической подготовки производства.

**Методы исследования.** Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались основные научные положения: технологии приборостроения, теории информационных систем, теории искусственного интеллекта, теории моделирования, теории множеств, абстрактной алгебры, теории формальных языков и грамматик, теории виртуального строкового пространства технологических данных, объектно-ориентированного и агент-ориентированного программирования; технологии «облачных» вычислений. Эффективность разработанных методов и средств проверялась опытным путём с помощью созданного распределённого виртуального испытательного стенда.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- Предложена методика структурной интеграции АСТПП в рамках единой информационно-управляющей платформы технологической подготовки производства, основанная на базовых принципах теории многоагентных систем и виртуального строкового пространства.
- Спроектирован и разработан распределённый виртуальный испытательный стенд для эмуляции информационного поля технологической подготовки приборостроительного производства.
- Разработана и программно реализована многоагентная система интеллектуальной интеграции автоматизированных систем технологической подготовки производства изделий из полимерных композиционных материалов.

**Практическая значимость и реализация результатов работы.**

Результаты исследований и разработанный комплекс методов и инструментальных средств нашли применение в:

- учебном процессе НИУ ИТМО на кафедре «Технологии приборостроения»;
- программном и организационно-техническом обеспечении научно-образовательного центра НИУ ИТМО кафедры «Технологии приборостроения»;
- НИР по государственному контракту № П571 от 05.09.08 на 3 года, заказчик Федеральное агентство по образованию/Министерство по образованию, тема «Разработка и реализация модели непрерывного повышения квалификации педагогических кадров российских технических вузов в системе „вуз–инжиниринговый центр–организация“»;
- НИОКР № 21083 от 15.12.10, заказчик ООО «Завод по переработке пластмасс имени „Комсомольской правды“», тема «Создание интегрированной распределённой системы проектирования, прототипирования и подготовки производства изделий»;
- НИР по государственному контракту № 310220 «Разработка базовых технологий проектирования и производства приборов нового поколения на основе полимерных композиционных материалов для реальных условий эксплуатации в авиационной, космической, морской и другой технике» по теме 2011-1.4-514-126-027.

**На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:**

- Модель многоагентной системы для решения задач интеллектуальной интеграции автоматизированных систем технологической подготовки производства в рамках единого информационного поля приборостроительного предприятия.

- Архитектура информационно-управляющей платформы технологической подготовки производства, включающая язык представления технологических данных и знаний, структуру агентов и протокол взаимодействия.
- Метод моделирования информационной среды приборостроительного предприятия, основанный на концепции «облачных вычислений».

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: VI Всероссийская межвузовская конференция молодых учёных (14–17 апреля 2009), Девятая сессия международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы надёжности и диагностики машин и механизмов» (26–30 октября 2009), XXXIX научная и учебно-методическая конференция Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики (2–5 февраля 2010), VII Всероссийская межвузовская конференция молодых учёных (20–23 апреля 2010), XL научная и учебно-методическая конференция национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (1–4 февраля 2011), VIII Всероссийская межвузовская конференция молодых учёных (12–15 апреля 2011), Десятая сессия международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы надёжности и диагностики машин и механизмов» (24–27 октября 2011).

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 8 печатных работах, из них 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК. Полный перечень работ приведён в конце автореферата.

**Личный вклад автора.** Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причём вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографии и 5 приложений. Общий объем диссертации 130 страниц, включая 24 иллюстрации и 1 таблицу. Библиография включает 91 наименование на 12 страницах.

## Содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** приводится анализ объекта исследования, включающий рассмотрение основных задач технологической подготовки производства, принципов проектирования автоматизированных средств, обеспечивающих информационную поддержку решения этих задач, и основных проблем, возникающих в процессе интеграции данных средств автоматизации в единое информационное поле приборостроительного предприятия.

На сегодняшний день большинство задач технологической подготовки производства могут быть решены с помощью специальных автоматизированных систем. Проведённые исследования показывают, что в условиях современного наукоёмкого производства практически невозможно создать единую автоматизированную систему технологической подготовки производства (АСТПП), охватывающую все стадии разработки технологического процесса (ТП) и соответствующую всем фундаментальным требованиям. Поэтому предприятия вынуждены использовать комплекс АСТПП, включающий в себя технологические модули, разработанные сотрудниками предприятия, а также коммерческие системы отечественного и зарубежного производства.

Для достижения максимального эффекта от использования АСТПП на предприятии необходимо создать унитарную информационно-управляющую платформу технологической подготовки производства (ИУП ТПП), являющуюся программно-аппаратным комплексом информационного сопровождения ТПП и реализующую интеллектуальную интеграцию технологических данных и знаний в рамках единого информационного поля.

Существует государственный стандарт (ГОСТ Р ИСО 10303–2002), регламентирующий единый механизм представления данных об изделии на протяжении всего жизненного цикла независимо от конкретной АСТПП, а также интеграцию этих данных. Но, как показывает практика, в процессе создания единого информационного поля ТПП данный стандарт *не используется, либо используется лишь частично*. Более того, большинство производителей коммерческих АСТПП (как отечественных, так и зарубежных), декларирующих возможность безболезненного взаимодействия своих систем с уже используемыми на предприятии, в большинстве своём также игнорируют данный стандарт.

