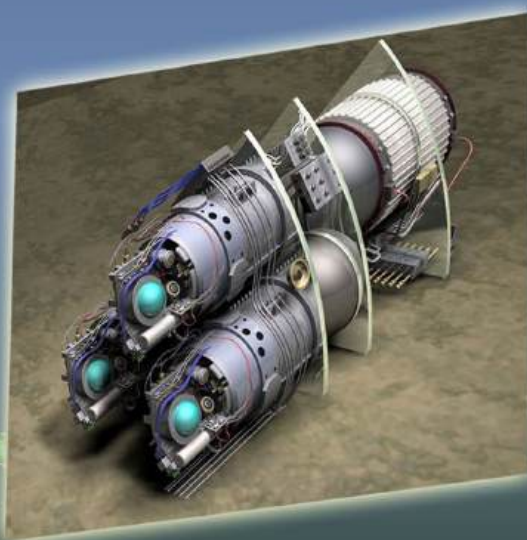
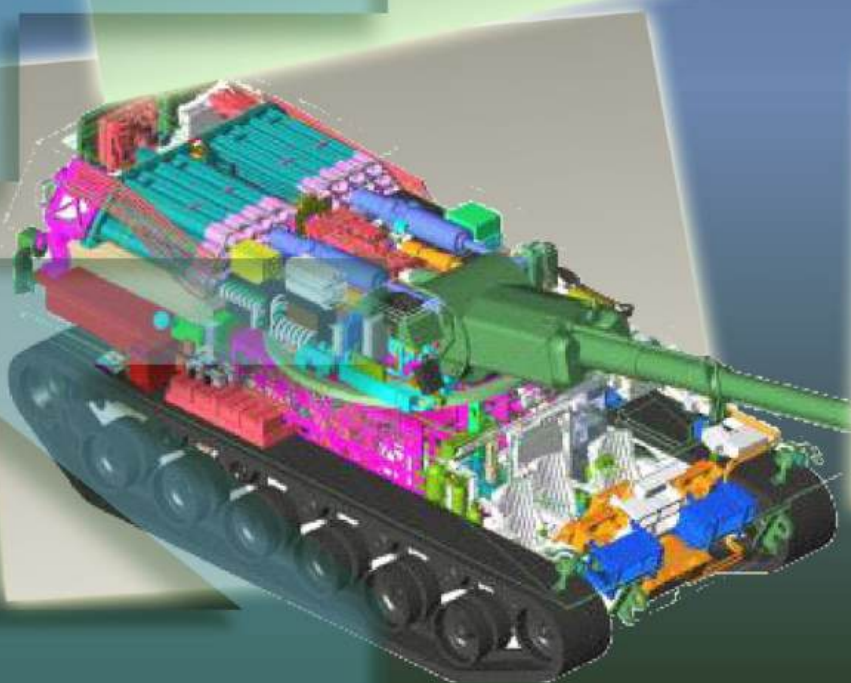
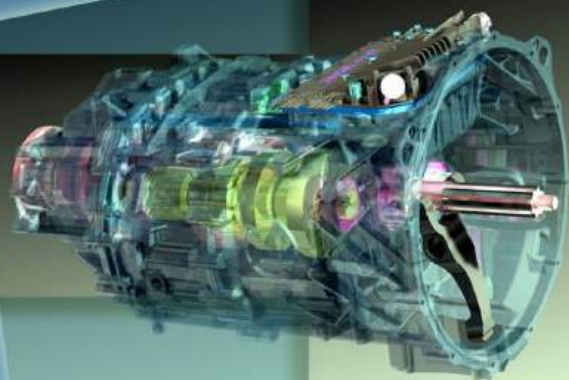
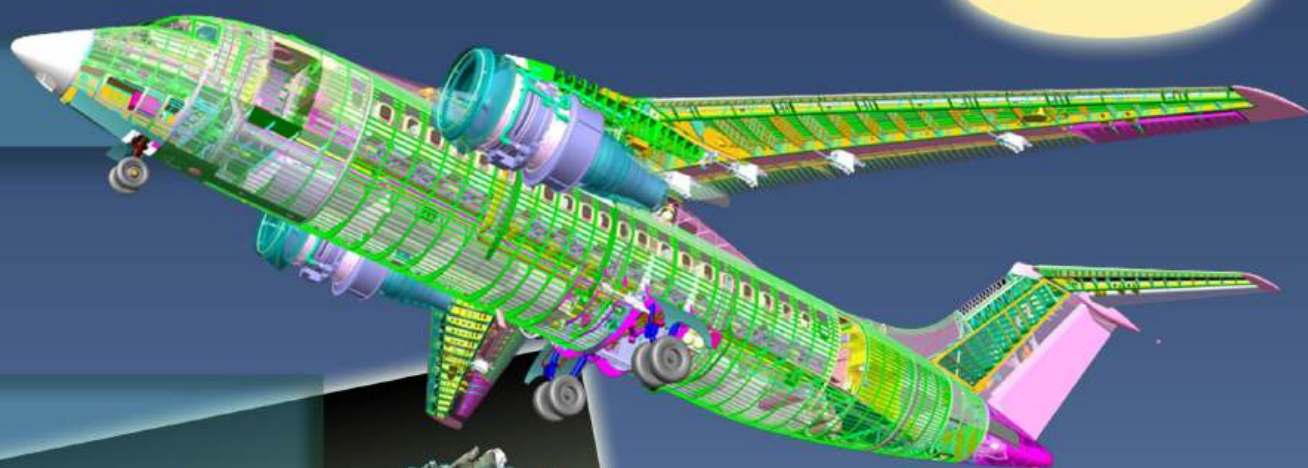


# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

в проектировании и производстве

№ 3' 2022





## Все новейшие достижения и современные разработки предприятий оборонного комплекса — в научно-технических журналах ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

ФГУП «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас» является издателем следующих научных журналов:



Межотраслевой научно-технический журнал  
**Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России**  
(4 выпуска)  
Подписной индекс **79379**  
Издается с 1984 года



Межотраслевой научно-технический журнал  
**Конструкции из композиционных материалов**  
(4 выпуска)  
Подписной индекс **80089**  
Издается с 1981 года



Научно-технический журнал  
**Информационные технологии в проектировании и производстве**  
(4 выпуска)  
Подписной индекс **79378**  
Издается с 1976 года



Межотраслевой научно-практический журнал  
**Экология промышленного производства**  
(4 выпуска)  
Подписной индекс **80090**  
Издается с 1993 года



Научно-практический журнал  
**Вопросы защиты информации**  
(4 выпуска)  
Подписной индекс **79187**  
Издается с 1974 года

Все издания ФГУП «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас»:

✓ включены решением ВАК Министерства науки и высшего образования России в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук;

✓ метаданные выпусков включены в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Более подробную информацию об изданиях, подписке, дополнительных услугах можно получить по тел.: 8 (495) 491-43-17, 8 (495) 491-77-67, 8 (495) 491-77-20 (подписка);  
факс: 8 (495) 491-44-80.  
E-mail: [izdanie@ntckompas.ru](mailto:izdanie@ntckompas.ru)



# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР  
ОБОРОННОГО КОМПЛЕКСА  
«КОМПАС»

## № 3 (187) 2022

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1976 г.

### Главный редактор

И. А. Шеремет, акад. РАН, проф., заместитель  
директора Российского фонда фундаменталь-  
ных исследований по научной работе

### Заместитель главного редактора

В. Н. Гридин, д-р техн. наук, проф.,  
научный руководитель ЦИТИ РАН

### Ответственный секретарь

Г. П. Глотова, ФГУП «НТЦ оборонного  
комплекса «Компас»

### Редакционная коллегия:

В. В. Бордоже, д-р техн. наук, проф., Координа-  
ционный совет по информационным тех-  
нологиям предприятий ОПК РФ; А. И. Громов,  
канд. хим. наук, НИУ «Высшая школа экономи-  
ки»; В. В. Кондратьев, чл.-кор. РАН, д-р техн.  
наук, проф., Нижегородский государственный  
технический университет им. Р. А. Алексеева;  
Ю. Н. Кофанов, д-р техн. наук, проф., МИЭМ  
НИУ ВШЭ; С. А. Матвеев, канд. техн. наук,  
ФГУП «ЦНИИмаш»; Е. И. Митрушкин, д-р техн.  
наук, проф., АО «НИИАА»; С. В. Назаров, д-р  
техн. наук, проф., ЗАО «Московский научно-  
исследовательский телевизионный институт»;  
М. А. Пирогова, канд. техн. наук, НИУ МЭИ;  
С. В. Попов, д-р техн. наук, Холдинг «Швабе»;  
А. Ф. Ронжин, д-р физ.-мат. наук, проф., Вычис-  
лительный центр им. А. А. Дородницына;  
П. О. Скобелев, д-р техн. наук, НАО «Группа  
компаний «Генезис знаний», СамГТУ; В. В. Со-  
ломин, канд. воен. наук, ФГУП «НТЦ оборонного  
комплекса «Компас»; А. П. Солнцев, д-р воен.  
наук, проф., ФГУП «НТЦ оборонного комплекса  
«Компас»; Е. В. Судов, д-р техн. наук, проф.,  
НИЦ САЛС-технологий «Прикладная логистика»;  
А. В. Цырков, д-р техн. наук, проф., ГКНПЦ  
им. М. В. Хруничева; В. А. Шахнов, чл.-кор.  
РАН, д-р техн. наук, проф., МГТУ им. Н. Э. Бау-  
мана; Е. И. Шульгин, д-р техн. наук, НИЦ при  
президиуме АИН им. А. М. Прохорова

☎ редакции (495) 491-43-17

E-mail: izdanie@ntckompas.ru

http://ntckompas.ru

### Информационные технологии

в проектировании и производстве:  
Науч.-техн. журн./ФГУП «НТЦ оборонного ком-  
плекса «Компас», 2022.  
№ 3 (187). С. 1—60.

Компьютерная верстка: Н. В. Ильина,  
К. В. Трыкина

Подписано в печать 16.08.2022.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 7,0. Уч.-изд. л. 7,2.

Заказ 1998. Тираж 250 экз.

Адрес редакции: 125424, Москва,  
Волоколамское ш., 77, ФГУП «НТЦ оборон-  
ного комплекса «Компас».

Отпечатано: 101000, Москва,  
Лубянский проезд, д. 15, стр. 4, офис 105.  
ИП Кириченко Алексей Викторович.  
Индекс 79378. 8 статей.

Статьи рецензируются.

© Федеральное государственное унитарное предприя-  
тие «Научно-технический центр оборонного комплек-  
са «Компас», 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

### Инновационные технологии решения задач проектирования, моделирования и производства

- Батришина Г. С., Батришина С. И., Ахметов А. В. Проектиро-  
вание и изготовление керамических изоляторов ..... 3
- Зубкова А. И., Королёва Ю. П., Власов А. И. Сравнительный  
анализ технологии визуального моделирования ArchiMate ..... 9
- Жданова О. В., Столяров О. Н. Система управления требова-  
ниями как инструмент оценки хода выполнения проекта ..... 17
- Решетников И. С., Мошкович Р. А. Анализ применимости си-  
стем визуальной биометрической идентификации в системах  
класса MES ..... 21
- Титов Ю. П., Романов О. Т., Машкин М. Н. Алгоритм метода  
муравьиных колоний для выбора маршрута беспилотного лета-  
тельного аппарата ..... 27
- Семенов Г. Е. Разработка механизмов интеграции технологи-  
ческого редактора и моделилера с использованием микросер-  
висов ..... 32

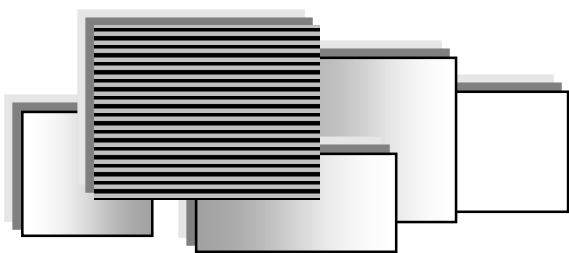
### Прикладные задачи применения информационных технологий

- Тихонов Р. С., Старостин Н. П., Аммосова О. А. Исследо-  
вание влияния низких температур окружающего воздуха на термо-  
упругое состояние электромуфтового сварного соединения поли-  
этиленовых труб ..... 41
- Колошкина И. Е. Подготовка специалистов по автоматизиро-  
ванному проектированию технологий и управляющих программ  
для станков с ЧПУ ..... 48

# **INFORMATION TECHNOLOGY OF CAD/CAM/CAE**

## **THE SCIENTIFIC JOURNAL**

Information on recent advances in CAD/CAM/CAE, industry & business & complex information technology, including methods and tools of computer graphing, geometrical and mathematical modeling, database control methods on estimation and provision of control and reliability.



## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА

УДК 004. 94+666.3/7

DOI: 10.52190/2073-2597\_2022\_3\_3

EDN: NJQVDL

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗОЛЯТОРОВ

Г. С. Батршина, канд. пед. наук; С. И. Батршина; А. В. Ахметов  
Башкирский государственный университет, г. Уфа, Башкортостан, Россия

*Рассмотрена технология подготовки керамической массы, связующего, смешивания компонентов массы и формовки керамического изделия (изолятора) в пресс-форме, смоделированной и распечатанной на 3D-принтере, показаны особенности технологии дробления экземпляров, измельчения кристаллов сырья, также лабораторное оборудование, участвующее в технологическом процессе. Разработанное керамическое изделие используется в печах для термической обработки деталей буринструментов, где в закалочных агрегатах наиболее ответственными элементами печи являются изоляторы, из которых выполнены конструкции крепления нагревательных элементов. По результатам проведенных исследований предложена технология получения нового огнеупорного сырья для керамической промышленности и композиционных материалов на фосфатных связующих.*

**Ключевые слова:** 3D-модель и пресс-форма, импортозамещение, керамический изолятор, проектирование, электрокорунд, шамот, фосфатные связующие.

Геополитическая напряженность и пандемия, многочисленные санкции США и европейских государств стали следствием того, что предприятиям России пришлось разорвать отношения со многими зарубежными партнерами, разрушены налаженные логистические связи и цепочки поставок, произошло сокращение импорта товаров в Россию. Практически почти во всех областях промышленности в качестве запасных частей, конструктивных либо декоративных элементов используются импортные изделия, которые со временем выходят из строя. Разрабатываются различные программы, благодаря которым станет возможным существенно снизить импортную зависимость России. В связи с последними событиями на Украине, вводом странами Евросоюза и США санкций вышел закон правительства РФ об импортозамещении. Импортозамещение как фактор роста отечественного производства стало актуально в 2022 г. Государственная политика, направленная на рационализацию импорта товаров и услуг посредством стимулирования отечественных производителей, предлагает метод восстановления дефектов и реверсного инжиниринга созданием 3D-моделей и чертежей для производства альтернативных изделий, деталей и

узлов (запасных частей) для сельхозтехники, автотранспорта, летательных аппаратов и бытовой техники, которые идеально совместимы с оригинальным оборудованием импортного производства.

Керамические материалы характеризуются разнообразными свойствами и очень широко применяются в технике. На основе оксида алюминия разработано много видов керамики, различающейся по составу добавок, свойствам и областям применения. Среди всех оксидных материалов и их соединений выделяется техническая керамика (изоляторы), которая благодаря своим физико-механическим, термическим и электрофизическим свойствам наиболее широко применяется во многих областях техники, способна выдерживать экстремальные условия и имеет хорошие технико-экономические показатели [1, 2].

Техническая керамика всегда содержит добавки, которые влияют на величину температуры спекания, на формирование фазового состава, микроструктуры и все эксплуатационные свойства. Изучение физико-химической основы формирования структуры технической керамики на фосфатных связующих привело к проектированию и изготовлению керамического изо-

лятора в качестве конструкционной детали в термических агрегатах, работающих при высоких температурах под нагрузкой, а также для теплоизоляции различных агрегатов. Проведена работа по проектированию 3D-модели и пресс-формы керамического изолятора в программе Компас-3D, также исследованы процессы формирования структуры, происходящие при нагреве системы на основе корундовой технической керамики с использованием фосфатных связующих [3].

Цель работы — проектирование и изготовление керамических изоляторов на основе композиционного керамического сырья на фосфатной связке.

Изучением данной темы занимались И. С. Кайнарский, Э. В. Дегтярева, И. Г. Орлова (Корундовые огнеупоры и керамика); В. Я. Шевченко, С. М. Баринов (Техническая керамика); В. Б. Ложников, В. И. Верещагин (Корундовый керамический материал с пониженной температурой спекания); А. И. Августиник (Керамика); Г. Ф. Симин (Сушка и обжиг керамики); У. Ш. Шаяхметов, В. С. Бакунов (Высокотемпературная деформация керамики и огнеупоров) и другие [3–5].

Авторами данной работы разработана новая технология изготовления корундовых керамических изоляторов на фосфатных связующих и изучены его макро- и микроструктуры.

Методологическая база исследования представлена рядом общенаучных методов: индуктивный, дедуктивный, исследовательский, сопоставительный, анализ и синтез.

### Методы и материалы

В работе использованы технологические приемы в целях повышения физико-механических характеристик керамических изделий — выбор компонентов корундо-шамотно-фосфатных масс, введение тонкомолотых добавок, определение температурных режимов обработки. Все испытания проведены на проверенном оборудовании кафедры инженерной физики и физики материалов. Для изучения керамического сырья из месторождений Республики Башкортостан мы выбрали ГОСТ 21216-2014 "Сырье глинистое. Методы испытаний" и ГОСТ 9169-75 "Сырье глинистое для керамической промышленности с соблюдением стандартных способов". Исследования проводили по таким характеристикам глины, как химический, минералогический и гранулометрический составы, по ним определены влажность и пластичность, воздушная и огневая усадка глинистого сырья, а также изучены механические свойства глины после обжига. На лабораторном прессе ПСУ-50 проверены прочность на изгиб, на сжатие.

Разработана 3D-модель пресс-формы керамического изолятора в программе Компас-3D v19 и распечатана на 3D-принтере. Обжиг керамического изделия производился в небольших высокотемпературных печах, обеспечивающих равномерное распределение температуры по рабочему сечению камеры [6].

### Результаты и обсуждения

Разработка инструментов для формования и получения прессованного керамического изделия выполнена с использованием программного обеспечения Компас-3D v19 (лицензионная версия системы), также 3D-принтера для распечатывания модели [7].