Можно выделить три основные проблемы, возникающие при проектировании комплексной ИУП ТПП:

- *Проблема сложности.*
- *Проблема несовместимости.*
- *Проблема избыточности.*

Применяемые на данный момент методы интеграции способны решить их лишь частично, т. к. реализуют либо биполярный подход (применение коммуникационных модулей, работающих в качестве синхронизаторов данных),

либо предполагают создание единого информационного пространства (ЕИП), центральным компонентом которого является система управления данными (PDM/PLM/CALS), которая, во-первых, работает только с данными (не учитывает знания), а во-вторых, является «узким местом» всей интеграционной сети, т. е. при отказе данной системы информационный обмен в ЕИП будет нарушен.

Проведённые исследования показали, что для усовершенствования существующих методов структурной интеграции АСТПП целесообразно использовать элементы теории многоагентных систем, т. е. создать одноранговую (гетерархическую) агентную сеть, отвечающую за интеграцию средств информационного обеспечения ИУП ТПП. Также должны быть разработаны инструментальные средства, позволяющие создать единый механизм взаимодействия пользователей с проектируемой ИУП ТПП, реализованный в виде web-сервисов.

Первую главу завершает постановка задач исследования, решение которых необходимо для разработки более совершенной интеграционной среды технологической подготовки приборостроительного производства, позволяющей существенно сократить время внедрения новых информационных средств автоматизации ТПП, и упростить их применение.

**Во второй главе** описываются теоретические основы построения многоагентных систем, представляющие архитектуру программного агента, математические модели многоагентной среды и многоагентной системы, а также функциональные особенности построения многоагентных систем для решения задач технологической подготовки производства.

*Агент (интеллектуальный агент, ИА) — это независимая компьютерная система, находящаяся в некоторой среде, способная автономно действовать в ней для достижения своих целей.*

Термин впервые был использован Джоном Маккарти (John McCarthy) и Оливером Селфриджем (Oliver G. Selfridge) в пятидесятых годах двадцатого века. На сегодняшний день существует всего две основные архитектуры ИА, используемые при построении адаптивных одноранговых агентных сетей: *реактивная* (основанная на продукционной модели поведения агентов) и *делиберативная* (основанная на целях агента и его восприятии модели окружающей среды).

Анализ достоинств и недостатков рассмотренных архитектур показал, что ни одна из них в чистом виде не может быть использована для построения многоагентной технологической системы — поэтому при проектировании должна быть использована гибридная двухуровневая схема построения агента, использующая разные подходы для решения разных задач интеграции АСТПП. Гибридная архитектура позволяет строить агенты из двух подсистем:

- Делиберативного модуля, содержащего символьную модель мира для принятия глобальных решений.
- Реактивного модуля для реагирования на происходящие в системе события.



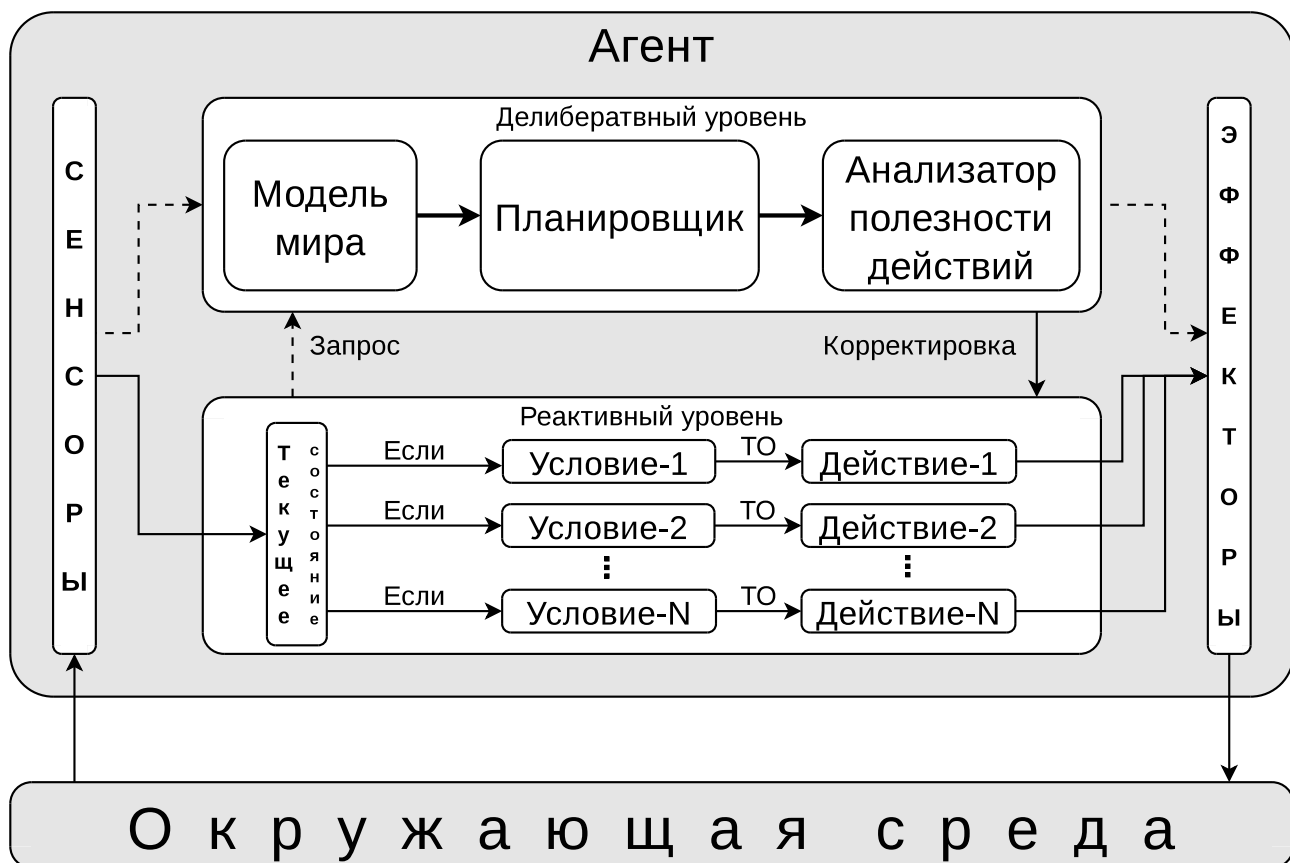


Рис. 1. Агент с гибридной архитектурой

Полученная в результате архитектура (рис. 1) является многоуровневой, т. е. подсистема контроля агента в ней состоит из двух уровней, при этом каждый вышележащий уровень работает с менее формализованной информацией.