Особенно важным этапом в технологии производства керамических корундовых изоляторов является подготовка рецепта, поскольку именно от компонентов зависят эксплуатационные свойства изделий. Основным компонентом для изготовления керамических изоляторов выбран электрокорунд. В качестве активного компонента выбрана ортофосфорная кислота. В качестве цементирующей добавки использован дроблёный шамот. Электрокорунд — это огнеупорный, химически стойкий, сверхтвёрдый материал на основе оксида алюминия. Этот материал является искусственно синтезированным синтетическим корундом, получаемым путем плавки боксита в дуговых электрических печах большой мощности с последующей кристаллизацией расплава, уступает по твердости только алмазу и карбиду кремния. В зависимости от содержания глинозема и особенностей технологии изготовления различают несколько видов электрокорунда: нормальный, белый, хромистый, титанистый, хромотитанистый, циркониевый, монокорунд и сферокорунд. Используется в качестве абразивного и огнеупорного материала для производства стержней, литейных форм, абразивных кругов, огнеупорных изделий.

Шамот (фр. *chamotte*) — огнеупорная глина, каолин, обожжённые до потери пластичности, удаления химически связанной воды и доведённая до некоторой степени спекания. Шамот получают путём обжига при температуре 1300—1500 °С в печах, обычно вращающихся или шахтных. Сырьё поступает в печь в естественном виде или в брикетах, подготовленных на ленточных, вальцевых и других прессах. По степени спекания различают высокоотожжённый шамот с водопоглощением от 2—3 до 8—10 % и низкоотожжённый — до 20—25 %. Полученный шамот дробят, измельчают и как отощающий компонент (это для уменьшения пластичности и усадки во время сушки и обжига) добавляют в массу для формования изделия (рис. 1, 2).



Рис. 1. Электрокорунд фракции менее 1 мм и 1—3 мм



Рис. 2. Дроблённый шамот

Фосфатный связующий (ортофосфорная кислота) — неорганическая кислота средней силы с химической формулой  $H_3PO_4$ , которая при стандартных условиях представляет собой бесцветные гигроскопические кристаллы. В чистом виде фосфорная кислота представляет собой бесцветное кристаллическое вещество с температурой плавления  $42,35^\circ C$ . В твёрдом состоянии и концентрированных растворах между молекулами фосфорной кислоты существуют водородные связи. При снижении концентрации до 40—50 % более устойчивой является водородная связь между фосфат-анионами и молекулами воды, также в растворах фосфорная кислота обменивается атомами кислорода

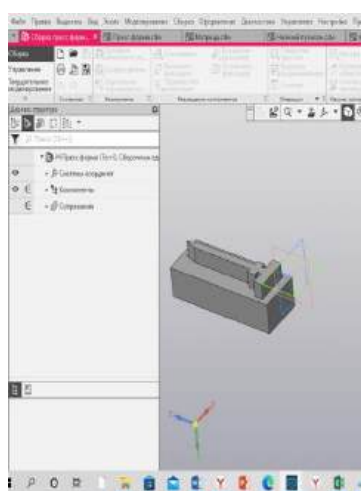
с водой. При температуре выше  $213^\circ C$  она превращается в пиррофосфорную кислоту  $H_4P_2O_7$  и очень хорошо растворима в воде. Обычно ортофосфорной кислотой называют 85%-й водный раствор (бесцветная сиропообразная жидкость без запаха). Растворима также в этаноле и других растворителях.

Необходимые компоненты взвешены с помощью лабораторных весов с точностью  $\pm 2$  г, а некоторые компоненты на лабораторных аналитических весах ВЛР-200 с точностью  $\pm 0,5$  мг. Далее все взвешенные компоненты смешивали с помощью специального оборудования — мешалки. Смешивание компонентов производили сначала в сухом, затем в мокром виде, то есть с добавлением жидких компонентов [5] (рис. 3).

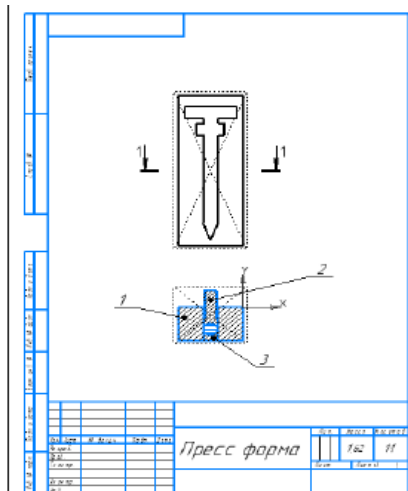


Рис. 3. Оборудование для смешивания компонентов

Формование керамического изолятора из корундового сырья происходит методом ручного формования с помощью пресс-формы, конструкция которой разработана в системе автоматизированного проектирования Компас-3D и распечатана на 3D-принтере, состоящей из матрицы, верхнего и нижнего пуансонов (рис. 4) [8, 9].



а



б



в

Рис. 4. Формование керамического изолятора:  
а — 3D-модель; б — чертеж; в — 3D-печать пресс-формы

После выбора состава, готовим массу для экспериментальных образцов. Смешиваем 25 % электрокорунда мелкой фракции (менее 1 мм) с 25 % электрокорунда крупной фракции (1—3 мм), добавляем 25 % огнеупорной глины и 25 % дроблённого шамота. Весь состав смешиваем с фосфатным связующим (ортофосфорной кислотой)  $H_3PO_4$ . Пресс-форму смазываем маслом, далее из полученной массы формуем изделия, т. е. насыпаем полученную массу и равномерно распределяем по форме [3—5].

Формование изделий из порошкообразных керамических масс влажностью менее 10 % носит название полусухого прессования. Сущность способа заключается в том, что тщательно перемешанную керамическую массу в виде порошка влажностью 12 % подвергают спрессовыванию в механических и гидравлических прессах под достаточно высоким давлением.

Изделия, изготовленные этим способом, отличаются небольшой усадкой и меньше деформируются в процессе сушки и обжига, поэтому полусухое прессование получило наиболее широкое применение в производстве изделий строительного назначения. После формовки получили корундовые изоляторы на фосфатной связке (рис. 5).



Рис. 5. Экспериментальные образцы-изоляторы после формовки

Также одним из не менее значимым этапом в производстве корундовых изделий является термическая обработка, которая состоит из сушки и обжига. Корундовые материалы, сушат медленно. Для этого использовали сушильный шкаф. Образцы сушили в течение одних суток при температуре 50 °С (рис. 6).



Рис. 6. Сушильный шкаф

Технология изготовления корундовых изделий регламентирует медленный нагрев изделий до 1400 °С и выдержку в течение 30 минут. Для обжига образцов использовали муфельную печь. Муфельная печь — нагревательное устройство, предназначенное для нагрева разнообразных материалов до определенной температуры. Главной особенностью этой печи является наличие муфеля, защищающего обрабатываемый материал и являющегося главным рабочим пространством муфельной печи (муфель предохраняет материал или изделие от контакта с топливом и продуктами его сгорания, в том числе газами). После нагрева до заданной температуры и выдержки муфель извлекается из печи для охлаждения и на его место устанавливается другой. Муфельная электрическая печь с керамическим муфелем достаточно универсальна и используется в разных сферах производства и промышленности [10].



Рис. 7. Керамические изоляторы после обжига в муфельной печи



Керамические изоляторы используются в печах для термической обработки деталей, где в закалочных агрегатах наиболее ответственными элементами печи являются изоляторы, из которых выполнены конструкции крепления нагревательных элементов. В службе указанные элементы печи испытывают воздействие колебаний температур, обусловленных режимом закалки металлических изделий, и контактом их с фехралевыми и нихромовыми нагревателями, где возникает зона с максимальной температурой до 1200 °С. Непрерывный срок эксплуатации импортного изделия в агрегате не более 16 месяцев, следовательно, это приводит к старению и необходимости замены данного материала, закупка которого требует больших финансовых затрат. Из-за отсутствия запаса импортных материалов для замены изоляторов в импортных печах использована конструкция и технология их изготовления из огнеупорного алюмосиликатного материала, с помощью применения аддитивной технологии 3D-печати. Элементы и конструкции таких печей, изготовленные с использованием керамического изолятора, не уступают по качеству импортным, а по термостойкости и эксплуатационным свойствам превосходят зарубежные аналоги по сроку службы до 5 лет [10].

Таким образом, описанные керамические изоляторы подходят для термических агрегатов и могут решить проблему импортозамещения детали.

Потенциальными потребителями продукции ООО "БиоПромИнвест" (г. Уфа, Республика Башкортостан) успешно проводятся работы по обеспечению печи фирмы "Aichein" (Австрия) для термической обработки деталей автомобилей (шестерен, осей, валов, червяков и др.) керамическими элементами футеровки, в том числе и изоляторами для крепления электрических нагревательных элементов в термических агрегатах.

Производимые по разработанной авторами технологии керамические изоляторы подходят для 100%-й замены ими зарубежных элементов печей "Aichelin", "Recumat", "Loi" и др.

Основные преимущества керамических изоляторов на фосфатных связующих в том, что они сохраняют постоянство объема, обеспечивают высокие механические, электрические свойства, отличаются сравнительной простотой изготовления и невысокой стоимостью, высокими эксплуатационными характеристиками. Для определения прочности образцы испытывали на ручном гидравлическом прессе. По химическому составу электрокорунд является чистейшим глиноземом, благодаря которому имеет высокую термовыносливость и степень твердости (см. таблицу, рис. 8).

В таблице показана зависимость прочности материалов в зависимости от температуры спекания в интервале 700—1400 °С. С увеличением температуры от 1100 до 1200 °С прочность по-

вышается и достигает максимальных значений (60—85 МПа) при 1200 °С, а затем снижается.

Предел прочности на сжатие образцов

| Номер образца | Температура обжига | Предел прочности на сжатие (МПа) |
|---------------|--------------------|----------------------------------|
| 1             | 700                | 26                               |
| 2             | 800                | 34                               |
| 3             | 1100               | 62                               |
| 4             | 1200               | 82                               |
| 5             | 1400               | 57                               |



Рис. 8. Поверхность 4-го образца, обожжённого при температуре 1200 °С, при использовании ручного гидравлического пресса

Прочность керамики без добавки нарастает медленнее с температурой спекания и достигает лишь 65 МПа при 1250 °С. Это связано со сравнительно замедленным уплотнением таких образцов. Термообработка при 1250—1350 °С приводит к снижению прочности образцов до практически одинаковых значений 55—60 МПа, что связано, по-видимому, с ростом кристаллов [5].

### Заключение

Ортофосфорная кислота эффективно способствует уплотнению керамики при спекании, позволяет понизить температуру спекания для получения плотноспеченной керамики на более чем 500 °С и избежать тем самым разложения при обжиге. При температуре обжига 1250 °С, соответствующей достижению максимального уровня свойств, не происходит значительного роста зерна, а дальнейшее повышение температуры спекания приводит к собирательной рекристаллизации и снижению уровня свойств.

На основании проведенных испытаний керамических элементов руководство ООО "БиоПромИнвест" в г. Уфа Республики Башкортостан рекомендовало к применению новую технологию производства керамических изоляторов, разработанную в лаборатории кафедры, для производства новых партий изделий в целях 100%-й замены ими зарубежных элементов печей "Aichelin", "Recumat", "Loi" и другие.

В результате научно-технического решения данный проект участвует в конкурсе "Студенческий стартап-прект", также подана заявка в Роспатент на государственную регистрацию интеллектуальной собственности.

## Литература

1. Evtushenko E. I., Moreva I. Yu., Sysa O. K., Bedina V. I., Trunov E. M. Control of the structural and phase characteristics of raw materials in the technology of fine ceramics // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2011. V. 51. № 6. P. 397—398.
2. Vereshchagin V. I., Buruchenko A. E., Menshikova V. K., Mogilevskaya N. V. Ceramic materials based on diopside // *Glass and Ceramics*. 2011. V. 67. № 11—12. P. 343—346.
3. Шевченко В. Я., Баринов С. М. Техническая керамика. — М.: Наука, 1993. — 187 с.
4. Кайнарский И. С., Дегтярева Э. В., Орлова И. Г. Корундовые огнеупоры и керамика. — М.: Металлургия, 1981. — 168 с.
5. Шаяхметов У. Ш. Фосфатные композиционные материалы и опыт их применения. — Уфа: РИЦ "Старая Уфа", 2001. — 150 с.
6. Батршина Г. С. Компьютерное проектирование пресс-формы для керамического изделия // *Norwegian Journal of development of the International Science*. 2019. № 11—1(36). С. 30—34.
7. Ганин Н. Б. Автоматизированное проектирование в системе Компас-3D. — М.: ДМК Пресс, 2010. — 360 с.
8. Батршина Г. С. Проектирование 3D-моделей композиционных изделий в среде Компас-3D: уч.-метод. пособие. — Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2022. — 102 с.
9. Батршина Г. С., Батршина С. И., Ситдикова С. А. Метод проектирования профилированного изделия в среде Компас-3D // *Индустриальная Россия: вчера, сегодня, завтра: сб. статей по материалам международной научно-практической конференции*. — Уфа: Изд. НИЦ Вестник науки, 2019. С. 28—34.
10. Батршина Г. С., Шаяхметов А. К., Ахметов А. В., Абзалов Р. В., Галиев Д. А. Новая технология изготовления керамического изолятора для термической печи // *Мат. VII Всероссийской науч.-практ. конф. с международным участием "Современные технологии композиционных материалов"*. — Уфа: РИЦ БашГУ, 2022.

## AUTOMATED DESIGN OF CERAMIC PRODUCTS

G. S. Batrshina, S. I. Batrshina, A. V. Akhmetov  
Bashkir State University, Ufa, Bashkortostan, Russia

*The article describes the technology of preparation of ceramic mass, binder, mixing of mass components and molding of ceramic product (insulator) in a mold modeled and printed on a 3D printer, usually features the mass technology of crushing specimens, grinding crystals of raw materials of the sidewall, as well as laboratory equipment involved in the technological process. The developed ceramic product is used in furnaces for heat treatment of boron tool parts, where in quenching units the most important elements of the furnace are insulators, from which the fastening structures of the heating elements are made. Based on the results of the conducted research, a technology for obtaining new refractory raw materials for the ceramic industry and composite materials based on phosphate binders is proposed.*

**Keywords:** 3D-model and mold, import substitution, ceramic insulator, design, electrocorundum, chamotte, phosphate binders.

Батршина Гузель Сайфулловна, доцент.

E-mail: guzel.com@mail.ru

Батршина Светлана Ильфатовна, студентка 4 курса бакалавриата экономического факультета.

E-mail: guzel.com@mail.ru

Ахметов Александр Вадимович, студент 4 курса бакалавриата инженерного факультета.

E-mail: guzel.com@mail.ru

Статья поступила в редакцию 12 мая 2022 г.

УДК 381.3.06

DOI: 10.52190/2073-2597\_2022\_3\_9

EDN: NZWRIW

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ВИЗУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ARCHIMATE

А. И. Зубкова; Ю. П. Королёва; А. И. Власов, канд. техн. наук  
ФГБОУ ВО "Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)", Москва, Россия

*Проведен сравнительный анализ методик визуального моделирования архитектуры информационно-управляющих и материальных потоков предприятия на примере метода ArchiMate. Произведено обобщение и систематизация основных свойств языка визуального моделирования метода ArchiMate. Проведен сравнительный анализ, обобщены позитивные и негативные качества данного визуального языка для представления корпоративных и инженерных систем. Проанализированы такие функциональные факторы визуального моделирования, как качество и полнота реализуемой модели, инструменты, диаграммы, слои моделирования, семантическая целостность, возможность настройки, дублирование и гибкость визуализации. Учет функциональных факторов при выборе средств визуального моделирования позволяет создавать более открытые и расширяемые модели. Обобщены положительные стороны языка моделирования ArchiMate и даны рекомендации по его применению в условиях цифровой трансформации промышленности и внедрения компонентов "Индустрия 4.0" в производство.*

**Ключевые слова:** архитектура предприятия, язык визуального моделирования, ArchiMate, корпоративные и инженерные системы, семантическая целостность, визуализация, интегрированное представление, корпоративная система, диаграммы, интерфейс, графические инструменты.

С развитием тенденций цифровой трансформации промышленности и внедрения элементов концепции "Индустрия 4.0" в производство остро встает вопрос обеспечения управляемости и прозрачности цифрового производства на всех уровнях принятия решения. Решение данных вопросов связано с преодолением многих субъективных факторов, начиная от костности и прямого саботажа персонала и заканчивая проблемами развития цифровой среды обработки данных [1–3]. Для обеспечения требований цифровизации, развертывания "Фабрик будущего" и компонентов "Индустрии 4.0" необходимо иметь цифровую обобщенную модель интегрированного представления о производственных процессах предприятия, которое будет позволять проведение анализа изменений всех нужных аспектов. Управление производственными процессами через всеобщую цифровизацию посредством интегрированной информационной инфраструктуры — неотъемлемая задача развития любой компании [4, 5]. Чтобы наиболее точно представить и просчитать необходимые ситуации в последнее время все большее применение находят различные визуальные средства моделирования производственных структур и процессов. Из-за высокой вариативности множества различных средств визуального моделирования на рынке важной проблемой является выбор такого инструментария, который бы максимально учитывал уникальные процессы конкретного предприятия [6–8].

Каждое из предприятий по своему уникально, его собственные производственные процессы являются зачастую определяющими его конкурентных преимуществ, поэтому применения методов и средств их описания должно обеспечи-

вать как высокое качество и безопасность такой информации, так и простоту моделирования для минимизации случайной сложности в моделях архитектуры предприятия [9].

Анализируя рынок инструментов моделирования производственных систем, следует выделить методы и средства визуального моделирования, которые позволяют формализовать исследуемый производственный процесс с необходимым уровнем детализации для каждого из уровней принятия решения. Начиная от верхнего уровня обобщения — концептуального, где ставятся задачи на уровне лиц, принимающих решения (ЛПР) [10]. Уровня структурно-функциональной декомпозиции производственных структур и материальных потоков: IDEF (Integrated DEfinition), ARIS (Architecture of Integrated Information Systems — проектирование интегрированных информационных систем), BPMN (Business Process Model and Notation — нотация и модель бизнес-процессов) и др. [11–19] до уровня управления информационными потоками: UML (Unified Modeling Language — унифицированный язык моделирования), IDEF1X, ERD (Entity-Relationship diagram — ER-диаграмма) и др. [6, 20–22]. Существенным недостатком каждого из указанных методов является их узкоспециализированность и изолированность элементов используемого визуального языка друг от друга. Концептуально-абстрактные методы ориентированы на описание исследуемых процессов в общем, в виде совокупности семантических категорий и абстракций. Структурно-функциональные методы большее внимание уделяют деталям. BPMN моделирует бизнес-процессы. Информационные методы используются для детального проектиро-

вания ИТ-решений. Однако построение обобщенной визуальной модели как с горизонтальными, так и вертикальными связями крайне затруднено. Одно из перспективных решений, которое направлено на реализацию комплексных моделей производственных систем, это среда ArchiMate [23—25].