Функционирование и взаимодействие агентов в МАС, опирается на унифицированную математическую модель, представляющую совокупность понятий *многоагентной среды* (описывающей поведение агентов в процессе решения поставленных им прикладных задач) и *многоагентной системы*, являющейся коммуникационной надстройкой многоагентной среды и обеспечивающий жизненный цикл агентов и их взаимодействие.

*Многоагентная среда* (МС) есть кортеж  $(\mathcal{A}, \mathcal{E}, \Pi, \Delta)$ , где  $\mathcal{A} = \{\alpha_1, \dots, \alpha_n\}$  — множество всех агентов. Каждый агент  $\alpha_i$  представляет собой кортеж  $(S_i, P_i, A_i, \phi_i)$  множества возможных состояний  $S_i$ , множества объектов восприятия (перцепции)  $P_i$ , множества действий  $A_i$  и агентной функции  $\phi_i: S_i \times P_i \rightarrow S_i \times A_i$ .  $\mathcal{E}$  — множество состояний среды.  $\Pi: \mathcal{E} \rightarrow (P_1 \times \dots \times P_n)$  — функция восприятия,  $\Delta: \mathcal{E} \times (A_1 \times \dots \times A_n) \rightarrow \mathcal{E}$  — функция среды.

Предполагается, что существует некоторая дискретная временная шкала, где временной шаг задаётся переходом от одной точки шкалы к другой. Любой агент  $\alpha_i$  для всех состояний среды  $e \in \mathcal{E}$  и всех состояний агентов  $(s_1, \dots, s_n) \in S_1 \times \dots \times S_n$  на каждом шаге вычисления через функцию

восприятия получает свой локальный объект восприятия  $\Pi^i(e)$ . Агент рассчитывает своё действие  $a_i = \phi_i^2(s_i, \Pi^i(e))$  и своё новое состояние  $s'_i = \phi_i^1(s_i, \Pi^i(e))$  на основании текущего состояния  $s_i$  и своего восприятия этого состояния. Состояние среды меняется под действием агентов.

$$e' = \Delta(e, a_1, \dots, a_n) \quad (1)$$

определяет преемственное состояние среды, а

$$s'_i = \phi_i^1(s_i, \Pi^i(e)) \quad (2)$$

задаёт преемственное состояние агентов для всех  $i$ . Переходная функция состояния  $\bar{\Delta}: \mathcal{E} \times S_1 \times \dots \times S_n \rightarrow \mathcal{E} \times S_1 \times \dots \times S_n$ , определённая как  $\bar{\Delta}(e, s_1, \dots, s_n) = (e', s'_1, \dots, s'_n)$ , объединяет состояния агентов и состояния среды. Следовательно, функция восприятия, агентная функция и функция среды являются частями переходной функции  $\bar{\Delta}$ .

Две МС  $(\mathcal{A}, \mathcal{E}, \Pi, \Delta)$  и  $(\mathcal{A}', \mathcal{E}', \Pi', \Delta')$  *изоморфны*, если существует биективная функция  $\Psi: \mathcal{E} \times S_1 \times \dots \times S_n \rightarrow \mathcal{E}' \times S'_1 \times \dots \times S'_m$  такая, что для всех  $(e, s_1, \dots, s_n) \in \mathcal{E} \times S_1 \times \dots \times S_n$

$$\bar{\Delta}'(\Psi(e, s_1, \dots, s_n)) = \Psi(\bar{\Delta}(e, s_1, \dots, s_n)) \quad (3)$$

Изоморфизм МС позволяет производить холоническую *декомпозицию* агента на множество субагентов, а также *редуцировать* многоагентную среду до одноагентного состояния.

*Многоагентная система* (МАС) — вычислительная система, в которой два или более агента взаимодействуют (сотрудничая, соперничая или комбинируя первое и второе), чтобы достичь определённые индивидуальные или коллективные цели, находящиеся за пределами индивидуальных способностей и знаний каждого агента.

Для описания многоагентной системы в рассматриваемой предметной области определяется множество агентов-прототипов, созданных в соответствии с принципами организации МС. Следовательно, можно дать следующее статическое определение МАС:

$$\mathcal{MAS}_{prot} = (\mathcal{A}_{prot}, ADS), \text{ где} \quad (4)$$

- |                      |  |
|----------------------|--|
| $\mathcal{A}_{prot}$ | множество агентов-прототипов $\{A^1, \dots, A^n\}, n \in \mathbb{N}$ , экземпляры которых могут быть динамически включены в систему. |
| $ADS$                | специализированный агент-прототип, реализующий агентную службу каталога.   |

Объекты конечного множества (4) формируют МАС в определённой предметной области. Процесс решения любой задачи в рамках МАС начинается с инициализации одного из агентов системы:

$$\begin{aligned} \mathcal{MAS}_{init} &= (\mathcal{A}_{init}, ADS_{init}), \text{ где} \\ \mathcal{A}_{init} &= \{A_1^1, \dots, A_{k_1}^1, \dots, A_1^n, \dots, A_{k_n}^n\}, k_1, \dots, k_n \in \mathbb{N} \text{ и} \\ &\forall A_j^i \in \mathcal{A}_{init} : A^i \triangleright A_j^i \wedge A^i \in \mathcal{A}_{prot}. \end{aligned} \quad (5)$$

Выражение  $A^i \triangleright A_j^i$  (читается « $A_j^i$  — экземпляр  $A^i$ ») показывает, что  $A_j^i$  является экземпляром агента-прототипа  $A^i$ . Агент  $A_j^i$  наследует поведение и все изначальные знания агента-прототипа, а также может обладать некоторыми дополнительными свойствами или знаниями (например, уникальным идентификатором, позволяющим другим агентам МАС взаимодействовать с ним).