ArchiMate, как язык описания системной инженерии и моделирования производственной архитектуры (Architecture description language (ADL)), был разработан с возможностью расширения, сохраняя четкую и ортогональную структуру [23—25]. Имея все предпосылки стать открытым стандартом, он соединяет в себе несколько областей знаний, такие, как информационные технологии (ИТ), производство и его материальные потоки. Данный метод визуального моделирования подходит для анализа процессов, физической структуры предприятий, различных стратегий и технологий. Современная концепция управления производственным предприятием должна основываться на постоянной минимизации предприятием издержек и потерь. Такая концепция получила название "Бережливое производство" [26—29]. Она предусматривает вовлечение в процесс улучшения производственной структуры и процессов всех сотрудников с максимальным учетом запросов потребителя. Среда ArchiMate позволяет учитывать все требования и постулаты "Бережливого производства" с наилучшей степенью интерпретируемости визуальных метафор и детализации среди большинства визуальных языков моделирования [29].

В качестве положительных аспектов модели ArchiMate следует отметить компактность и связность языка, прагматичность, независимость и расширяемость языка. Целью работы — сравнительный анализ применения среды ArchiMate с другими средами визуального моделирования и выявление его позитивных и негативных качеств для конкретных приложений.

### 1. Свойства и основные понятия языка ArchiMate

Построение визуальных моделей с использованием среды ArchiMate осуществляется послойно. Выделяют три слоя: бизнес слой, слой приложений и технологический слой (рис. 1) [23—25].

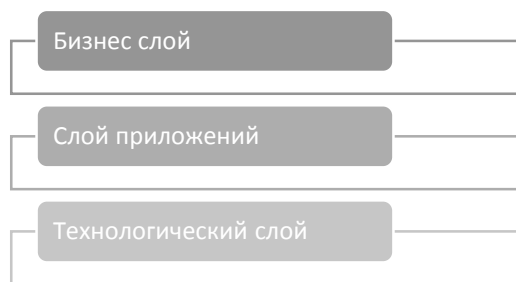


Рис. 1. Слои языка ArchiMate

В бизнес слое описываются деятельность и развитие предприятия, основные бизнес-процессы и сервисы, исполнители и их роли, а также используемая информация (бизнес-объекты).

В слое приложений представлены приложения, их функциональность и отношения между приложениями; сервисы приложений, оказывающие поддержку бизнес слою, а также основные объекты данных, используемые приложениями.

В технологическом слое представлены узлы, на которых выполняются приложения, они формируют физическую реализацию компонентов приложений или объектов данных, и инфраструктурные сервисы (например обработка, хранение, коммуникации), необходимые для выполнения приложений.

Взаимосвязь между элементами модели задается посредством отношений, которые показывают вид их взаимоотношений. Они разбиваются на три класса

1. Структурные — моделирование структурных зависимостей элементов:

- *композиция* — показывает, что объект включает в себя другие объекты;

- *объединение* — показывает, что элемент образует группу, которая состоит из других объектов;

- *назначение* — создает связь между активными элементами и поведением, которые выполняются этими элементами;

- *реализация* — связывает логическую сущность с сущностью, которая ее реализует;

- *использование* — моделирует использование сервисов процессами, функционалами или взаимодействиями, а также обеспечивает доступ к интерфейсам ролями, компонентами или совместными работами;

- *доступ* — моделирует доступ элементов поведения к бизнес-объектам или объектам данных;

- *ассоциация* — моделирует отношение между объектами, которое не охватывается другим, более характерным отношением;

2. Динамические:

- *запуск* — показывает причинные или временные отношения между процессами;

- *передача* — показывает как передается информация между процессами;

3. Служебные:

- *группирование* — обозначает объединение объектов по общему признаку;

- *связывание-разветвление* — используется для связывания динамических отношений одного типа;

- *специализация* — показывает, что объект является специализацией другого объекта.

### Методика создания визуальной модели

Проиллюстрируем методику разработки модели ArchiMate на примере решения задачи по цифровизации аудиосигнала (рис. 2).





### Сравнительный анализ методик визуального моделирования производственных систем

Кроме технологии ArchiMate на рынке CASE-средств реинжиниринга производственных систем представлен целый ряд альтернативных решений: IDEF [7—9], BPMN [15—17] и ARIS [18, 19]. Указанные технологии обеспечивают

проведение анализа производственных систем с различных точек зрения и имеют в своём арсенале широкий набор визуальных инструментов [29, 30]. Используя методику сравнительной оценки методов визуального моделирования, предложенную в [31], проведен сравнительный анализ основных из визуальных методов (табл. 2, рис. 3).

Таблица 2

Сравнительный анализ нотаций ArchiMate, ARIS, BPMN, IDEF

| Критерии сравнения   | ArchiMate   | ARIS   | BPMN   | IDEF   |
|--|---|--|--|--|
| Возможность описания различных структурных элементов                   | ✓   | ✓  | ✓  | ✓  |
| Описание процесса создания архитектуры предприятия                     | ✓   | ✓  | Используется крайне редко  | Используется крайне редко  |
| Использование архитектуры предприятия в целом                          | ✓   | ✓  | Используется крайне редко  | Используется крайне редко  |
| Использование архитектуры предприятия по предметным областям           | ✓   | ✓  | ✓  | ✓  |
| Визуальное схематичное отображение архитектуры предприятия             | ✓   | ✓  | Используется крайне редко  | Используется крайне редко  |
| Восприятие архитектуры предприятия специалистами различных направлений | ✓   | ✓  | ✓  | ✓  |
| Доступность методики   | ✓   | ✓  | ✓  | ✓  |
| Подход к проектированию  | Процессный  | Процессный   | Процессный   | Процессный   |
| Основное назначение  | Описание организации работ офисных работников посредством схем      | Создание регламентирующих документов и схем в крупных распределённых компаниях   | Создание четкого представления о процессе от его начала до конца                 | Создания функциональных моделей, отражающих структурированное изображение функций производственной системы или среды, а также информации и объектов, связывающих эти функции |
| Отличительная черта  | Позволяет расширять архитектуру с помощью собственных точек зрения  | Фирменная методология архитектуры предприятия                                    | Горизонтальная ориентация протекания процесса                                    | Акцентированность на соподчиненность объектов  |
| Поддержка архитектурного моделирования                                 | Ориентация на архитектурные диаграммы                               | Ориентация на архитектурные диаграммы  | Ориентация на диаграммы бизнес-процессов   | Ориентация на диаграммы бизнес-процессов   |
| Возможность декомпозиции   | Неограниченная  | Неограниченная   | Неограниченная   | Неограниченная   |
| Программные продукты   | Archi 4.6.0<br>QPR Enterprise Architect<br>Modelio BA EA<br>iServer | MS Visio<br>ARIS Express<br>ARIS Architect & ARIS Designer<br>ARIS for ArchiMate | BizAgi Modeler<br>ARIS Express<br>Visual Paradigm<br>Business Studio<br>ELMA BPM | Bpwin<br>Visual Paradigm<br>Business Studio<br>Dia Diagram Editor  |
| Лёгкость изучения  | Легко   | Очень сложно   | Легко  | Легко  |
| Стоимость  | Бесплатно   | Очень дорого   | Бесплатно  | Бесплатно  |

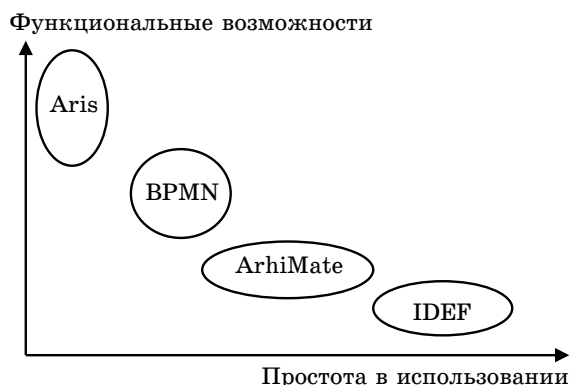


Рис. 3. Качественная оценка методов визуального моделирования по критерию функционал/простота

ArchiMate, как язык описания архитектуры (ADL) для организационных систем, был разработан с возможностью расширения, сохраняя чёткую и ортогональную структуру и является открытым стандартом. Он соединяет в себе несколько форм представления структуры, материальных и информационных потоков. Данный язык подходит для описания процессов, физической структуры предприятий, различных стратегий и технологий.

Технологии BPMN более сосредоточены и позволяют большее внимание уделять деталям. BPMN-модели строятся от ролей активных элементов (т. е. таких элементов, которые способны самостоятельно принимать решения) системы [32].

Модели IDEF отражают последовательность выполнения функций объектами через создание иерархической графической модели, показывающей: что, как и кем делается в рамках функционирования предприятия.

Технологии ARIS обеспечивают представление о деятельности предприятия и визуализации процессов в виде графических моделей, удобных для понимания и комплексного анализа.

Представления взаимосвязаны, и зачастую это именно комбинация представлений вместе с лежащими в их основе взаимосвязями, которая является наилучшим способом описания и передачи архитектуры организации.

Рассмотренные технологии являются достаточно популярными и широко используемыми в сфере разработки и анализа организационной архитектуры предприятия. Они позволяют обеспечить прозрачность и управляемость производственных процессов и тем самым ускоряют цифровую трансформацию предприятия.

#### Сравнительный анализ программного инструментария визуального моделирования производственных систем

Проанализируем основные инструментальные средства, реализуемые рассмотренные выше методы визуального моделирования.

Archi 4.6.0 (<https://www.archimatetool.com>) — инструментальное средство, реализующее метод

ArchiMate (PhillipBehauvoir). Данный продукт с открытым кодом для моделирования на всех уровнях архитектуры предприятия. Инструмент разработан на языке Java и представляет собой модульную систему, что позволяет создавать расширения с использованием плагинов на основе интегрированной среды разработки Eclipse IDE. Преимуществами Archi можно считать высокую доступность, так как данный продукт является бесплатным и поддерживает русский язык. Его отличают кроссплатформенность (позволяющая работать на Windows 7, 8, 10, Mac OS X и Linux), лёгкость в изучении и использовании. Программный продукт Archi позволяет разрабатывать и создавать собственные многоцветные шаблоны с помощью инструментария Canvas Modeling Toolkit, объединяемые в прикладные базы данных моделей или использовать его в качестве инструмента предварительного проектирования для набросков концепций и шаблонов моделей.

К недостаткам данного инструмента можно отнести отсутствие возможности генерировать отчётную документацию (для генерации отчётов Archi использует специализированное средство Jasper Report в различные форматы), отсутствие многопользовательской поддержки и возможные сложности с универсальным описанием данных. Программное средство Archi ограничено в функциональном плане и не имеет поддержки многопользовательского режима, что существенно снижает его возможности для решения задач в крупных организациях. Archi удовлетворяет потребности большинства корпоративных разработчиков и связанных с ними заинтересованных сторон, используется во всем мире банками, страховыми компаниями, промышленностью, учебными организациями, университетами и др. организациями.

Для решения задач структурно-функционального моделирования с использованием методов IDEF широкое распространение получило решение AllFusion Process Modeler (BPwin) (Broadcom, [www.broadcom.com](http://www.broadcom.com)). Данное решение поддерживает структурно-функциональное моделирование, моделирование потока работ и потока данных. Соответствующие диаграммы реализованы на основе стандартов IDEF0, IDEF3 и DFD ([soware.ru](http://soware.ru)). У него простой графический интерфейс, легко воспринимается, позволяет выполнять настройки под пользователя, что упрощает процесс моделирования. Позволяет аккумулировать информацию по процессам, представлять ее в моделях и включать в отчеты. Имеет встроенные средства верификации и валидации моделей, возможно контролировать некорректные связи и представления элементов моделей. Это повышает качество моделей и улучшает возможности интеграции с другими средствами моделирования.

ARIS Express имеет модульную структуру, которая позволяет создавать диаграммы, содержащие неограниченное количество объектов моделирования с различным уровнем иерархии.

Проведем сравнительный анализ рассмотренных инструментов методом многокритериального ранжирования, характеризующимся множеством неоднородных критериев [31] по 5-бальной шкале, перечисленным в табл. 3.

В табл. 4 приведены результаты сравнительного анализа программных продуктов, который позволит облегчить выбор инструмента моделирования производственной системы. Для формирования наборов данных был проведен опрос пилотных групп специалистов численностью 20—30 человек, что позволяет достаточно точно прогнозировать результаты опросов, полученных при опросах 1—3 тыс. человек.

Полученные результаты оценок были округлены до единиц в большую сторону. Представленная выборка объемом 28 опрошенных для данного исследования является репрезентативной.

Из анализа данных таблицы можно сделать вывод, что локальный проект по формальному описанию статических бизнес-процессов целесообразно реализовать средствами ArchiMate, разработку моделей динамических процессов целесообразно выполнять с использованием методов IDEF или BPMN, ну а длительные, системные, корпоративные проекты лучше всего реализовать в ARIS.

Таблица 3

Характеристика инструментария программных продуктов (в баллах)

| Характеристики программных продуктов         | Оценка в баллах | Примечание   |
|--|-----------------|--|
| Поддержка нотации                            | 1               | Нет поддержки нотации  |
|  | 2               | Во многом соответствует нотации  |
|  | 3               | Поддержка ArchiMate / ARIS   |
|  | 4               | Поддержка ArchiMate / ARIS и иных нотаций                              |
|  | 5               | Поддержка ArchiMate и ARIS.  |
| Режим работы (возможность совместной работы) | 1               | Многопользовательская поддержка исключена                              |
|  | 2               | Однопользовательский режим   |
|  | 3               | Многопользовательский режим в формате on-line                          |
|  | 4               | Многопользовательский режим в формате off-line                         |
|  | 5               | Однопользовательский + многопользовательский + генерация между ними    |
| Стоимость программно-технического решения    | 1               | Очень дорогое решение  |
|  | 2               | Дорогое решение, учитывая возможности                                  |
|  | 3               | Недорогое решение  |
|  | 4               | Недорогое решение, но требует доп. затрат на расширения                |
|  | 5               | Бесплатное решение   |
| Кастомизация функционала/модели              | 1               | Нет возможности кастомизации   |
|  | 2               | Сложность процесса, требующий доп. навыков                             |
|  | 3               | Возможность ограничения палитры логической модели для каждой диаграммы |
|  | 4               | Возможность разработки своих блоков/шаблонов                           |
|  | 5               | Возможность создания собственной нотации                               |
| Гибкость отчётности                          | 1               | Нет возможности создания отчётов                                       |
|  | 2               | Трудности с нестандартными отчётами                                    |
|  | 3               | Ограниченность в создании отчётов со сторонним сервисом                |
|  | 4               | Создание отчётов с помощью сторонних сервисов/компонентов              |
|  | 5               | Автоматическое создание отчётов  |
| Синхронизация                                | 1               | Не осуществляет импорт/экспорт   |
|  | 2               | Ограниченный импорт  |
|  | 3               | Ограниченный экспорт   |
|  | 4               | Неполная поддержка импорта/экспорта                                    |
|  | 5               | Неограниченный импорт/экспорт  |
| Удобство использования                       | 1               | Неудобный интерфейс  |
|  | 2               | Не функциональный интерфейс  |
|  | 3               | Удобный интерфейс для разработчика                                     |
|  | 4               | Удобный пользовательский интерфейс                                     |
|  | 5               | Удобный интерфейс во всех отношениях                                   |
| Обучение                                     | 1               | Возникновение трудности с обучением                                    |
|  | 2               | Требование иных навыков  |
|  | 3               | Требование навыков программирования                                    |
|  | 4               | Лёгкость обучения  |
|  | 5               | Применение с первого дня   |

Таблица 4

Бальная оценка программных инструментов визуального моделирования производственных систем

| Задача   | Методология визуального проектирования |           |      |      |
|--|--|-----------|------|------|
|  | ARIS                                   | ArchiMate | IDEF | BPMN |
| Статический проект (локальный разовый проект по описанию бизнес-процессов)         |  |           |      |      |
| 1. Описание одного бизнес-процесса с точки зрения контроля и управления            | 3                                      | 5         | 5    | 5    |
| 2. Описание функциональных возможностей новой системы управления на верхнем уровне | 3                                      | 5         | 3    | 3    |
| Динамический проект (описание деятельности компании с различных точек зрения)      |  |           |      |      |
| 1. Описание организационной структуры  | 5                                      | 4         | 4    | 3    |
| 2. Описание функциональных возможностей системы                                    | 4                                      | 5         | 5    | 4    |
| 3. Создание логической и физической моделей данных                                 | 3                                      | 3         | 5    | 4    |



По итогам анализа следует отметить широкий функционал технологии ArhiMate и ее ориентацию на моделирование малых и средних производственных систем. Данная технология обладает следующими преимуществами:

- является бесплатным, кроссплатформенным и общедоступным;
- развитая система методического сопровождения проекта и справочная система;
- прост и доступен для понимания неподготовленного пользователя;
- является межплатформенным с открытым исходным кодом;
- универсален и подходит для любой предметной области;
- предоставляет возможность генерации отчетов с визуализацией разработанных моделей, в виде скомпилированного HTML-документа, экспорт моделей в PDF, PPT, DOC(X), RTF и ODT-форматы с помощью Java-движка Jasper Report;
- позволяет выполнять кастомизацию шаблонов для отчетов;
- имеет широкую библиотеку плагинов для расширения;

Среди недостатков технологии ArhiMate следует отметить:

- отсутствует русская документация и меню нерусифицировано;
- малофункциональная подсистема формирования отчетности;
- не позволяет проводить детальное моделирование наборов данных;
- не позволяет проводить детальное моделирование бизнес-процессов.