Каждому состоянию МАС необходимо присвоить фиксированные значения, определяющие, что для агентов внутри МАС некоторые состояния более предпочтительны, чем другие. *Функция полезности* есть отображение  $u: E \times S \rightarrow \mathbb{R}$ , где  $u(e)$  выражает значение полезности действия агента  $\alpha$ , находящегося в ситуации  $e$ . Так как состояние среды задаётся в виде кортежа независимых подсостояний, можно идентифицировать определённые подмножества подсостояний как абстрактные ресурсы, т.е. сервисы, которые должен предоставлять каждый агент, участвующий в интеграционной технологической сети.

Для построения гибкой интеграционной системы автоматизации ТПП понятие агента должно быть расширено введением в него дополнительных функций, позволяющих ему участвовать не только в одноранговом взаимодействии в рамках интеграционной сети, но и в классических иерархических системах, что достигается за счёт *декомпозиции* единого технологического агента на множество составляющих. Применение подобных агентов (также называемых *холонами*) позволяет создавать адаптивные системы, позволяющие при необходимости использовать не только методы многоагентного взаимодействия, но и классические централизованные системы управления технологическими данными и знаниями.

**В третьей главе** описывается программные и аппаратные средства многоагентной системы, обеспечивающей функционирование единой информационно-управляющей платформы технологической подготовки производства.

Для создания многоагентной системы необходимо как минимум:

1. Реализовать протоагента, т.е. абстрактного агента, для которого не определена модель поведения и коммуникационные возможности.
2. Создать открытую среду, в которой могут существовать агенты.
3. Разработать протокол взаимодействия агентов, позволяющий в дальнейшем перестраивать МАС для решения конкретных задач.

Для объединения всех вышеперечисленных компонентов дополнительно необходимо определить универсальный формат (язык) представления

технологических данных и знаний. Анализ существующих на данный момент форматов (XML, JSON, YAML) показал, что в силу своей универсальности ни один из них не может быть применён в рассматриваемой предметной области в качестве базового. Хорошая проработка и богатый арсенал инструментальных средств позволяют использовать их для хранения и передачи специфической технологической информации, но не для её семантического представления. Среди немногочисленных специализированных языков представления технологических данных и знаний выбран язык, являющийся методологической основой теории *виртуального строкового пространства технологических данных (ВСПТД)*. Выбор обусловлен простотой синтаксиса данного языка, а также возможностью единообразно представлять данные и знания в символьной форме, что является несомненным преимуществом при создании технологической МАС.

Концепция ВСПТД предполагает создание единой информационной среды описания технологических данных и знаний, основным структурным элементом которой является бесконечномерная последовательность триплетов (символьных объектов), именуемая триплексной строкой. Абстрактная форма представления триплета показана на рис. 2.



Рис. 2. Общая схема представления триплета

Триплеты, описывающие данные, которыми информационно-управляющая платформа технологической подготовки производства оперирует в текущий момент, называются фактами:

$$\Phi = \langle Prefix, Name, Value \rangle, \quad (6)$$

где *Prefix* — префикс, *Name* — имя параметра, *Value* — значение параметра. Ранее неизвестные системе триплеты, т. е. триплеты, значение которых ещё предстоит получить, именуются целями:

$$Префикс. \textbf{Имя} = Заявка; \quad (7)$$

Несмотря на кажущуюся простоту, с помощью данной семантической модели в теории ВСПТД можно описывать все основные структуры данных (целые и вещественные числа, строки, массивы, списки, кортежи, множества, хэш-таблицы и др.), формировать на их основе более сложные структуры, например, графы или многосвязные списки, а также работать с тремя формами представления знаний: *синтагмами*, *фреймами* и *продукциями*.

Подготовленная формализованная основа позволяет перейти непосредственно к проектированию программного обеспечения МАС. Определён термин *протоагент*, представляющий собой автономный программный модуль (в общем случае экземпляр класса) и обладающий уникальным идентификатором, набором слотов, в которые могут быть записаны транспортные адреса, а также контекстами поведения. Основными задачами протоагента являются: *хранение настраиваемых контекстов*, которые могут быть активированы в момент инициализации агента и *предоставление программируемого внутреннего интерфейса*, позволяющего ассоциировать протоагента как с интегрируемой АСТПП, так и с оператором. Связь с АСТПП будет осуществляться либо по протоколу XML-RPC, либо через СОМ интерфейс, для оператора будет создан web-сервис, через который он сможет взаимодействовать с агентной средой ИУП ТПП.