### Заключение

Для моделирования организационных структур технологии ArhiMate позволяют сформировать четкое понимание принципов работы моделируемой системы, а также системное представление стратегий и технологий. Соединение в себе различных областей знаний дает возможность описать практически любую глобальную систему. Среда активна и независима и ее возможности позволяют эффективно настроить среду разработки и сопровождения моделей производственной системы в целом. Однако она не позволяет сформировать четкую и детальную картину отдельных частей производственной системы.

*Отдельные результаты получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по проекту №0705-2020-0041 "Фундаментальные исследования методов цифровой трансформации компонентной базы микро- и наносистем".*

### Литература

1. Курносенко А. Е., Шахнов В. А. Цифровая трансформация при подготовке производства изделий электроники // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 2. С. 51—56.
2. Власов А. И., Михненко А. Е. Информационно-управляющие системы для производителей электроники // Производство электроники. 2006. № 3. С. 15—21.
3. Журавлева Л. В., Толкачев А. В., Мухтарова А. А. Анализ перспектив развития цифрового общественного пространства // Технологии инженерных и информационных систем. 2019. № 4. С. 67—73.
4. Левин И. В., Курносенко А. Е., Машина Н. А. Решения для проектирования, моделирования и оптимизации производств электронной аппаратуры // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2018. № 1(169). С. 26—32.
5. Журавлева Л. В., Кирилин В. Д., Репников П. О., Усюкин М. А. Анализ интеграции технологии "Фабрик будущего" и "Индустрия 4.0" // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2020. № 3(179). С. 45—51.
6. Калынов Г. Н. CASE технологии. Консалтинг при автоматизации бизнес-процессов. — М.: Горячая линия-Телеком, 2000. — 320 с.
7. Власов А. И., Иванов А. М. Визуальные модели управления качеством на предприятиях электроники // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2011. № 11. С. 34.
8. Роджер Сешнс. Сравнение четырех ведущих методологий построения архитектуры предприятия [Электронный ресурс]. URL: <https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/ee914379.aspx>. (дата обращения: 05.07.2017).
9. Власов А. И., Маринова Е. А. Анализ методов визуального моделирования сложных систем // Динамика сложных систем — XXI век. 2020. Т. 14. № 3. С. 5—22.
10. Журавлева Л. В., Власов А. И. Визуализация творческих стратегий с использованием ментальных карт // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2013. № 1(21). С. 133—140.
11. Shakhnov V. A., Kurnosenko A. E., Demin A. A., Vlasov A. I. Industry 4.0 visual tools for digital twin system design // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. V. 1295. P. 864—875.
12. Shakhnov V. A., Juravleva L. V., Vlasov A. I. Knowledge-based model for formal representation of complex system visual models // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. V. 1251 AISC. P. 618—632.
13. Vlasov A. I., Demin A. A. Visual methods of formalization of knowledge in the conditions of the synchronous technologies of system engineering // ACM International Conference Proceeding Series. 13. Сер. "CEE-SECR 2017 — Proceedings of the 13th Central and Eastern European Software Engineering Conference in Russia". 2017. P. 3166098.
14. Власов А. И., Журавлева Л. В., Казаков В. В. Методы формализации когнитивной графики и визуальных моделей с использованием схем XML // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2021. № 1(134). С. 51—77.
15. Власов А. И., Журавлева Л. В., Казаков В. В. Применение визуальных инструментов BPMN для моделирования технологической подготовки производства // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2020. № 1(177). С. 14—26.

16. Власов А. И., Журавлева Л. В., Казаков В. В. Анализ средств разработки визуальных BPMN-моделей сложных систем // Динамика сложных систем — XXI век. 2020. Т. 14. № 1. С. 5—22.
17. Власов А. И., Гоношилов Д. С. Системный анализ производства с использованием визуальных инструментов BPMN // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2019. № 3(175). С. 10—16.
18. Власов А. И. Системный анализ производства с использованием визуальных инструментов методологии ARIS // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2018. Т. 1. С. 21—32.
19. Карпунин А. А., Смагулов Н. Б., Миронов А. А. Процессно-событийная модель ЕРС для разработки визуальных моделей производственных систем // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". 2021. Т. 1. С. 147—154.
20. Буч Г., Максимчук Р. А. и др. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений. — М.: Изд-во Вильямс, 2010. — 720 с.
21. Якобсон А., Буч Г., Рамбо Дж. Унифицированный процесс разработки программного обеспечения. — СПб.: Питер, 2002. — 496 с.
22. Закис А. RUP и другие методологии разработки ПО: принципы сравнения методологий разработки ПО // КомпьютерПресс. 2006. № 8. С. 158—159.
23. Кочешков А. Э., Карпунин А. А. Технология Archimate — новый стандарт моделирования архитектуры предприятия // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2017. № 4(168). С. 3—9.
24. Рубенчик А. В. Моделирование архитектуры предприятия. Обзор языка ArchiMate // Information Management. 2014. № 6. С. 55—59.
25. Рубенчик А. В. ArchiMate 3.0 — обзор основных изменений // Практика проектирования систем. 2016. № 10.
26. Власов А. И., Ганев Ю. М., Карпунин А. А. Системный анализ "Бережливого производства" инструментами визуального моделирования // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2015. № 4(160). С. 19—24.
27. Власов А. И., Ганев Ю. М., Карпунин А. А. Картирование потока создания ценностей в концепции "Бережливого производства" // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2016. № 2(162). С. 23—27.
28. Власов А. И., Ганев Ю. М., Карпунин А. А. Система 5S-технология создания эффективного рабочего места в концепции "Бережливого производства" // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2016. № 1(161). С. 65—68.
29. Naumenko A., Vlasov A. Analysis of visual modeling tools development for complex production systems // Lecture Notes in Information Systems and Organisation. 2022. P. 335—346.
30. Shakhnov V., Juravleva L., Vlasov A. Analysis of data formats of visual models of system design in conditions of synchronous design technologies // CEUR Workshop Proceedings. 2021. P. 34—43.
31. Shakhnov V. A., Vlasov A. I. Visual methodology for the multi-factor assessment of industrial digital transformation components // Lecture Notes in Information Systems and Organisation. 2021. P. 57—65.
32. Vlasov A. I., Kurnosenko A. E., Juravleva L. V., Lysenko O. A. Trend analysis in the development of factories of the future, taking into account digital transformation of active systems // ACM International Conference Proceeding Series. DEFIN 2021. 2021. P. 3490881.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF ARCHIMATE VISUAL MODELING TECHNOLOGY

A. I. Zubkova, Ju. P. Koroleva, A. I. Vlasov  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

*The article presents a comparative analysis of visual modeling techniques for the architecture of information management and material flows of an enterprise using the ArchiMate method as an example. The generalization and systematization of the main properties of the visual modeling language of the ArchiMate method has been carried out. A comparative analysis was carried out, the positive and negative qualities of this visual language were summarized for the presentation of corporate and engineering systems. Such functional factors of visual modeling as: the quality and completeness of the implemented model, tools, diagrams, modeling layers, semantic integrity, customization, duplication and visualization flexibility are analyzed. Considering functional factors when choosing visual modeling tools allows you to create more open and extensible models. Based on the results of a comparative analysis, the positive aspects of the ArchiMate modeling language are summarized and recommendations are given for its use in the context of the digital transformation of industry and the introduction of Industry 4.0 components into modern production.*

**Keywords:** enterprise architecture, visual modeling language, ArchiMate, enterprise and engineering systems, semantic integrity, visualization, integrated view, enterprise system, diagrams, interface, graphical tools.

Зубкова Александра Ильинична, бакалавр.  
E-mail: Alex2000zu@yandex.ru  
Королёва Юлия Павловна, бакалавр.  
E-mail: yukorolyova1@yandex.ru  
Власов Андрей Игоревич, доцент.  
E-mail: vlasovai@bmstu.ru

Статья поступила в редакцию 21 июня 2022 г.

УДК 658.513

DOI: 10.52190/2073-2597\_2022\_3\_17

EDN: OXOIDG

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТРЕБОВАНИЯМИ КАК ИНСТРУМЕНТ ОЦЕНКИ ХОДА ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОЕКТА

О. В. Жданова

Акционерное общество «Прорыв», Москва, Россия

О. Н. Столяров

Акционерное общество «Атомэнергопроект», Москва, Россия

*Представлена инновационная схема применения концепции контроллинга для процесса управления требованиями на примере проекта "Прорыв". Цель работы — показать, каким образом с помощью технических решений можно использовать информационную систему управления требованиями не только как базу актуальных требований, но и в качестве инструмента контроля хода выполнения проекта на всех стадиях жизненного цикла, включая НИОКР, обеспечивая таким образом информационно-аналитическую поддержку процессов принятия решений при управлении проектом.*

**Ключевые слова:** система управления требованиями, контроллинг, рейтинг проекта, требования проекта, алгоритм формирования сводного показателя проекта, проект "Прорыв".

Информационные системы управления требованиями используют в различных отраслях для учета требований.

Актуальность темы вызвана мировой тенденцией к цифровой трансформации. Объектами исследования данной работы являются технические и методологические решения для информационных систем управления требованиями (ИСУТ), нацеленные на контроль хода выполнения проекта с помощью внесенных в систему данных на примере проекта "Прорыв".

Проект "Прорыв" — один из главных мировых проектов в ядерной энергетике, реализуемый в России, направлен на создание новой технологической платформы атомной отрасли с переходом на замкнутый ядерный топливный цикл. Он должен обеспечить достижение нового качества ядерной энергетики (безотходной, безопасной, экологически чистой и конкурентоспособной). На территории Сибирского химического комбината в городе Северске Томской области строится опытно-демонстрационный энергетический комплекс (ОДЭК) в составе энергоблока с реактором БРЕСТ (на 300 МВт) со свинцовым теплоносителем и замыкающего ядерный топливный цикл пристанционного завода, который включает в себя модуль переработки облученного топлива (МП) и модуль фабрикаци/рефабрикаци (МФР) для изготовления твэлов из переработанного облученного ядерного топлива.

ОДЭК впервые в мире должен продемонстрировать устойчивую работу полного комплекса объектов на одной площадке, обеспечивающих замыкание топливного цикла [1].

Реактор БРЕСТ-ОД-300 станет прототипом будущих коммерческих АЭС, на нем будут отработаны и продемонстрированы преимущества перехода на реакторы на быстрых нейтронах и энергетика на основе замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) [2].

В проекте участвуют более 30 организаций — это организации Госкорпорации "Росатом", неотраслевые организации, научные институты и др. За каждой организацией закреплены требования, а все работы по проекту выполняются в соответствии с требованиями сотен нормативных документов (ФЗ, СТО, НП и т. д.). Возникает необходимость иметь единый инструмент, позволяющий контролировать тысячи проектных требований, закрепленных за организациями, а также отслеживать и фиксировать регулярные изменения в законодательстве и на них реагировать.

### Создание модуля контроллинга в ИСУТ

Практика контроллинга родилась в Англии как часть общепринятой практики бизнеса в соответствии с требованиями правил Company Acts, дошедшими из 1700-х гг. Сам термин controlling зародился в США, в 1970-е г. понятие контроллинга перекочевало в Западную Европу, а затем в начале 1990-х гг. распространилось по всему миру [3]. отождествлять контроллинг с контролем нельзя, так как английский глагол to control переводится не только как контролировать, но и как управлять, регулировать [4].

Для контроля проектных требований, их изменений и выполнения в 2020 г. в АО "Прорыв" в соответствии со стандартами [5, 6] и практиками Госкорпорации "Росатом" и требованиями локально-нормативных актов Госкорпорации "Росатом" были созданы информационные системы управления требованиями проектного направления "Прорыв" и внедрены процессы управления требованиями.

Эти системы содержат актуальные версии требований (~19000), источником которых являются технические задания и актуальные вер-

сии нормативных требований (~12000). Кроме требований в ИСУТ хранится информация о подрядчиках, календарных планах предоставления отчетной документации, ссылок на отчетную документацию, хранящуюся в информационной системе управления жизненным циклом, информация о трассировках требований к отчетной документации, информация о результатах проверок требований и приемки отчетной документации. Однако большое разнообразие данных и вариантов аналитических отчетов, автоматически формирующихся в ИСУТ, не позволяло сделать обобщающий вывод о ситуации в проекте в целом. Все формы отчетности, формируемые автоматически из информационных систем управления требованиями, отражают актуальные статистические показатели, а для сложного проекта крайне важно иметь механизм комплексной оценки ситуации в динамике и возможность проанализировать ситуацию за конкретные периоды, используя данные в ИСУТ.

Для решения задачи в 2021 г. для ИСУТ был разработан модуль контроллинга, позволяющий на основе хранимой информации делать заключения и контролировать ход выполнения всего проекта и его подпроектов. Модуль не является самостоятельным программным продуктом, он встроен в ИСУТ.

Контроллинг — это метод и модуль ИСУТ, предназначенный для информационно-аналитической и методической поддержки руководителей по контролю за ситуацией в проектах. Ключевыми отличиями выбранного метода контроля хода проекта от набора аналитических отчетов является комплексная система оценки, сведенная к одному унифицированному показателю — рейтингу.

Рейтинг — это сводный показатель по четырем этапам жизненного цикла работы с требованиями, а именно: утверждение ТЗ, распределение требований по исполнителям, трассировка требований к отчетным документам, проверка выполнения требований в отчетной документации.

Контроллинг в проекте "Прорыв" построен по принципу "от общего к частному", т. е. от общей оценки состояния дел в проекте до поэтапной декомпозиции ситуации вплоть до конкретных работ (ТЗ) или исполнителя.

#### Основные принципы контроллинга. Рейтинг

Основные принципы контроллинга, примененные в проекте "Прорыв":

- использование рейтинга как универсального показателя для оценки ситуации в проекте, подпроекте, в договоре (ТЗ) или у исполнителя;
- управление ходом проекта по отклонению рейтинга;

- использование рейтинга для управления мотивацией персонала.

Рейтинг, как универсальный показатель, позволяет измерять и сравнивать ситуацию в проекте в целом и в подпроектах разных уровней (МФР, БРЕСТ, МП и т. д.), в организациях (т. е. исполнителях требований) или в конкретных ТЗ (договорах), требования которых внесены в ИСУТ. Рейтинг ТЗ позволяет сравнивать ситуацию за разные отрезки времени. Положительный рейтинг говорит о том, что ситуация соответствует плану или опережает его. Отрицательный рейтинг сигнализирует о невыполнении планов работ.

Алгоритм расчёта рейтинга проекта состоит из суммы рейтингов ТЗ с учетом указанных четырех этапов работы с требованиями, т. е. представляет собой функцию от количества требований, стадии работы с требованиями, просрочки выполнения этапов календарных планов в днях и удельном весе ТЗ в общем объеме требований проекта.

Таким образом, рейтинг учитывает:

- сроки проведения работы договорных компаний и формирования тематических планов (состав ТЗ текущего года, требования которых будут внесены в ИСУТ);
- своевременное предоставление исполнителями отчетной документации по каждому этапу ТЗ в соответствии с календарным планом, при этом в расчет берется каждый день просрочки нарастающим итогом;
- результаты экспертизы требований.

Так как расчет рейтинга выполняется по алгоритму, то можно быстро выявить причины снижения рейтинга, а по выявленным причинам выдать целенаправленные управляющие команды по их устранению. Важно отметить, что модуль контроллинга демонстрирует по каждому из четырех указанных этапов работы с требованиями план-факт на текущий момент, а также план-факт в динамике (по предыдущим закрытым периодам).

На рис. 1 представлен пример отчета по рейтингам (на всех рисунках в данной работе приведены тестовые данные).

Как видно из рис. 1, модуль контроллинга показывает долги даже при положительном рейтинге. Положительный рейтинг при наличии задолженности может возникать, когда перевыполнение по какому-то направлению (подпроекту) превышает задолженность по другому направлению. Таким образом, контроллинг настроен так, чтобы успехи в одном месте не маскировали долги в другом.

Контроль за ходом проекта невозможен без контроля работы подрядчиков-исполнителей. Для этой цели в контроллинге предусмотрен отчет по рейтингу исполнителей. На рис. 2 приведен пример такого отчета.



## Рейтинг проекта на 2022-06-02

- 65

Не имеют трассировок 3 требований из 32  
Не принято 18 требований из 47

## План-факт ключевых событий



Рис. 1. Рейтинг проекта с указанием задолженности и план/факт этапов работы с требованиями

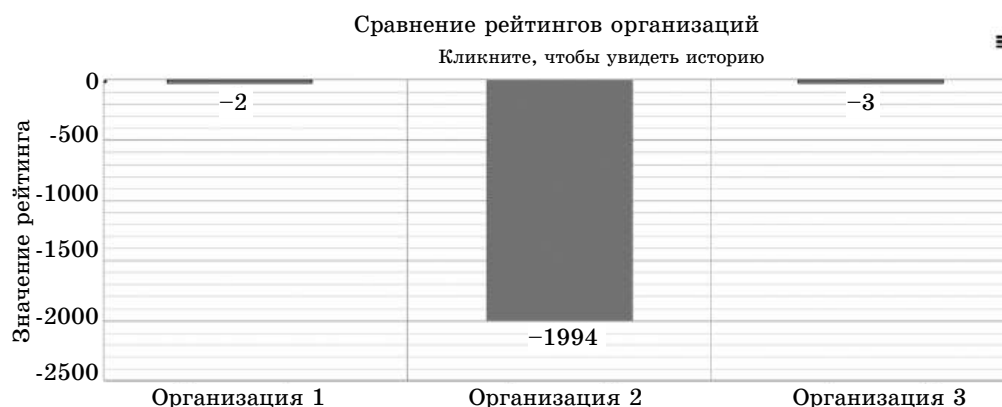


Рис. 2. Рейтинги исполнителей

Однако текущее состояние рейтинга исполнителя не дает полного представления о выполнении работ, поэтому в контроллинге преду-

смотрен отчет по изменению рейтинга исполнителя в динамике по месяцам отчетного года (рис. 3).