Для взаимодействия внутри МАС агентам необходимо отделять семантику тех данных и знаний, с которыми они работают от их вербального представления, что может быть достигнуто использованием *онтологического словаря* (онтологии ВСПТД). Онтологический словарь, являясь таксономической спецификацией предметной области, позволяет агентам взаимодействовать по единому протоколу, избегая двусмысленности и дублирования технологических данных и знаний за счёт преобразования их вербальной формы. Каждое поле словаря содержит описание некоторого концепта, его базовые параметры, множество синонимов (например, концепт *материал* в одной из АСТПП может обозначаться *MATERIAL*, а в другой *MT*), множество связей (иерархических или логических), а также связанные с ним знания и присоединённые процедуры.

Протокол взаимодействия агентов реализован в соответствии с базовой моделью, стандартизированной *Фондом интеллектуальных физических агентов (FIPA)*, являющимся 11 комитетом IEEE. Язык разработки — Python, использована агентная библиотека SPADE. Взаимодействие агентов базируется на асинхронной передаче ими специализированных символьных объектов (именуемых *перформативами* или *речевыми актами*), представляющих собой высказывания, равноценные действию. По стандарту определено 22 вида речевых актов, основными из которых являются **Inform** (уведомление, ответ) и **Request** (запрос, требование), а остальные представляют собой *макроопределения*, заданные в терминах этих перформативов.

Подобный упрощённый способ взаимодействия позволяет создавать адаптивные отказоустойчивые агентные сети. В рамках рассматриваемой предметной области это выражается наличием определённой коммуникационной модели поведения каждого технологического агента. Эта модель позволяет ему не просто обмениваться данными и знаниями с АСТПП, но и контролировать

этот процесс, а также искать новые способы получения недостающих данных и знаний, эмулируя поведение специалиста.

Так как рассматриваемая многоагентная ИУП ТПП строится на базе существующего на предприятии информационного поля, аппаратным обеспечением МАС являются персональные компьютеры и рабочие станции, используемые сотрудниками предприятия. Автором предложена методика моделирования информационного поля приборостроительного предприятия, использующая концепции «облачных вычислений» и «виртуальных рабочих мест», что позволяет настраивать и конфигурировать разработанную ИУП ТПП *до внедрения её на предприятии.*

В соответствии с данной методикой создан *Распределённый Виртуальный Испытательный Стенд (РВИС)*, внешний вид которого представлен на рис. 3. РВИС предоставляет информационно-телекоммуникационную среду, предназначенную для моделирования средств информационного обеспечения, работающего в условиях крупного промышленного предприятия. распределённый виртуальный испытательный стенд построен на базе серверного кластера, на котором установлено специализированное программное обеспечение (*монитор виртуальных машин*), позволяющее создавать актуальную модель имеющегося на предприятии компьютерного оборудования.

С точки зрения реализации распределённый виртуальный испытательный стенд является «облачной» платформой виртуализации вычислительной и телекоммуникационной инфраструктуры предприятия. Термин «облачный» подразумевает абстрагирование аппаратного обеспечения за счёт консолидации ресурсов серверного кластера и создания на его основе множества виртуальных сущностей (компьютеров, рабочих станций, сетевых устройств и т. д.) с заданными характеристиками. Устройства, позволяющие пользователю напрямую работать с графическим интерфейсом, установленных на них программ, а также дающие возможность доступа к периферийному оборудованию, называются *виртуальными рабочими местами* (ВРМ), прочие вычислительные устройства — *виртуальными машинами*, а телекоммуникационные устройства — *виртуальной локальной вычислительной сетью*. Архитектура распределённого испытательного стенда представлена на рис. 4.



Рис. 3. Внешний вид РВИС

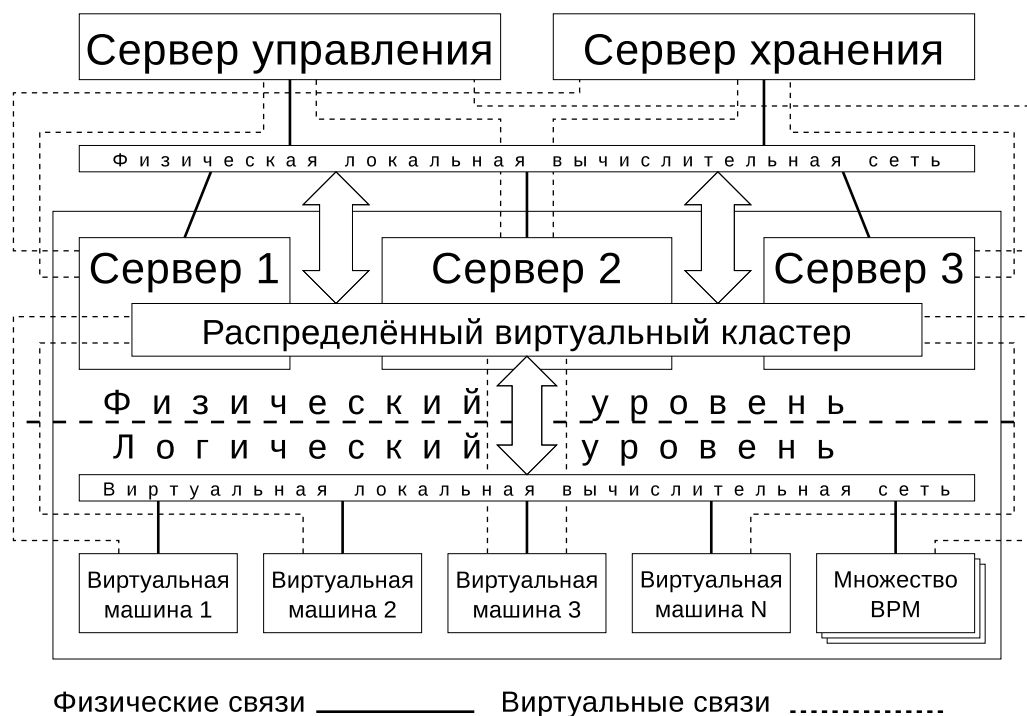


Рис. 4. Архитектура распределённого виртуального испытательного стенда

В четвёртой главе приводятся практические результаты, полученные в процессе разработки многоагентной интеграционной сети технологической подготовки производства изделий из полимерных композиционных материалов, а также моделирования полученной среды на разработанном виртуальном распределённом испытательном стенде.