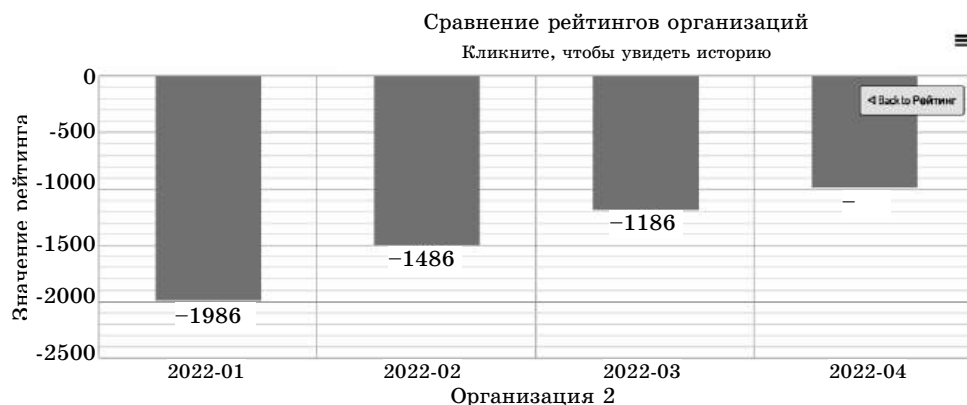


Рис. 3. Рейтинг исполнителя в динамике за отчетный год

Особенность по контролю ситуации в проекте с использованием рейтингов заключается в том, что руководитель в первую очередь рассматривает вопросы (ТЗ или исполнителей), по которым зафиксирован самый низкий рейтинг. Это позволяет концентрироваться на главном и дифференцировать проблемы по приоритету. Такой подход называется управлением ходом проекта по отклонениям рейтинга.

Система контроллинга через рейтинг предоставляет возможность количественной оценки работы. А как учит наука управления — нельзя управлять тем, что невозможно измерить.

### Заключение

Мировая тенденция к цифровизации и реализации сложных проектов, в которых участвует большое количество организаций, требуют наличия инструмента, позволяющего не только вести учет проектных требований (договорные требования (ТЗ), нормативная документация), контролировать их изменение, отслеживать выполнение, но и способного давать комплексную оценку ситуации в динамике и обладающего возможностью проанализировать ситуацию за конкретные периоды работы.

Таким инструментом в проекте "Прорыв" является информационная система управления требованиями, позволяющая с помощью разработанного модуля контроллинга анализировать ситуацию в проекте "от общего к частному" (от общей оценки состояния дел в проекте до поэтапной декомпозиции ситуации вплоть до конкретных работ или исполнителей). Рейтинг-ключевой показатель контроллинга — это показатель сводный, который суммирует ситуацию по этапам работы с требованиями.

Модуль контроллинга демонстрирует по каждому показателю текущий рейтинг, план-факт и рейтинг в динамике, что обеспечивает прозрачность работы исполнителей, предоставляется возможность количественной оценки их работы с точки зрения соблюдения сроков и качества результата работ. Очень важно, что модуль контроллинга в ИСУТ показывает долги даже при положительном рейтинге.

Несмотря на то, что в целом концепция контроллинга довольно широко распространена и описана в литературе [7], представленная схема применения контроллинга для процесса управления требованиями проекта "Прорыв" является новой и инновационной. Это подтверждает тот факт, что в наиболее популярных системах управления требованиями подобного функционала нет. Если сравнивать проект "Прорыв" с международными проектами инженерингового дивизиона Госкорпорации "Росатом", то подобного подхода не наблюдается.

### Литература

1. <https://proryv2020.ru/o-proekte/>.
2. <https://proryv2020.ru/news/rossijskij-nacionalnyj-proekt-atomnyh-tehnologij-i-nauki/>.
3. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Контроллинг>.
4. [https://studbooks.net/1647998/finansy/ponyatie\\_suschnost\\_kontrollinga](https://studbooks.net/1647998/finansy/ponyatie_suschnost_kontrollinga).
5. ГОСТ Р 59194-2020 Управление требованиями. Основные положения.
6. ISO/IEC/IEEE 29148:2018 Systems and software engineering — Life cycle processes — Requirements engineering.
7. Карминский А. М., Фалько С. Г., Жевага А. А., Иванова Н. Ю. "Контроллинг" учебн. под ред. А. М. Карминского, С. Г. Фалько. — М.: Финансы и статистика, 2006. — 336 с.

## REQUIREMENT MANAGEMENT SYSTEM AS A TOOL FOR ASSESSING PROJECT PROGRESS

O. V. Zhdanova

"Proryv" Joint Stock Company, Moscow, Russia

O. N. Stolyarov

"Atomenergoproekt" Joint Stock Company, Moscow, Russia

*The purpose of this article is to show how, with the help of technical solutions, a Requirements management system can be used not only as a database for current project requirements, but also as a tool for monitoring the project progress at all stages, including R&D, thus providing information and analytical support for decision-making processes in project management. An innovative scheme for applying the concept of controlling for the project requirements management using Proryv Project as a case study is described.*

**Keywords:** requirements management system, controlling, project rating, project requirements, algorithm for generating a summary indicator of the project, Proryv project.

**Жданова Оксана Валерьевна**, начальник отдела развития информационной модели и системы управления требованиями ЗЯТЦ.

E-mail: zhdov@proryv2020.ru

**Столяров Олег Николаевич**, начальник управления научно-технологического обеспечения проектирования АЭС.

E-mail: Stolyarov\_ON@aep.ru

Статья поступила в редакцию 2 июня 2022 г.

УДК 65.011.56

DOI: 10.52190/2073-2597\_2022\_3\_21

EDN: PUETEV

## АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ СИСТЕМ ВИЗУАЛЬНОЙ БИОМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ В СИСТЕМАХ КЛАССА MES

И. С. Решетников, канд. техн. наук

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

Р. А. Мошкович

ООО «Компания «ТЕРСИС», Москва, Россия

*Рассмотрены общие вопросы применимости инструментов и методов визуальной биометрической идентификации в задачах управления производственными процессами и системах класса MES. Исследованы возможность применения в контексте модели ассоциации MESA International и ожидаемый эффект в контексте задач повышения эффективности процессов производства.*

**Ключевые слова:** управление производством, MES, АСУПП, биометрическая идентификация.

Технологии организации производства, в т. ч. и концепция Индустрии 4.0, подразумевают всё более возрастающую роль информационных технологий и специализированных систем. Ключевым элементом системы управления современного предприятия является система класса MES, роль которой, как и расшифровка аббревиатуры в трактовке ассоциации MESA International ([www.mesa.org](http://www.mesa.org)), за последние 10 лет изменилась с локальной "Manufacturing Execution System" на глобальное "Manufacturing Enterprise Solution" [1]. Изменилось не только название, но и роль системы и её связанность с другими системами предприятия. Начало этому положила появившаяся в 2004 г. концепция объединённого производства C-MES [2], после чего системы управления производством уже не рассматривались обособленно.

Расширение уровня взаимодействия со всеми корпоративными системами управления влекло за собой и последовательное вовлечение в системы класса MES новых технологий, в том числе управления оборудованием, идентификации материалов, сбора технологических данных, потокового анализа событий и т. п. Привлечение технологий, минимизирующих человеческий фактор и вероятность ошибки в контроле материальных потоков и технологических показателей, позволило многим предприятиям существенно увеличить скорость работы за счёт методичной работы над снижением производственных потерь во всей производственной, а часто даже корпоративной логистической цепочке.

При исследовании опыт успешных мировых проектов по реализации систем класса MES обнаружилось, что в процессе развития проектов число отклонений от условно-оптимального процесса достаточно быстро снижалось до некоторого уровня и далее не снижалось, несмотря на многочисленные усилия по всё более точной настройке параметров системы управления,

усилению и увеличению числа точек контроля и прочих подобных мероприятий. Более того, поскольку такие мероприятия существенно увеличивали стоимость владения системой управления брутто-эффект мог оказаться даже отрицательным.

Некоторые предприятия, которые вовремя осознали ситуацию и правильно идентифицировали её как проблему, требующую решения, смогли перешагнуть через этот рубеж и сохранить рост корпоративных показателей. Опыт этих предприятий даёт интересные поводы для размышления — в большинстве случаев прорыв произошёл либо за счёт ставки на роботизацию (что требует существенных материальных вложений и долгосрочных инвестиций), либо за счёт скрупулёзного анализа наиболее значимых причин и внедрения специально разработанных инструментов. Например, на одном предприятии анализ причин рекламаций показал регулярное нарушение технологий обработки, когда вместо двух сборщиков работал один. Решением стала специально разработанная система видеоконтроля, анализирующая постоянное наличие в кадре спецовок двух разных цветов на всём протяжении сборочного цикла. Такие упрощённые локальные методы обычно дешёвы, быстрее окупаются, но требуют большой квалификации как предприятия, так и консультантов.

Подобных примеров было изучено достаточно, чтобы с уверенностью сказать, что оптимизация процессов, достигаемая за счёт современных систем и алгоритмов управления, лимитирована корпоративной культурой и ограничениями, связанными с присутствием человека в процессе производства, и привычные технологии построения производственной системы и методы бережливого производства уже не дают необходимых результатов. Повышение степени проникновения систем автоматизации контроля и управления требует формирования

производственного поведения уже с учётом более мелких особенностей работы человека и гораздо большего объёма анализируемых данных, которые привычными организационными методами не собрать.

В данной работе проанализированы результаты предварительного исследования, проведённого совместно со специалистами ООО "Компания "ТЕРСИС", специализирующейся на сложных и нестандартных проектах по автоматизации производственных процессов и специалистов компании VisionLabs, разработчика систем машинного зрения и идентификации человеческих образов. Целью исследования был анализ применимости упомянутых технологий для повышения уровня упорядоченности производственных процессов и операций, анализ поведения сотрудников и применимость данной информации для снижения "человеческого фактора".

### Технология визуальной идентификации

Технологии распознавания лиц, в т. ч. в потоке, уже стали достаточно привычными и мало кого могут удивить. Но применение данных технологий ограничено системами контроля доступа, доступа к банковским услугам, немного в торговых центрах. Соответственно и представленный на рынке набор технологий и программных продуктов оптимизирован именно под эти задачи. Но, как и любая другая, задача применения данной технологии в контексте задач управления производством имеет свои особенности.

Для лучшего понимания приведём краткое описание технологий машинного зрения в контексте визуальной идентификации. Общую сводку по технологиям и компаниям можно посмотреть в [3]; определим важные для задачи управления производством элементы и компоненты.

Стадии типичного процесса идентификации:

- Обработка видеопотоков — в качестве источников данных могут выступать как камеры, так и видеофайлы.
- Детектирование лиц — процедура нахождения областей изображения, которые содержат лица.
- Трекинг лиц — процедура отслеживания объекта (лица) на последовательности кадров.
- Определение качества — определение качества и выбор лучшего кадра.
- Проверка Liveness — является ли картинка изображением оригинала (лица) или снимком ранее сделанного изображения.
- Отправка нормализованных изображений лиц — отправка изображения во внешние системы для последующей обработки и анализа.

Современные системы машинного зрения и распознавания решают весь данный комплекс задач, выдавая во внешнюю систему (системы)

небольшой цифровой образ, который далее сравнивается с шаблоном или базой данных для анализа ситуации. В случае постановки задачи управления производством необходимо определить точку оптимума, чтобы, с одной стороны затраты на оборудование и ПО не были слишком высокими, а с другой — чтобы функциональность была достаточна для решения поставленных задач и формирования необходимых управленческих решений.

В отличие от классических задач обеспечения безопасности в данном исследовании идентификация направлена не на внешний, а на внутренний контингент (персонал), при этом промышленное предприятие характеризуется достаточно высокой общей дисциплиной и возможностью формирования необходимой базы как по идентифицируемым лицам, так и по организации территории, на которой ведётся наблюдение. Но при этом возникают специфичные проблемы, связанные с ношением спецодежды (каска, очки), движущиеся элементы оборудования, в том числе роботы и манипуляторы, изменение логики системы контроля в зависимости от выполняемого задания или операции и т. д. Ещё одной существенной проблемой является не всегда пригодная для контроля планировка зон контроля: большие расстояния, вибрация, узкие пространства, что не всегда обеспечивает возможность корректного трекинга и необходимость выделенной логики обработки неопределённостей идентификации.

В связи с вышесказанным, вопрос выбора тестового программного ландшафта является крайне критичным. В данной работе в качестве базовой платформы использовался программный пакет LUNA SDK разработки компании VisionLabs, а применимость оценивалась в контексте системы управления MES PHARIS (разработчик компания UNIS, Чешская республика), как одной из самых гибких в части возможностей специальной настройки MES-систем, представленной на российском рынке. Настройка тестового взаимодействия и логики работы систем осуществлялась специалистами компаний VisionLabs и ООО "Компания "ТЕРСИС".

### Анализ в разрезе функциональной модели MES

При написании статьи было решено не только фокусироваться на проблемах, а напротив, рассмотреть возможности технологии с точки зрения получения преимуществ и дополнительной выгоды.

Для базовой оценки удобным оказалось использование функциональных моделей. Можно использовать как модели ассоциации MESA International, так и модели стандарта ISA-95 [4]. Наиболее информативной в контексте данного исследования оказалась самая ранняя модель MES-11 [5], но она легко может быть приведена к типовой модели ISA-95, используемой,



например, при оценке степени автоматизации процессов [6].

### Контроль ресурсов

В контексте данной функции системы идентификации позволяют контролировать фактическое состояние персонала как ресурса, т. е., например, фактическое наличие на рабочих местах наладчиков, специалистов ОТК и др., что позволяет адресно формировать запросы на обслуживание с учётом компетенций доступных сотрудников или обработку исключений, например, вызов специалиста из столовой. В таких задачах инициатором запроса является MES-система, далее по заданному сценарию запрос адресуется конкретному специалисту в зависимости от текущей загрузки. В типовой модели по анализу типичных ситуаций такие запросы не всегда обрабатываются в соответствии с приоритетностью и часто являются причиной кратковременных остановок. Была протестирована и более "интеллектуальная" функция, когда запрос формируется регламентно, например по регламенту 1 раз в час требуется контроль качества изделий специалистом ОТК. В этом случае была организована модель управления контролёрами по схеме построения кратковременных динамических расписаний [7], которые учитывали текущую доступность и место положения доступных контролёров. Результаты получены вполне обнадеживающие, при необходимом обучении система выдавала вполне адекватные результаты.

Само собой разумеется, что в MES-систему передавалась информация о присутствии на предприятии операторов по данным системы СКУД, отсутствие оператора в назначенный для подготовки к исполнению задания срок вызвало предупреждающее оповещение о необходимости скорректировать расписание производства. Это стандартная функциональность современных MES-систем, наличие систем визуальной идентификации позволяет сделать контроль более точным, например, по наличию оператора в цеху.

### Оперативное детальное планирование

Если ориентироваться на задачу планирования как на необходимость запустить и выполнить задание в заданный временной интервал, то, как минимум, наличие информации о фактическом присутствии сотрудника и его готовности к исполнению задания является ценной информацией о риске неисполнения заданного плана. Теоретически обсуждалось и применение появившихся в последние время технологий оценки эмоционального состояния сотрудника, но конкретный алгоритм формирования закономерностей проработан не был.

### Диспетчеризация производства

В части диспетчеризации технологии идентификации дают вполне серьёзный эффект в части исключения процедур идентификации и отчётности, если всё идёт как запланировано. Даже автоматизация регистрации по идентификации лица на производственном терминале даёт серьёзное упрощение процесса, человек перестаёт отвлекаться на ненужные ему операции, а просто подходит к терминалу и вводит требуемую информацию. Особенно эффективно технология работает в случае одновременного обслуживания группы станков несколькими операторами — психологическое ощущение контроля исчезает и оператор фокусируется на прямых обязанностях. Если при этом обеспечить необходимую связь MES-системы с оборудованием, процессы могут быть ещё более упрощены.

Вторым по эффекту стала минимизация оповещений, например, MES-система, выявив отклонение в технологических показателях, запрашивала у системы идентификации наличие оператора и, если он находился на месте, откладывала оповещение. Или наоборот, если оператора не было на месте и система идентификации не могла определить его местонахождение, то оповещение адресно эскалировалось по заданному маршруту. Данная функция заметно увеличила эффективность работы системы производственных алармов и позволила её сильно упростить, т. к. в традиционной реализации важные оповещения для надёжности часто дублировались, что снижало общую эффективность.

В части соблюдения технологии и охраны труда система идентификации обеспечивала практически полное покрытие стандартных задач: контроль присутствия необходимого персонала на участке, отсутствие посторонних лиц, нарушение охранных зон, исполнение регламентных процедур (например, периодическая смазка). Эта функция для подобных систем достаточно стандартная и хорошо проработана.

### Управление документами

Наиболее полезной оказалась функция контроля использования информационных терминалов и стендов сотрудниками — исключалась необходимость авторизации на терминале и упрощался доступ к информации.

### Сбор технологических данных

Для MES-системы идентификатор оператора, обнаруженного в кадре наладчика, специалиста ОТК, мастера цеха и пр. является просто ещё одним технологическим показателем, который регистрируется и далее обрабатывается наряду с другими. Таким образом, интеграция технологий требует лишь технической, но не концептуальной настройки.

### Управление персоналом

Задача управления персоналом является стандартной для систем идентификации: статистика по соблюдению трудовой дисциплины, контроль перемещений, отсутствие на рабочем месте, например, в комнате курения и прочие подобные задачи. На предприятиях, где практикуется периодическое ознакомление с работой смежных участков, этот контроль исполнения мероприятий куда эффективнее бумажных журналов. Чрезвычайно полезной является и информация по частоте ознакомления с информационными стендами, статистика по присутствию специалиста на кружках качества.

Внедрение систем объективной системы идентификации персонала исключает и проблемы фиктивного присутствия на рабочем месте (автор лично видел, как регулярно на одном заводе на турникете делались 3–4 "псевдопрохода" по разным картам доступа).

В случае бригадной работы с обслуживанием нескольких машин системы идентификации — это единственный способ адекватно сформировать персональный коэффициент трудового участия по частоте присутствия на контрольных точках мониторинга оборудования.

### Управление качеством

Если принять, что качество продукции определяется квалификацией оператора, соблюдением технологии и надлежащим контролем, то системы идентификации решают эти вопросы: объективная идентификация оператора сравнивается MES-системой с планом или требованиями карточки изделия, регламентное присутствие оператора (операторов) в рабочей зоне определяет соблюдение технологии, наличие оператора в "зоне быстрого реагирования" обеспечивает необходимый контроль по сигналу отклонения, формируемого MES-системой. Таким образом, при правильной настройке подобная система идентификации будет уже не системой контроля, а системой обеспечения качества продукции.

### Управление производственными процессами

При правильной формализации процессов и описании событий и ролей система идентификации более точно, нежели просто система СКУД, обеспечит их соблюдение, поскольку ситуации "не у кого подписать" уже не может быть в принципе: отсутствие человека, задействованного в процессе, — это инцидент, который должен быть отработан в соответствии с регламентом и задача будет перенаправлена на другого исполнителя.

### Управление техническим обслуживанием

Стандартные функции: контроль присутствия специалиста в определённых зонах при выполнении осмотра перед началом работы, контроль выполнения регламентных процедур, контроль присутствия механика в контрольных зонах, контроль времени на осмотр. Фиктивное выполнение ППР и несоблюдение требований методик ТРМ является, к сожалению, достаточно повсеместным и очень тяжело поддаётся формализованному контролю. Бумажные журналы, которые традиционно используются, эффекта не дают.

### Отслеживание производства

Фактические данные о персонале, вовлечённом в производство данной единицы изделия, причём не только непосредственного исполнителя, но и всех, находившихся в рабочей зоне лиц. Подобный анализ необходим как минимум для выявления фактов сокрытия инцидентов и брака, такие события редко происходят без участия сразу нескольких человек.

### Анализ эффективности

Это то, ради чего и проводилось исследование: внедрённые в необходимых объёмах инструменты идентификации позволяют зафиксировать фактические шаблоны производственного поведения персонала, выявить типичные отклонения и сфокусировать усилия программы улучшения условий труда и повышения квалификации именно на критичных вопросах. Ожидаемые результаты — фиксация неучтённых в технологических картах операций, избыточные перемещения, непродуктивные потери времени на стояние в очередях в столовой и т. п., т. е. причины, которые обычно не рассматриваются как важные, но по факту сильно ограничивают производительность предприятия.

### Особенности применения

Даже первичный анализ показал, что потенциально системы визуальной идентификации могут дать значимый эффект при правильном применении.

Можно выделить 4 основных задачи системы на промышленном предприятии: контроль фактического доступа, контроль перемещений и нахождения сотрудника на территории предприятия, идентификация сотрудника при работе с производственным терминалом и оборудованием — блокировка несанкционированного включения, например (рис. 1).

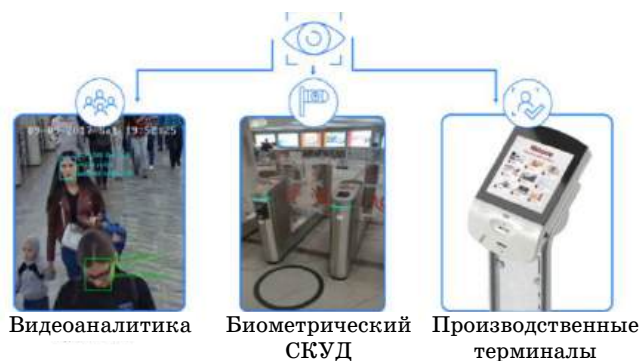


Рис. 1. Зоны работы системы идентификации

Это стандартные задачи, но есть ряд особенностей, например:

- надёжная идентификация персонала в спецодежде и в средствах индивидуальной защиты (СИЗ);
- определение нахождения человека в определённых зонах;
- нечёткая идентификация при кратковременном появлении человека в кадре, при этом доступна вероятностная информация о том, кто это может быть;
- максимальная незаметность системы камер, в т. ч. возможность использования камер с небольшим разрешением;
- выявление чрезвычайных ситуаций, например, лежащего на полу человека;
- возможность идентификации не только личности, но и СИЗ;
- возможность идентификации при наличии визуальных помех, например, водителя кара или крановщика, в т. ч. при помощи отслеживания.

Эти требования усложняют задачу, но при этом есть возможности максимально облегчить идентификацию "внешними средствами": опознавательные знаки на спецодежде, специальная краска для разметки, скорректированное с учётом задач контроля освещение и прочие подобные мероприятия. Их цель — обеспечить приемлемый баланс возможностей ПО идентификации и обеспечивающих факторов для достижения требуемой стоимости владения, определяемой эффектом, который планируется достигнуть.

Важную роль играет интеграционный ландшафт и настройка взаимодействия. Каждая из систем — это набор серверов и работа в режиме реального времени. Системы идентификации имеют свои внутренние стандарты, MES — свои, поэтому необходим хорошо продуманный информационный поток определения ключевых событий, правил кодировки и хранения (рис. 2). Крайне важно обеспечить обработку исключений и отсутствия данных, чтобы система не выдавала ложных тревог, для чего ввести требования к альтернативному контролю данных, необходимому дублированию и т. д.

Важным фактором является и то, что MES-система относится к категории систем оперативного управления, поэтому подвержена частым изменениям и перенастройкам, гибкость системы идентификации должна быть адекватна.

В проведённом исследовании в рамках сильно упрощённой тестовой модели получилось полностью абстрагироваться от конкретных сотрудников, оперируя исключительно с его цифровым "отпечатком", который, в свою очередь, тоже может быть ещё раз зашифрован. Таким образом, гарантируется необходимая защита данных от НСД.

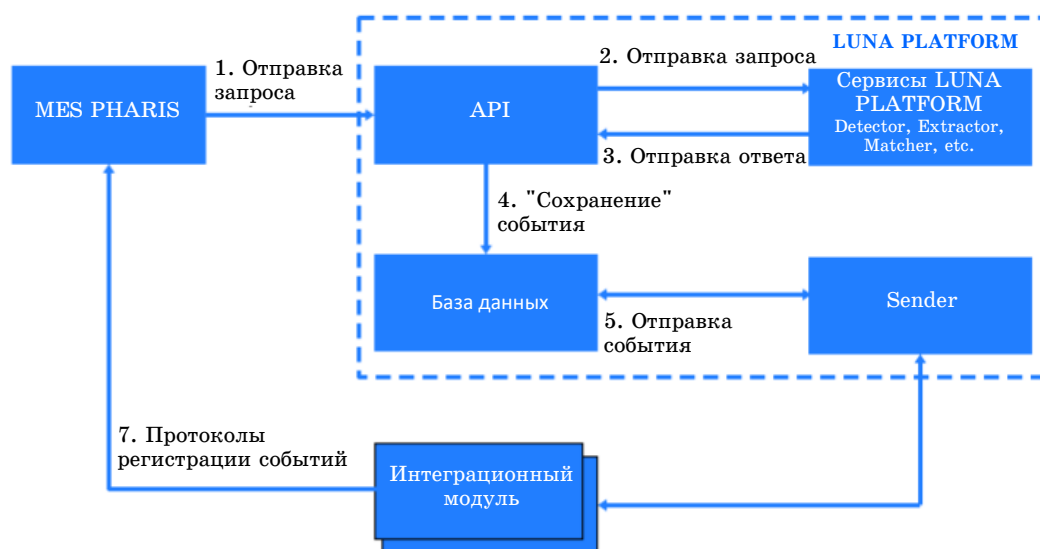


Рис. 2 Интеграционный ландшафт в тестовой задаче

Но есть и другая проблема. Опрос нескольких десятков специалистов на уровне мастеров цехов предприятий о готовности внедрить подобную систему показал крайне негативное отношение. Уличные камеры, камеры в банках и торговых центрах не вызывают сопротивления в силу их неизбежности. Но в случае наличия подобного внутризаводского контроля отношение уже другое. Поэтому ожидать максимальный эффект возможно стоит тогда, когда сотрудники будут уверены, что контроля нет, наоборот убраны все журналы и подписи, согласование на словах, и т. д. Это пока лишь предположение, но абсолютно точно, что этот вопрос надо очень тщательно проработать до начала проекта и заранее разработать сценарии мягкого корректирующего воздействия при неизбежном выявлении большого количества нарушений и отклонений.

### Закключение

Предварительный анализ применимости технологий визуальной идентификации и совместимости систем MES и платформ распознавания лиц и образов на примере решений VisionLabs и MES PHARIS показал, с одной стороны, что это возможно, но с другой подтвердил, что есть масса нюансов и вопросов, требующих вдумчивой проработки и решения, вопросов как технических, так и организационных.

Например, во многих цехах стоят камеры видеонаблюдения и при желании можно было бы проводить необходимый анализ этих записей и предпринимать какие-то корректирующие меры, но по факту этого никто не делает. Просмотреть 24 часа видео с 20 камер кажется не очень реальным, но даже 1—2 выделенных человека, в чьи обязанности входило бы методично этим заниматься и формировать планы корректирующих мероприятий вполне бы себя

оправдало, в том числе экономически. Но таких примеров пока не встретилось. А если и были такие выделенные специалисты, то исключительно для выявления случаев для наказания.

Ожидаемый теоретический экономический эффект от внедрения подобного расширения функциональности MES-систем положительный и окупаемый в среднесрочной перспективе даже для средних предприятий. Но это лишь оценка программной и аппаратной части при условии, что на предприятии есть своя очень сильная группа компетенции, которая понимает тонкости технологии, может грамотно и поставить задачу, и держать проект в состоянии разумной достаточности.

Исследования и формализация по данной тематике продолжаются. Авторы благодарят специалистов компании VisionLabs за предоставленные программные продукты и материалы и помощь в подготовке статьи.

### Литература

1. Решетников И. С. MES: стратегическая инициатива. — М.: НГСС, 2019.
2. WP 08. Модель MESA для системы управления объединённым производством (с-MES), в сб. MES — теория и практика. — М.: НГСС, 2009. Вып. 1.
3. Аналитическая справка. Компьютерное зрение: технологии, компании, тренды, ФГУП "ГРЧЦ", 2021 [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://grfc.ru/upload/medialibrary/cc1/Prilozhenie\\_1\\_Kompyuternoe\\_zrenie\\_ver\\_1\\_488573621327.pdf](https://grfc.ru/upload/medialibrary/cc1/Prilozhenie_1_Kompyuternoe_zrenie_ver_1_488573621327.pdf).
4. ANSI / ISA-95.00.01-2000. Часть 1: Модели и терминология.
5. MESA White Paper #06: MES Explained: A High Level Vision, MESA International, 1997, <http://www.mesa.org>.
6. Корблев И. Г., Решетников И. С. Оценка уровня автоматизации производственных систем // Автоматизация в промышленности. 2020. № 1. С. 32—36.
7. Мауэргауз Ю. Е. Динамические расписания для гибких производств: 12 компьютерных программ. — М.: НГСС, 2018.

## BASIC ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF THE VISUAL BIOMETRIC IDENTIFICATION FOR MES

I. S. Reshetnikov

V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

R. A. Moshkovich

"TERSYS" Ltd, Moscow, Russia

*The article is devoted to the general aspects of the applicability of the visual biometric identification methods for the manufacturing control systems and MES. Basic problems of the application basing on the MESA International MES model are suggested and discussed. Expected effects for the task of the improvement of the production processes effectiveness are considered.*

**Keywords:** manufacturing control, MES, ASUPP, biometric identification.

Решетников Игорь Станиславович, старший научный сотрудник.

E-mail: i.reshetnikov@mescenter.ru

Мошкovich Роман Александрович, генеральный директор.

E-mail: R.Moshkovich@tersys.ru

Статья поступила в редакцию 25 июня 2022 г.

УДК 004. 94+666.3/7

DOI: 10.52190/2073-2597\_2022\_3\_27

EDN: PZOAAA

## АЛГОРИТМ МЕТОДА МУРАВЬИНЫХ КОЛОНИЙ ДЛЯ ВЫБОРА МАРШРУТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Ю. П. Титов, канд. техн. наук; О. Т. Романов, канд. техн. наук;

М. Н. Машкин, канд. техн. наук

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Москва, Россия

*Рассмотрен алгоритм метода муравьиных колоний для выбора маршрута беспилотного летательного аппарата от заданной начальной точки взлёта до заданной конечной точки полёта. В основе алгоритма лежит предположение о неравномерности местности, средств противодействия и помех на всем пути движения БПЛА. В работе предложено представление воздушного пространства как двумерного графа с последующим поиском пути в данном графе с помощью модифицированного метода муравьиных колоний. Данное представление позволяет работать не только с ограниченными опасными зонами, но и с "бесконечными", по-разному воздействующими на точки графа, по-разному удалёнными от центра воздействия. Модифицированный метод позволяет осуществить направленное движение муравьёв из начальной точки в конечную и применять как "позитивный" феромон, так и "негативный". Данная модификация позволяет уменьшить количество итераций метода муравьиных колоний и тем ускорить работу алгоритма по нахождению рационального маршрута.*

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, оптимизация, муравьиные колонии.

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) позволяют решать множество стратегических и тактических задач, чаще всего в режиме быстрой передачи информации и реагирования на обстановку. Автоматический полёт БПЛА связан с возможностью удаленного управления или автоматического выбора маршрута самим летательным аппаратом. Во втором случае оператор задаёт конечную точку (точку назначения), а БПЛА автоматически выбирает маршрут и осуществляет соответствующие манёвры. При этом для построения маршрута необходимо применять "быстрые" алгоритмы, которые могут с высокой скоростью находить пусть и не оптимальные, но рациональные маршруты.

Для построения маршрута используется картографический материал и дополнительная информация на основе порывов ветра и информации о текущих метеоусловиях, зонах противодействия БПЛА и зонах плохой связи. Обычно данные зоны определяются в виде географических зон на картографическом материале с чёткими границами, пролёт через которые чреват соответствующими последствиями для БПЛА. Информация о таких зонах берётся по результатам разведки и требует задействования дополнительных средств. В таком случае решение задачи нахождения маршрута основывается на графах небольшой размерности с учётом запрещённых зон [1].

В работе рассматривается алгоритм решения задачи определения маршрута БПЛА от заданной начальной точки взлёта до заданной конечной точки полёта в предположении, что чётко заданных границ опасных и запрещённых зон нет, а есть центры данных воздействий.

### Построение графа для решения задачи маршрутизации

Так как воздействия зависят от расстояния между БПЛА и центром воздействия, то построить граф на основе зон не получится. Необходимо разбить все пространство с помощью сетки, расположив в узлах сетки вершины графа. Дуги в данном графе соединяют соседние вершины (рис. 1).

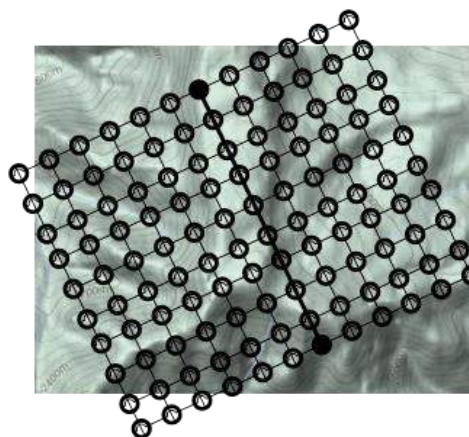


Рис 1. Разбиение пространства на сетку

Путь в данном графе может быть определен набором вершин, которые должен посетить БПЛА. Шаг сетки определяется целями и может быть переменной длины, но авторами рассматривался только стандартный шаг сетки, заданный определенным числом. Направление сетки следует устанавливать параллельно прямой, соединяющей точку старта БПЛА и точку назна-



чения. Такое расположение позволит составлять "логичные" маршруты, состоящие из большого количества прямых перемещений с наименьшим числом разворотов. Пример плохой сетки приведён на рис. 2.

На рисунке видно, что БПЛА будет перемещаться ломаной линией с постоянными поворотами и манёврами, что в случае отсутствия противодействия весьма неэффективно. В каждой точке у БПЛА будут точно определены его координаты и, тем самым может быть вычислено воздействие негативных факторов.

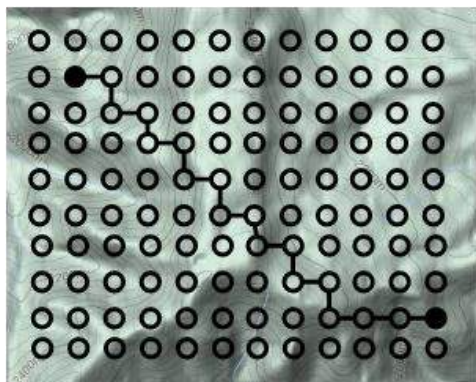


Рис. 2. Пример плохого разбиения пространства, в результате которого маршрут получился "ломаный"

### Метод муравьиных колоний

Для поиска маршрута в таком графе предлагается применять модификацию метода муравьиных колоний. В алгоритме, предложенном в 1992 г. для поиска пути коммивояжёра, муравьи (агенты) перемещаются по графу, делая на каждой вершине вероятностный выбор следующей вершины для перехода [2]. В основе оригинального метода муравьиных колоний лежат следующие формулы:

$$P_{ij,k}(n) = \frac{\tau_{ij}^{\alpha}(n) \eta_{ij}^{\beta}}{\sum_{s \in J_{i,k}} \tau_{is}^{\alpha}(n) \eta_{is}^{\beta}}, \quad j \in J_{i,k}, \quad (1)$$

$$P_{ij,k}(n) = 0, \quad j \notin J_{i,k}, \quad (2)$$

$$\Delta\tau_{ij,k} = \frac{Q}{L_k(n)}, \quad (3)$$

$$\tau_{ij}(n+1) = \lambda \tau_{ij}(n) + \sum_{k=1}^N \Delta\tau_{ij,k}. \quad (4)$$

где  $\tau_{ij}(n)$  — количество феромона (весов) на дуге  $(i, j)$  на  $n$ -й итерации алгоритма;

$\eta_{ij}$  — величина, обратная длине ребра  $(i, j)$ ;

$J_{i,k}$  — множество непосещённых вершин для  $k$ -м муравья;

$\alpha$  — важность феромона на дугах;

$\beta$  — важность длины дуги;

$P_{ij,k}(n)$  — вероятность выбора  $k$ -м муравья дуги  $(i, j)$  на  $n$ -й итерации алгоритма;

$L_k(n)$  — общая длина пути пройденного  $k$ -м муравья на  $n$ -й итерации, вычисляется как сумма длин дуг, по которым прошёл  $k$ -й муравей;

$\Delta\tau_{ij,k}$  — количество феромона, которое добавит  $k$ -й муравей на дугу  $(i, j)$ , следует отметить, что на все дуги пути феромон добавляется одинаковый;

$\tau_{ij}(n+1)$  — количество феромона на дуге  $(i, j)$  на следующей итерации;

$\lambda$  — коэффициент испарения (evaporation) феромона.

Параметрами, определяемыми пользователем, метода муравьиных колоний являются:  $N$  — количество агентов в группе;  $Q$  — базовое количество феромона;  $\lambda$  — коэффициент испарения феромона.