Композиционные материалы (от лат. *composition* — составление) — это многокомпонентные материалы, состоящие из полимерной, металлической, углеродной, керамической или другой основы, которая называется матрицей, армированной наполнителями из волокон, нитевидных кристаллов, тонкодисперсионных частиц и др. Путём подбора состава и свойств наполнителя и матрицы, их соотношения, ориентации наполнителя можно получить новые материалы с требуемым сочетанием эксплуатационных и технологических свойств. Именно сочетание разнородных веществ приводит к созданию нового материала, свойства которого количественно и качественно отличаются от свойств каждого из его составляющих.

Технологическая подготовка производства изделий из ПКМ представляет собой сложный многоитерационный процесс, который условно можно разделить на два больших подэтапа:

- Проектирование материала по заданным входным характеристикам.
- Проектирование технологии изготовления конструкции изделия.

Таким образом, создание материала и изделия совмещаются, при этом сразу получается готовое изделие заданной формы и с заданными характеристиками.

Подобное разделение существенно увеличивает количество инженерных изысканий, проводимых в рамках ТПП. Как следствие, используются дополнительные средства автоматизации, необходимые для выбора компонентов будущего материала, описания математической модели композиции и имитационного моделирования, целью которого является проверка соответствия параметров изделия, изготовленного из спроектированного материала, заданным характеристикам.

Увеличение количества АСТПП усложняет их взаимодействие в процессе решения задач ТПП за счёт усложнения обмена данными и знаниями. Схема информационных потоков ТПП изделий из ПКМ представлена на рис. 5.

На основе предложенного метода агент-ориентированной интеграции информационного поля технологической подготовки изделий из ПКМ была разработана многоагентная технологическая система обеспечивающая интеллектуальное взаимодействие:

- Программных систем, предназначенных для решения различных инженерных задач: расчётов, анализа и симуляции физических процессов (CAE). Для решения задач проектирования ТПП изделий из ПКМ были задействованы следующие системы: **Moldex3d** (система моделирования процессов заливки материала, выдержки под давлением, охлаждения, усадки, коробления и т. д.), **DIGIMAT** (платформа для полномасштабного конечно-элементного моделирования нелинейного поведения ПКМ и композитных структур), **Samcef** (программное обеспечение для расчётов методом конечных элементов), а также набор инструментальных средств для общеинженерных расчётов **SALOME**.
- Организационно-технической системы, обеспечивающей управление всей информацией об изделии (PDM). Для интеграции была выбрана система **ENOVIA SmarTeam**, используемая для управления жизненным циклом проектируемых изделий, а также в качестве интеллектуальной базы проектируемых ПКМ.
- Системы для управления внутренними и внешними ресурсами приборостроительного предприятия (ERP). Была использована система **OpenERP**.
- Системы автоматизированной технологической подготовки оборудования с числовым программным управлением (CAM). Использовалась базовая по своей функциональности система **PyCAM**, позволяющая создавать управляющие программы для трехкоординатных фрезерных станков, чего оказалось достаточно для отработки методов интеграции подобных АСТПП.
- Системы автоматизированной подготовки (написания) технологических процессов (CAPP). Была использована система **Вертикаль 2011**.





- Вспомогательных баз данных хранящих различные справочные материалы и не являющихся частью ни одной из рассмотренных выше систем. Была использована система управления базами данных **PostgreSQL**, а также информационные адаптеры для web-ориентированных баз по материалам, таких как: **M-Base**, **CAMPUS**, **MatWeb**.

В процессе моделирования на РВИС для каждой АСТПП, участвующей в интеграционной сети, создана виртуальная машина, для каждого специалиста — виртуальное рабочее место. Все информационные сущности объединены в локальную сеть с топологией «звезда». Каждый агент созданной МАС представляет собой независимый исполняемый модуль (скрипт), базовые методы которого наследуются от агента-прототипа.

Агенты многоагентной системы ИУП ТПП разделены на классы. Каждый класс обладает своим собственным поведением (конфигурацией, позволяющей ему работать с определённым классом АСТПП или специалистом), обусловленным некоторым планом и определёнными целями.

Для сохранения максимальной простоты и гибкости в разработанной системе определены всего два базовых класса агентов:

1. Класс А — *Агенты-преобразователи*.
2. Класс Б — *Агенты-интерфейсы*.

Агенты первого класса связаны с одной из информационных систем, использующихся в процессе технологической подготовки производства, агенты второго класса должны взаимодействовать с пользователями. Также определены два сервисных агента: *агент системы управления* и *агент службы каталога* (рис. 7). К основным функциям агента системы управления относятся хранение транспортных адресов агентов и маршрутизация внутри агентной среды. Основная функция агента службы каталога — хранение актуального списка общесистемных и пользовательских сервисов (абстрактных ресурсов), предоставляемых агентами. Общесистемные сервисы позволяют агентам взаимодействовать, получая друг у друга данные и знания. Пользовательские сервисы предоставляют оператору некоторый формализованный диалог, в процессе работы с которым могут быть получены новые технологические данные или знания. Примерами таких сервисов могут служить: *расчёт режимов резания, подбор материала по параметрам, расчёт усадок* и т. д. Каждый сервис описывается транспортным адресом агента и триплексной строкой параметров, которые может обработать данный сервис.