В предлагаемом графе  $\eta_{ij}$  — величина, обратная длине дуги, не несет смысла, так как длина дуг одинаковая и определяется размерностью сетки. Но отсутствие данного параметра для агента делает одинаковыми дуги, которые ведут до точки назначения и дуги, которые ведут в обратном направлении. Из-за этого алгоритм часто закичивается и останавливается на плохих решениях. Для устранения данного недочёта предлагается использовать не длину дуги, а расстояние от целевой вершины, т. е. вершины, в которую должен переместиться агент до целевой вершины. При этом интересна не абсолютная величина данного параметра, а его относительное значение по сравнению со всеми, возможными для перехода вершинами. В таком случае предлагается задавать данные веса вручную, руководствуясь правилами, наглядно изображёнными на рис. 3.

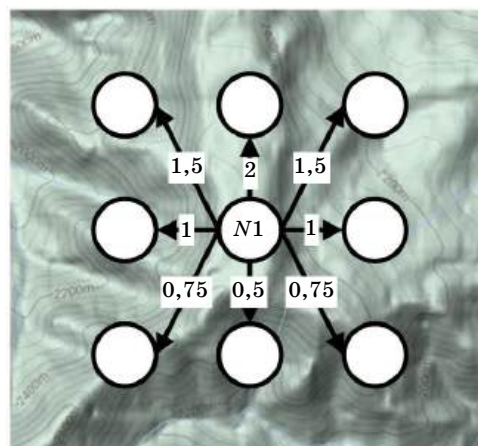


Рис. 3. Веса длин путей в направлении целевой вершины (сверху)

Муравей начинает своё движение из начальной точки старта БПЛА и заканчивает движение, если достиг конечной точки, точки назначения. При этом для упрощения работы алгоритма можно не запрещать муравью посещать одну и ту же вершину дважды. Алгоритм работает итерационно. За одну итерацию по графу перемещается  $N$  муравьев. При этом состояние графа, т. е. количество феромона на дугах, не изменяется. Перемещение муравьёв может быть распараллелено, так как они между собой не взаимодействуют. После нахождения всеми муравьями путей необходимо вычислить значение оптимизационного критерия и определить количество феромона, добавленного муравьем на дуги графа, по которым проходил его путь. Задачей испарения феромона является постепенное уменьшение важности феромона, занесённого на предыдущих итерациях. Предложенная формула показывает инерциальность алгоритма, т. е. насколько важны результаты предыдущих итераций. Целью данного процесса является постепенное устаревание информации, т. е. испарение феромона со всех дуг графа, занесённого на предыдущих итерациях. В работе предлагается использовать формулу, в которой от коэффициента  $\lambda \in [0, 1]$  зависит в какой пропорции будут добавляться новые веса и испаряться старые. Так как для вероятностного выбора абсолютное значение веса не важно, а важно относительное, то возможно безболезненное равное уменьшение количества заносимого феромона на все дуги.

Вероятностная формула позволяет создать целенаправленный вероятностный выбор следующей вершины. Вероятность выбора дуги больше, чем больше количество феромона на ней с учётом её направления. На начальном этапе количество феромона на всех дугах графа одинаковое и агенты ориентируются преимущественно на отношение длин дуг, выходящих из вершины. При завершении каждой итерации количество феромонов на дугах графа изменяется. Дуги, образующие лучшие найденные маршруты, получают больше феромона и становятся предпочтительнее при вероятностном выборе.

Величина  $L_k(n)$ , рассматриваемая как функция, может принимать значения отличные от суммарной длины маршрута, пройденного  $k$ -м агентом. При данном подходе можно говорить, что функция  $L_k(n)$  является целевой функцией, а формула нахождения добавляемых весов определяет направление оптимизации функции как минимизацию. Также следует отметить гиперболический характер функции зависимости количества добавляемых феромонов от оптимизационной функции. В общем случае вычисление целевой функции  $L_k(n)$  можно проводить и с помощью численного или имитационного моделирования.

При определении вероятности перехода муравья в соседнюю вершину стоит учитывать до-

полнительную информацию. Такой дополнительной информацией могут служить нормативные документы, "стандартные" алгоритмы решения подобных задач или экспертные оценки. Эту информацию можно заносить в виде начальных значений весов в вершинах графа. [1, 3].

Оптимальным маршрутом итерации считается тот, на котором феромона будет больше всего. Этот феромон определит маршрут, который даст наилучшее значение целевой функции  $L_k(n)$ . Для БПЛА в такой целевой функции учитываются: общая длина пройденного БПЛА пути, количество маневров, вероятность негативных воздействий на БПЛА, а также вероятность его потери. Данный векторный критерий определяется маршрутом муравья, т. е. вершинами, которые посетил муравей и накопленными негативными последствиями в данных вершинах [4].

В качестве критерия остановки работы алгоритма будем рассматривать величину, характеризующую изменение пути за последние  $n$  итераций. Если оптимальный путь после завершения итерации с номером  $n$  будет отличаться от оптимального пути, найденного на итерации  $n-1$  на некоторое малое значение  $\varepsilon$ , то работу алгоритма можно считать завершённой.

#### Модификация метода муравьиных колоний с применением негативного феромона

Из-за большого количества вершин в графе и достаточно длинного маршрута по сетке, около 50 вершин алгоритм муравьиных колоний сходится к рациональному решению достаточно долго. Требуется в среднем 325 итераций (доверительный интервал с вероятностью 95 %: (287, 363)), что требует достаточно много временных и вычислительных затрат. Для ускорения алгоритма необходимо сократить количество дуг и маршрутов, которые можно построить в данном графе. Для реализации идеи сокращения количества дуг предлагается наряду с использованием позитивного феромона, ввести негативный. Основой поведения муравьёв являются правила их перемещения по графу, определяемые распределением феромона на дугах или вершинах соответствующего графа. Позитивный феромон призван повышать вероятность прохождения по дуге, тогда как негативный уменьшает данную вероятность. При этом итоговая вероятность прохождения агента по дуге определяется суммой позитивного и негативного влияния, и определяются формулой:

$$\tau_{ij} = \tau_{ij}^+ - \tau_{ij}^-, \quad (5)$$

где  $\tau_{ij}^+$  — позитивный феромон на дуге  $i-j$ ;

$\tau_{ij}^-$  — негативный феромон;

$\tau_{ij}$  — итоговое значение феромона.

Вероятность выбора агентом дуги определяется по формуле (указывается только влияние феромона):

$$P_{ij}(n) = \frac{\tau_{ij}(n) + \min_k(\tau_{ik})}{\sum_{l=1}^n (\tau_{il} + \min_k(\tau_{ik}))}. \quad (6)$$

Так как итоговое количество феромона на дугах  $\tau_{i,j}$  в силу влияния негативного феромона  $\tau_{i,j}^-$  может быть отрицательным необходимо произвести сдвиг количества феромона  $(\tau_{i,j} + \min_k(\tau_{i,k}))$  с последующей нормировкой для определения вероятности перемещения по дуге  $i-j - P_{i,j}$ . Дальнейшая работа с данными вероятностями аналогична работе оригинального алгоритма.

Позитивный феромон определяется положительными целями летательного аппарата: временем перемещения (длиной дуги), выполнением поставленных целей (посещения соответствующих вершин) и т. д. Например, увеличение позитивного феромона, связанного с длиной пути, может определяться формулой:

$$\Delta\tau_{ij,k}^+(n) = \frac{Q}{L_k(n)}, (i, j) \in T_k(n), \quad (7)$$

$$\Delta\tau_{ij,k}^+(n) = 0, (i, j) \notin T_k(n),$$

где  $Q$  — параметр феромона;  
 $L_k(n)$  — длина пути, пройденного  $k$ -м муравьём;  
 $T_k(n)$  — множество дуг, по которым прошёл муравей для  $k$ -го агента.

Негативный феромон может определяться движением летательного аппарата в зоне противодействия ПВО, в плохих погодных условиях и т. д. Изменение данного феромона аналогично изменению позитивного.

Данный подход позволяет сократить количество итераций метода муравьиных колоний и таким образом ускорить работу алгоритма. Следует отметить возможность применения муравьёв разных типов: одних, увеличивающих позитивный феромон, других — увеличивающих негативный феромон. Увеличение негативного феромона позволит не искать хорошие решения, а отбраковывать плохие. Результаты исследования показали сокращение длительности решения задачи поиска маршрута не менее чем на 15 %.

### Заключение

В рамках работы предложен подход к решению задачи маршрутизации БПЛА. Основой предлагаемого подхода является представление непрерывного воздушного пространства в виде

графа с дальнейшим поиском маршрута летательного аппарата именно в данном графе. Для создания графа на пространство накладывается сетка, в узлах которой и будут находиться вершины графа. При этом было определено, что точка старта и пункт назначения БПЛА должны соединяться прямой линией.

Для поиска рационального пути в полученном графе предлагается использовать модификацию метода муравьиных колоний для поиска рационального пути с учётом не только длины пройденного пути, но и влияния погодных условий, сил противодействия и неравномерности связи с БПЛА. Для ускорения поиска пути алгоритмом предложено задавать не только позитивный феромон, увеличивающий вероятность перехода по дуге, но и негативный феромон, который эту вероятность уменьшает. Данная модификация существенно сократила количество итераций метода муравьиных колоний, которые необходимо вычислить для поиска рационального решения.

Направлений развития метода достаточно много:

- Сетки с переменным размером шага, когда в зоне противодействия шаг сетки уменьшается, что позволяет определить замысловатые манёвры БПЛА в сложных условиях. В том числе неравномерную сетку, позволяющую совершать более "гладкие" манёвры в направлении цели, например изображённые на рис. 4.

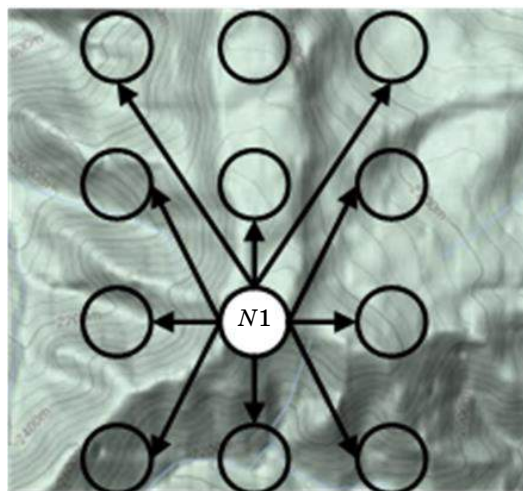


Рис 4. Неравномерная сетка из вершины N1 в сторону целевой вершины (наверху)

- Рассмотреть не двухмерную сетку, а трёхмерную, позволив алгоритму маневрировать и по высоте, тем самым расширяя круг решаемых задач и возможности управления.

- Для позитивного и негативного феромонов рассматривались одни и те же муравьи путём простого разделения целевой функции. Все муравьи стремились увеличить позитивный феромон, а негативный феромон был скорее в качестве побочного эффекта. Стоит рассмотреть модификации, когда на граф специально запус-

каются муравьи в целях увеличения негативно-го феромона на дугах.

- Рассмотреть игровую модель с активным противодействием БПЛА. Данную модель метод муравьиных колоний может легко решать, так как устойчив к изменению графа и целевой функции и способен автоматически перестраивать маршрут. Данные исследования позволят расширить круг решаемых задач.

#### Литература

1. Лавренов К. Е., Шевелёва А. П., Романов О. Т., Машкин М. Н. Задача выбора оптимального маршру-

та беспилотного летательного аппарата при противодействующих, географических и погодных ограничениях в области полёта // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2021. № 4(184). С. 22—28.

2. Dorigo M., Stutzle T. Ant Colony Optimization. — MIT Press, 2004.

3. Павленко А. И., Титов Ю. П. Сравнительный анализ модифицированных методов муравьиных колоний // Прикладная информатика. 2012. № 4(40). С. 100—112.

4. Титов Ю. П. Модификации метода муравьиных колоний для решения задач разработки авиационных маршрутов // Автоматика и телемеханика. 2015. № 3. С. 108—124.

## ANT COLONY METHOD ALGORITHM FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE ROUTE SELECTION

Yu. P. Titov, O. T. Romanov, M. N. Mashkin  
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

*An algorithm of the ant colony method is considered for choosing the route of an unmanned aerial vehicle from a given starting point of takeoff to a given final point of flight. An algorithm for the ant colony method using a negative pheromone is proposed.*

**Keywords:** unmanned aerial vehicle, optimization, ant colonies.

---

Титов Юрий Павлович, доцент.

E-mail: kalengul@mail.ru

Романов Олег Тимофеевич, доцент.

E-mail: r860909@yandex.ru

Машкин Михаил Николаевич, доцент.

E-mail: mn mashkin@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 23 мая 2022 г.

УДК 681.518.2

DOI: 10.52190/2073-2597\_2022\_3\_32

EDN: QEGLQC

## РАЗРАБОТКА МЕХАНИЗМОВ ИНТЕГРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕДАКТОРА И МОДЕЛЛЕРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОСЕРВИСОВ

Г. Е. Семенов, канд. техн. наук

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Москва, Россия

*Рассмотрен комплекс решений по созданию технологических редакторов и моделлер, выполняющих функции экспертных систем для автоматизированной генерации технологических решений. Также рассмотрены различные подходы для интеграции различных модулей в единую систему предприятия. Показаны перспективы построения технологических редакторов в виде Web-ориентированных приложений. Рассматривается переход серверной части приложения к микросервисной архитектуре, которая позволит увеличить масштабируемость системы и гибкость разработки.*

**Ключевые слова:** PLM, PDM, технологическое проектирование, микросервисная архитектура, Web-ориентированные приложения.

Технологический процесс является важнейшим элементом на производственном предприятии, содержащий целенаправленные действия по изменению и определению состояния предметов труда, к которым относятся заготовки и изделия. Процесс состоит из технологических операций, выполняемых в заданной последовательности. С его помощью происходит превращение заготовок и сырья в конечный продукт для потребителя. Технологический процесс является частью производственного процесса, в который входит большое количество операций при производстве продукции.

Разработка и сопровождение технологических процессов, маршруты операций на производстве нуждаются в создании автоматизированных решений. Производя технологические операции, рабочему на производственном предприятии необходимо понимать четкую последовательность действий, которую следует выполнять, работая над тем или иным видом изделия. При этом информационная модель должна содержать все атрибуты технологического процесса, предоставлять набор инструментов редактирования максимально приближенных к методикам формирования технологической документации, учитывать традиции, сформированные на предприятии за многие годы работы, а также должна быть простой для освоения. На рынке существует небольшое число специализирован-

ных систем, ориентированных на технологическое проектирование. Существуют модули в рамках PDM и PLM-систем, которые имеют широкий спектр возможностей для описания бизнес-процессов работы различных отделов предприятия, но не предоставляют узконаправленный функционал для работы технологических подразделений. Используя данную систему, технологу необходимо прибегать к различным источникам информации, проходить длительный процесс обучения, что замедляет процесс проектирования.

Все эти факторы говорят о том, что необходимо создать информационную модель, которая будет являться централизованной системой сопровождения технологических процессов, предоставляющей полный перечень операций, производимых над заготовкой, всю необходимую организационно-технологическую информацию, требуемую для преобразования исходной формы в готовое изделие (рис. 1).

Вторым этапом будет создание набора сервисов, взаимодействующих с базой данных, и разработка интерфейсной части. Можно использовать классические проверенные технологии для создания десктопных приложений, например Windows Forms, WPF, Qt. Однако сейчас многие корпоративные системы разрабатываются с использованием Web-ориентированных технологий.

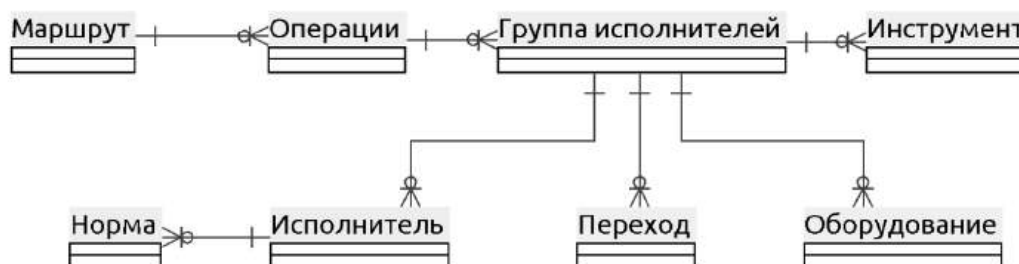


Рис. 1. Информационная модель технологического редактора



Использование современных технологий *Web*-программирования позволяет сделать процесс разработки более гибким, приложения обладают кроссплатформенностью, а процесс установки не требует дополнительных библиотек. Многие связывают *Web*-приложение с выходом в глобальную сеть *Internet*, что иногда невозможно на многих машиностроительных предприятиях стратегического назначения. Однако данное приложение подразумевает клиент—серверный подход, в котором клиент взаимодействует с *Web*-сервером посредством браузера. *Web*-сервер с приложением может находиться на территории закрытого предприятия, не имея выхода в глобальную сеть. Большинство *Web*-приложений более совместимы с различными платформами, чем традиционно установленные приложения. Стандартным требованием является установка браузера, который всегда в наличии в операционной системе (*Internet Explorer*, *Firefox*, *Chrome*, *Safari*). *Web*-приложения можно запустить независимо от того, использует ли пользователь *Windows*, *Linux* или *MacOS*. *Web*-приложение необходимо установить на сервер, что требует минимальных ресурсов на клиентской машине.

Поддержка и обновление таких систем проще, так как клиентские обновления могут быть легко развернуты через *Web*-сервер. Благодаря легкой поддержке и кроссплатформенности, развертывание *Web*-приложений для любой платформы в любом окружении не составит труда. Преимуществом является то, что при таком подходе трафик ограничен, а система и данные удалены от пользователя. В случае возможности развертывания приложения в глобальной сети необходимо послать пользователю адрес сайта и подключить доступ в *Internet*. Это увеличивает возможности, позволяя расширить доступ к удаленным системам, предоставляя доступ географически удаленным пользователям и организациям. Крупные корпоративные системы обрабатывают большое количество данных, имеют модульную структуру, работают с различными источниками данных. При *Web*-ориентированных подходах данные системы и процессы могут быть консолидированы, уменьшается потребность в децентрализованных сервисах. Однако декомпозиция системы может быть проведена исходя из потребностей масштабируемости. Следует отметить, что *Web*-приложения предоставляют дополнительный слой безопасности, предотвращая прямой доступ к данным на сервере. При построении таких систем снижается стоимость благодаря упрощению поддержки, уменьшению требований на стороне пользователя и более простой архитектуре. Такие системы имеют более гибкие варианты построения на основе сервисной или микросервисной архитектуры, позволяют разработать гибкие подходы интеграции приложения в существующие системы управления на производстве, а также сократить временные расходы на их развертывание.