**Агент-преобразователь** отвечает за создание, управление и поддержание в надлежащем состоянии онтологии, относящейся к какой-либо конкретной подобласти информационного поля технологической подготовки производства. Данный агент наследует своё поведение от специализированного системного агента-прототипа накапливающего и классифицирующего информацию

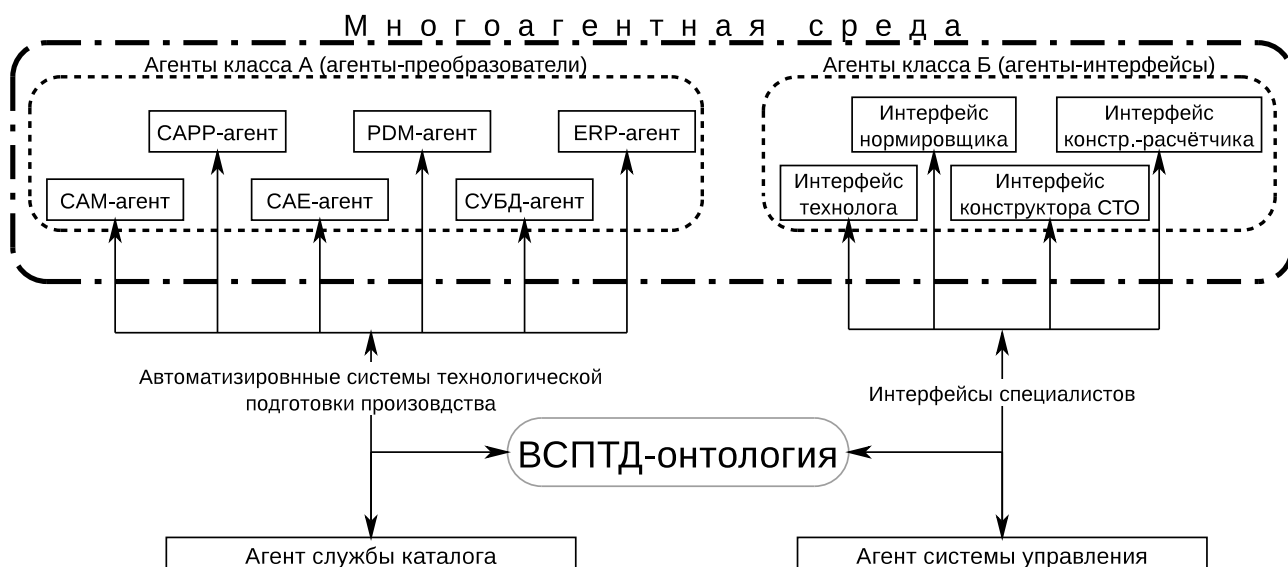


Рис. 6. Схема взаимодействия агентов ИУП ТПП

об онтологиях ВСПТД. Агент-преобразователь связан с одной или несколькими информационными сущностями (в рассматриваемой упрощённой схеме — с системами технологической подготовки производства изделий из ПКМ).

Агент-преобразователь имеет интерфейс для работы с экспертом-технологом, отвечающим за наполнение внутренней онтологии агента и подключение к агенту различных информационных модулей, реализующих сервисы агента. Сконфигурированный для работы с конкретной АСТПП, агент-преобразователь ожидает запросы, а также обменивается информацией с другими агентами-преобразователями с целью актуализации понятий и недопущения дублирования технологических данных и знаний.

Так как рассматриваемая предметная область является очень сложной, в онтологии её описания не обойтись без наследования одних понятий другими, иными словами, многие информационные сущности технологической подготовки производства должны образовывать строгие иерархии. Для создания подобных структур внутри гетерархической сети, агенты-преобразователи могут образовывать постоянные или временные *холархии* (специализированные иерархические объединения агентов, возникающие вследствие холонической декомпозиции) в рамках домена кооперации, при этом агент (в данном случае холон), отвечающий за базовые определения конкретного класса понятий, становится координатором.

Например, в процессе подбора параметров полимерной композиции происходит активный обмен информацией между несколькими САЕ-системами, при этом на каждом шаге этого многоитерационного процесса соответствие параметров изделия заданным характеристикам проверяется в системе конечного элементного анализа Samcef. Агент данной системы становится временным координатором, управляющим данным процессом и принимающим решение

об изменении состава ПКМ (т. е. о возврате на один шаг назад) или переходе на следующий этап. Соответственно, когда оптимальный состав ПКМ найден, данный временный кооперационный кластер агентов распадается.

**Агент-интерфейс** с одной стороны взаимодействует со специалистом, а с другой — с агентами-преобразователями. Таким образом, агент-интерфейс помогает пользователю напрямую работать с незнакомыми ему системами, например, технолог может напрямую обращаться к ERP-системе, получая при этом упрощённый интерфейс, в котором будет отражена только та информация, которая соответствует онтологии понятий технологического процесса, а всё остальное будет либо переведено в понятную для технолога форму, либо сконвертированы в соответствии с правилами перевода онтологии, либо опущены за ненадобностью. С технической точки зрения, агент-интерфейс является web-сервисом, с которым пользователь работает через интернет-браузер, что не требует установки никакого дополнительного программного обеспечения. Работа с агентом-интерфейсом может осуществляться в трёх режимах:

1. В режиме *свободного поиска*, когда агент-преобразователь осуществляет полнотекстовый поиск в онтологии виртуального строкового пространства технологических данных. Например, по запросу **материал липол плотность**, система вернёт значение найденного параметра, а также предложит пользователю просмотреть дополнительные результаты, найденный в онтологии: другие параметры материала, входимость этого материала в состав различных ПКМ, изделия, созданные из этого материала, оборудование и т. д. При этом поиск будет осуществляться не в одной автоматизированной системе технологической подготовки производства или базе, а по всему информационному полю, что достигается наличием единого метакранилища всех технологических данных и знаний, т. е. онтологического словаря.
2. В режиме *поиска сервиса*, в котором по требованию пользователя система вернёт либо сгруппированный по категориям список всех доступных агентам информационно-управляющей платформы технологической подготовки производства сервисов, либо даст возможность свободного поиска сервиса, аналогично предыдущему варианту.
3. В режиме *работы с сервисом*, в котором агент-интерфейс динамически формирует кумулятивный пользовательский диалог (автоматически сгенерированную web-форму) на основании фрейма-терминала ВСПТД. Отличительной особенностью данного диалога является то, что он позволяет пользователю работать с данными и знаниями сразу от нескольких систем. Пример интерфейса, сформированного агентом при работе с сервисом PDM-системы представлен на рис. 7.

Идентификатор \*

Параметры материала

	Очень важно	Важно	Желательно	Не важно
Плотность	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Температура по Вика	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Электропроводность	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Твёрдость	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>

Марка

Производитель

Дополнительные параметры

OK Clear Form

Рис. 7. Пример интерфейса при работе с сервисом PDM-системы

В процессе работы агенты обоих классов используют самый простой вариант взаимодействия по схеме «запрос-ответ». Тем не менее, даже он позволяет осуществить интеллектуальную интеграцию средств автоматизации в едином информационном поле ТПП производства изделий из полимерных композиционных материалов. Использование же более сложных методов позволит создать децентрализованную сеть управления технологической подготовкой производства, способную работать не только в рамках одного предприятия, но и выполнять задачи по интеграции внутри целого производственного кластера.

## Заключение

В работе выполнен комплекс научных исследований и разработок, основной целью которых являлось совершенствование существующих методов автоматизации решения задач технологической подготовки приборостроительного производства за счёт внедрения многоагентной системы, упрощающей интеграцию средств информационного обеспечения ТПП.

В процессе выполнения диссертационной работы были получены следующие основные результаты:

1. Показана актуальность применения методов теории многоагентных систем для решения задач интеллектуальной интеграции в рамках единого информационного поля технологической подготовки производства.
2. Описаны математические модели многоагентной системы и многоагентной среды, базирующиеся на принципах теории множеств и теории алгебраических систем.
3. Описан специализированный язык взаимодействия технологических агентов, основанный на принципах теории виртуального строкового пространства и позволяющий агентам обмениваться технологическими данными и знаниями.
4. Спроектирован и разработан распределённый виртуальный испытательный стенд для моделирования взаимодействия систем автоматизации технологической подготовки производства в едином информационном поле приборостроительного предприятия.
5. Предложена модель взаимодействия автоматизированных систем технологической подготовки производства изделий из полимерных композиционных материалов.
6. Разработан и программно реализован прототип многоагентной системы, являющейся интеграционным ядром информационно-управляющей платформы технологической подготовки производства.

Спроектированная многоагентная система позволяет существенно упростить внедрение современных автоматизированных систем технологической подготовки производства за счёт их более тесной интеграции, а также снизить накладные расходы, связанные с промышленной эксплуатацией подобных систем. Предложенные методы могут быть адаптированы для решения технологических задач не только в приборостроении, но и в смежных отраслях.

## Список публикаций по теме диссертации

1. Афанасьев М. Я., Филиппов А. Н. Применение методов нечёткой логики в автоматизированных системах технологической подготовки производства // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 6. С. 38–42. **(Из перечня ВАК).**
2. Афанасьев М. Я., Филиппов А. Н. Создание динамических моделей баз данных технологического назначения на языке Python // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 6. С. 59–62. **(Из перечня ВАК).**
3. Афанасьев М. Я., Грибовский А. А. Организация единого информационного пространства виртуального предприятия // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 76. С. 113–118. **(Из перечня ВАК).**
4. Афанасьев М. Я., Саломатина А. А., Алёшина Е. Е., Яблочников Е. И. Применение многоагентных технологий для реализации системы управления виртуальным предприятием // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 75. С. 105–111. **(Из перечня ВАК).**
5. Афанасьев М. Я., Грибовский А. А. Реализация модуля управления виртуальным предприятием в PDM-системе ENOVIA-SmarTeam // Сборник тезисов докладов конференции молодых учёных, Выпуск 2. Труды молодых учёных / Под ред. В. О. Никифорова. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. С. 258–259.
6. Грибовский А. А., Афанасьев М. Я. Декомпозиция структуры трехмерных моделей на наборы конструктивных элементов с использованием примитивов // Сборник тезисов докладов конференции молодых ученых, Выпуск 2. Труды молодых ученых / Под ред. В. О. Никифорова. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. С. 281.
7. Афанасьев М. Я. Использование библиотеки Open CASCADE для параметрического 3D моделирования // Сборник тезисов докладов конференции молодых ученых, Выпуск 3. Труды молодых ученых / Под ред. Никифорова, В. О. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. С. 117–118.
8. Афанасьев М. Я. Вероятностная модель рассуждений в машине логического вывода экспертной системы «ТехАссистент» // Сборник трудов конференции молодых учёных, Выпуск 2. Биомедицинские технологии, мехатроника и робототехника / Под ред. В. Л. Ткалич. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. С. 296–299.