Взаимодействие может осуществляться коммуникационными механизмами: *REST API* (*GET*, *POST*, *PUT*, *DELETE*), *GraphQL*, асинхронными сообщениями. *GraphQL* целесообразно использовать для агрегации данных, что увеличивает независимость *front-end* и *back-end* разработчиков. Следует отметить, что разработка клиентской части данного продукта ведется при помощи библиотеки *React* и библиотеки *Next.js*. Ведется дискуссия по поводу стратегии рендеринга страниц в браузере [1]. Раньше при использовании таких фреймворков как *Spring*, содержание страницы в виде *HTML* и *CSS* подготавливалось на стороне сервера с помощью шаблонизаторов, а затем контент отображался с помощью браузера. С появлением *JavaScript* фреймворков применяется совершенно другой подход при разработке, позволивший снизить нагрузку на сервера. Используя мощность таких библиотек как *React*, стало возможным обрабатывать динамический контент прямо в браузере, запрашивая лишь необходимые ресурсы с сервера. Сервер в данном сценарии служил лишь генератором базового контента. Действия со страницей производит на пользователя впечатление бесшовности, так как затрачивается небольшое время на загрузку дополнительного контента. Более того, будучи загруженной, страница не обновляется при выполнении операций пользователем.

Однако усложнение интерфейсной части современных систем стало причиной медленной первоначальной обработки контента на стороне клиента. Сервер естественно предполагает машину с высокой вычислительной мощностью и высокоскоростным сетевым соединением. Клиент, напротив, имеет ограниченные вычислительные ресурсы, а процесс загрузки и рендеринга может занять значительное время. В результате первоначальная обработка контента на стороне сервера выполняется быстрее. При проектировании архитектуры клиентской части технологического редактора был предложен следующий подход. Пользователь посылает запрос на сайт через браузер, сервер проверяет ресурсы, компилирует и подготавливает контент, используя серверные скрипты. Скомпилированная страница посылается на сторону клиентского браузера для дальнейшей обработки и отображения. Браузер затем по мере необходимости загружает *Javascript*, что делает страницу интерактивной. *React* по умолчанию не поддерживает рендеринг на стороне сервера, поэтому при разработке использована библиотека *Next.js*.

На стартовой странице (рис. 2) выводится список маршрутов, для создания различных единиц продукции.

Карточка технологических процессов состоит из названия технологического процесса (пишется название изготавливаемой детали), обозначения, кода технологического процесса и цеха, в котором производятся работы по превращению исходной заготовки в конечное изделие.

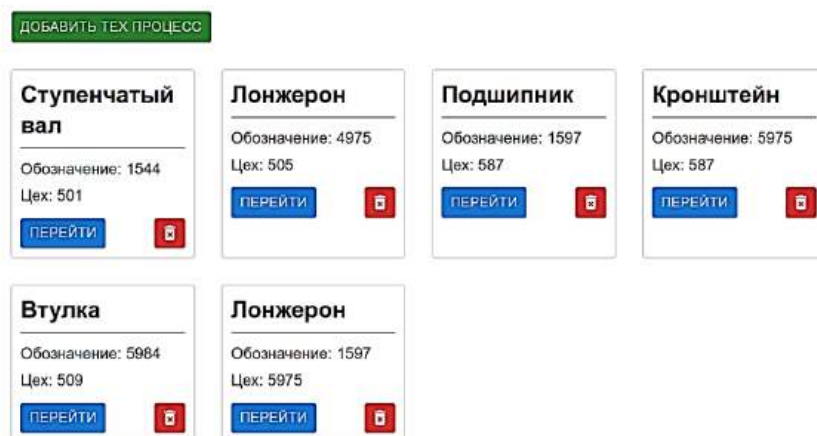


Рис. 2. Страница создания технологических процессов

Сложные сборочные технологические процессы требуют более гибкой структуры, учитывающей последовательность выполнения задач, а также возможность указания задач, которые могут выполняться параллельно.

На данной странице есть возможность создать новый технологический процесс, перейти в уже существующий или удалить технологический процесс. При нажатии на кнопку "Добавить технологический процесс" открывается модальное окно, где появляется возможность создать новый технологический процесс. Нажимая на кнопку "Перейти", пользователь перехо-

дит на страницу, где находится содержание технологического процесса. При нажатии на кнопку с иконкой корзины, происходит удаление технологического процесса. С помощью механизма перетаскивания и связывая задачи стрелочками, технологи могут построить сложные сборочные маршруты, увязав их в последовательные цепочки (рис. 3).

При нажатии указателем мыши на прямоугольник пользователь переходит к табличной форме представления технологического процесса (рис. 4).

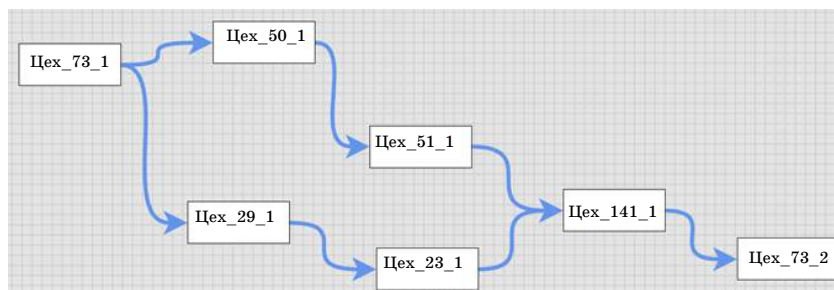


Рис. 3. Визуализация представления маршрутов

Наименование:

Ступенчатый

Обозначение:

1544

Цех:

501

☒

Операции

☐

Содержание

Тшт:

45

45

Тпз:

98

98

Тест:

69

69

РАССЧЕТ

ПРИНЯТЬ

☐

Норма

ЗАГОТОВКА

Опер. ▾

ОБОРУДОВАНИЕ

ПЕРЕХОД

ПРИСПОСОБЛЕНИЕ

ИНСТРУМЕНТ

^

v

☰

☲

☳

| Номер операции | Наименование операции | Цех | Участок | Тшт | Тпз | Тест | ОО                                  | ОТК                                 | ПЗ                                  | КПС                                 | Действия                          |
|----------------|-----------------------|-----|---------|-----|-----|------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 010            | Координатно-расточная | 9   | 11      | 17  | 36  | 20   | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <div><div></div><div></div></div> |
| 020            | Хонинговальная        | 15  | 11      | 5   | 17  | 13   | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <div><div></div><div></div></div> |
| 030            | Фрезерная операция    | 57  | 54      | 6   | 15  | 14   | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <div><div></div><div></div></div> |
| 040            | Токарная операция     | 22  | 77      | 8   | 15  | 13   | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <div><div></div><div></div></div> |
| 050            | Суперфиниш            | 33  | 97      | 9   | 15  | 9    | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <div><div></div><div></div></div> |

Рис. 4. Табличная форма технологического процесса

В табличной форме с операциями существует возможность удаления и редактирования операций. Кнопка удаления находится в колонке "Действия" и имеет знак корзины. При нажатии на данную кнопку, всплывает окно с подтверждением удаления. Это сделано в целях защиты от случайных нажатий. При вводе новой операции, если данные соответствуют требованиям, происходит проверка на наличие данной операции в базе данных. Для этого отправляется *GET*-запрос на сервер для получения операции с созданным "*oper\_id*". Если указанный идентификатор в базе есть, то выполняется *PUT*-запрос на изменение данных, иначе на сервер приходит *POST*-запрос для добавления новой операции в таблицу. При вводе данных и нажатии на кнопку "Сохранить" предусмотрена валидация полей на соответствие регулярным выражениям.

Структура элементов технологического процесса имеет иерархическую структуру "многие-к-одному" и легко может быть представлена в виде дерева в окне приложения. Такой подход используется во многих западных *PDM*-системах. При проектировании реляционной информационной модели авторы учитывали эти зависимости между сущностями, однако, технологи и другие специалисты предприятия привыкли к линейной структуре операций, переходов, приспособлений и элементов оснащения. Такое представление следует из технологической документации, формируемой на предприятии. Компьютерная форма представления дает возможность применения дополнительных фильтров, позволяющих выполнять различную детализацию технологического процесса. В приложении предлагается три вида представлений технологического процесса: операции (наименее детализированная форма представления), со-

держание (полная детализация технологического процесса с описанием приспособлений, инструмента и оборудования), норма (форма, содержащая организационно-экономические параметры, которая может быть использована при выполнении нормирования технологического процесса).

В верхней части таблицы (рис. 5) отображены цветные кнопки для добавления оборудования, перехода, приспособления и инструмента к каждой операции. Цвета позволяют более наглядно различать типы элементов технологического процесса в табличной форме детализированного технологического процесса.

Любая операция проводится на одном рабочем месте, т. е. выполняется на одном станке, поэтому при нажатии на кнопку "Сохранить" происходит проверка, выбрано оборудование для операции или нет. Если оборудование для данной операции еще не было добавлено, то на сервер отправляется *POST*-запрос для записи данных в таблицу с оборудованием. Каждое модальное окно при вводе данных соответствующего технологического элемента содержит атрибуты и правила валидации, применимые к данному элементу. При добавлении приспособления происходит проверка, добавлено ли выбранное приспособление с инвентарным номером и кодом к данной операции. Если выбранное приспособление не добавлено, происходит запись данных в базу данных, иначе поля выделяются красным цветом и показывается сообщение: "Данное приспособление уже задано для операции". Аналогично валидацию проходят остальные элементы технологического процесса.

Для выполнения нормирования технологического процесса используем третье представление (рис. 6).

| Номер операции | Наименование операции | Содержание операции          | Инвентарный номер | Код оборудования | Тшт | Тпз | Тест | Действия  |
|----------------|-----------------------|------------------------------|-------------------|------------------|-----|-----|------|---|
| 010            | Координатно-расточная |                              |                   |                  | 17  | 36  | 20   |   |
|                |                       | Координатно-расточной станок | 2465              | 5745             |     |     |      |     |
|                |                       | Установить заготовку         |                   |                  |     |     |      |    |
|                |                       | Проточить торец              |                   |                  |     |     |      |    |
|                |                       | Тиски                        | 4697              | 9875             |     |     |      |     |
|                |                       | Хон                          | 3456              | 7989             |     |     |      |     |
| 020            | Хонинговальная        |                              |                   |                  | 5   | 17  | 13   |   |
|                |                       | Хонинговальный станок        | 4567              | 4597             |     |     |      |     |
|                |                       | Просверлить отверстие        |                   |                  |     |     |      |    |
|                |                       | Закрепить заготовку          |                   |                  |     |     |      |    |
|                |                       | Тиски                        | 6475              | 3211             |     |     |      |     |
|                |                       | Хон                          | 3456              | 7989             |     |     |      |     |
| 030            | Фрезерная операция    |                              |                   |                  | 6   | 15  | 14   |   |
|                |                       | Фрезерный станок             | 2645              | 4564             |     |     |      |     |
|                |                       | Обточить поверхность         |                   |                  |     |     |      |    |

Рис. 5 Полная детализация технологического процесса

Наименование:  Обозначение:  Цех: 
☐ Операции ☐ Содержание

Тшт:   Тпз:   Тест:  
 
☒ Норма

| Номер операции | Наименование операции | Исполнитель операции | Тшт | Тпз | Тест | Тшт (расч.) | Тпз (расч.) | Тест (расч.) | КВР  | Действия |
|----------------|-----------------------|----------------------|-----|-----|------|-------------|-------------|--------------|------|----------|
| 010            | Координатно-расточная |                      |     |     |      |             |             |              |      |          |
|                |                       | 2365                 | 17  | 36  | 20   | 17          | 36          | 20           | 4564 |          |
| 020            | Хонинговальная        |                      |     |     |      |             |             |              |      |          |
|                |                       | 5555                 | 5   | 17  | 13   | 5           | 17          | 13           | 6495 |          |
| 030            | Фрезерная операция    |                      |     |     |      |             |             |              |      |          |
|                |                       | 7777                 | 6   | 15  | 14   | 6           | 15          | 14           | 1247 |          |
| 040            | Токарная операция     |                      |     |     |      |             |             |              |      |          |
|                |                       | 1597                 | 8   | 15  | 13   | 8           | 15          | 13           | 1254 |          |

Рис 6. Представление расчета норм технологического процесса

Для расчета рабочего времени на технологический процесс изготовления продукции, а также анализа экономических показателей используются значения параметров  $T_{шт}$ ,  $T_{пз}$ ,  $T_{ест}$ .

Во вкладке "Норма" технолог может производить расчет  $T_{шт}$  (штучное время),  $T_{пз}$  (подготовительно-заключительное время),  $T_{ест}$  (естественное время):

$T_{шт}$  — продолжительность выполнения технологической операции, не учитывающее время на подготовку исполнителя;  $T_{пз}$  — связано с подготовкой к выполнению задания и действиями по его окончанию;  $T_{ест}$  — время на естественные перерывы, если они входят в технологический процесс производства (сохнет краска, нагрев или охлаждение деталей).

В форме присутствуют рассчитанные в текущий момент характеристики и характеристики, записанные ранее в базу. В недоступном для редактирования поле, находящемся в шапке формы, хранится агрегированный показатель по каждой норме. В случае необходимости внесения поправок в нормы технолог может внести требуемые данные в доступное для редактирования окно в шапке формы. При нажатии на кнопку "Расчет" происходит пересчет норм у всех элементов технологического процесса пропорционально ранее введенным показателям. При нажатии на кнопку "Принять" новые данные сохраняются в базе.

Редактор дает возможность создания информационной модели изделия, но важно также рассмотреть вопросы генерации технологических решений. При проектировании необходимо решить проблему взаимодействия редактора и моделиера, а также декомпозицию моделиера с возможным переходом на микросервисную архитектуру. Информационная модель организационно-технологической среды должна обеспечить генерацию образа операции (процесса), моделируемой в производственной системе в

связи с определенными условиями производственной ситуации. Для этого необходимо организовать информационное взаимодействие четырех групп моделей: технологической модели изделия, модели технологического решения и модели организационно-экономического решения, формирующих системы данных, а также модели производственной системы, порождающей эти данные. Для моделей порождающей среды можно использовать быстрые хранилища типа ключ—значение. Например, база *Redis* обеспечивает время отклика на уровне долей миллисекунды и позволяет приложениям, работающим в режиме реального времени, выполнять миллионы запросов в секунду. Построение технологических решений осуществляется процедурами технологического моделиера, состав которых в зависимости от настроек процесса проектирования может изменяться. Основными процедурами построения решений являются: структурное проектирование; параметрическое проектирование; геометрические расчеты. Вызов процедур выполняется автоматически и может быть осуществлен в пошаговом режиме. Обработка сопровождается отображением некоторых результатов в окне "Статистика" и указанием на номер обрабатываемого элемента их технологической модели изделия. В результате обработки происходит определение состава и содержания операций, выполняется нормирование технологического процесса. Технологические решения представляются в структурно-параметрической базе данных, в которой содержится в виде ссылок на технологическую модель изделия и технологические базы знаний информация, включенная в решение задачи по проектированию технологического процесса. Информация, содержащаяся в модели технологического решения, используется в дальнейшем для формирования конструкторско-технологической документации (КТД) по изделию в целом



или по любой конструктивной составляющей изделия. В модели решения хранится не только оптимальный по определенному критерию вариант, но и другие допустимые варианты реализации техпроцесса. Хранение вариантов решения необходимо по объективным причинам. Во-первых, в современных технико-экономических условиях нередко происходит смена критерия оптимальности решения или возникает необходимость комплексирования разных критериев оптимизации. При этом хранение вариантов решений обеспечивает быстрый и простой поиск нового решения. Во-вторых, выход из строя определенного элемента технологической системы может привести к невозможности реализации техпроцесса. Тогда среди хранимых решений может быть выбран другой вариант реализации техпроцесса, не использующий вышедший из строя элемент (ресурс). Существует четыре базовых приема при проектировании технологических процессов: диалоговое проектирование производится набором вышеперечисленных элементов из справочников; заимствование — за основу берется какой-либо технологический процесс (полностью или частично), который затем дополняется элементами другого процесса; компоновка из готовых блоков — блоком является функционально законченный для какой-либо операции или их совокупности технологический процесс; автоматическое проектирование — повторное выполнение проектных действий с возможностью внесения изменений. Модель исходного объекта (МИО) содержит минимально необходимую выборку информации об изделии для выполнения технологического проектирования. Например, для операций заготовительно-штамповочного производства модель содержит следующую информацию: вид заготовки (качественная характеристика геометрии); материал; геометриче-

ские характеристики, а для операций механообработки — вид обрабатываемой поверхности, ее размеры, качество и шероховатость; прилегающие поверхности; материал заготовки; условия обработки. Модель порождающей среды (МПС) совместно с процедурами управления структурно-параметрическим моделированием организует процесс технологического проектирования на основании информации, содержащейся в модели исходного объекта [2]. Выделение МПС позволяет систематизировать процесс выделения и накопления знаний, например, в виде моделей типовых операций, объединяющих правила формирования структурных решений и расчета технико-экономических характеристик решений. Модель технического решения (технологического процесса), сохраняя в виде ссылок на МИО и МПС варианты допустимых технологических решений, содержит информацию, необходимую для формирования технологического документа. Идея параллельного выполнения конструкторских и технологических работ сталкивается с проблемой частого внесения изменений в конструкцию, связанных не только с доработкой базовой модели, но и внесением изменений по требованиям заказчика. В такой ситуации МИО, являясь хранителем набора элементарных проектных воздействий (ЭПВ), а обеспечивая возможность повторного автоматического выполнения действий проектировщика, становится вероятно единственным способом решения проблемы, препятствующей эффективному распараллеливанию конструкторских и технологических работ [3]. Формирование технологического процесса предполагает комплекс действий по выбору определенного варианта решения из числа допустимых, полученных на этапе построения решений. Запуск процедуры "Формирование ТП" приводит к появлению окна, изображенного на рис. 7.

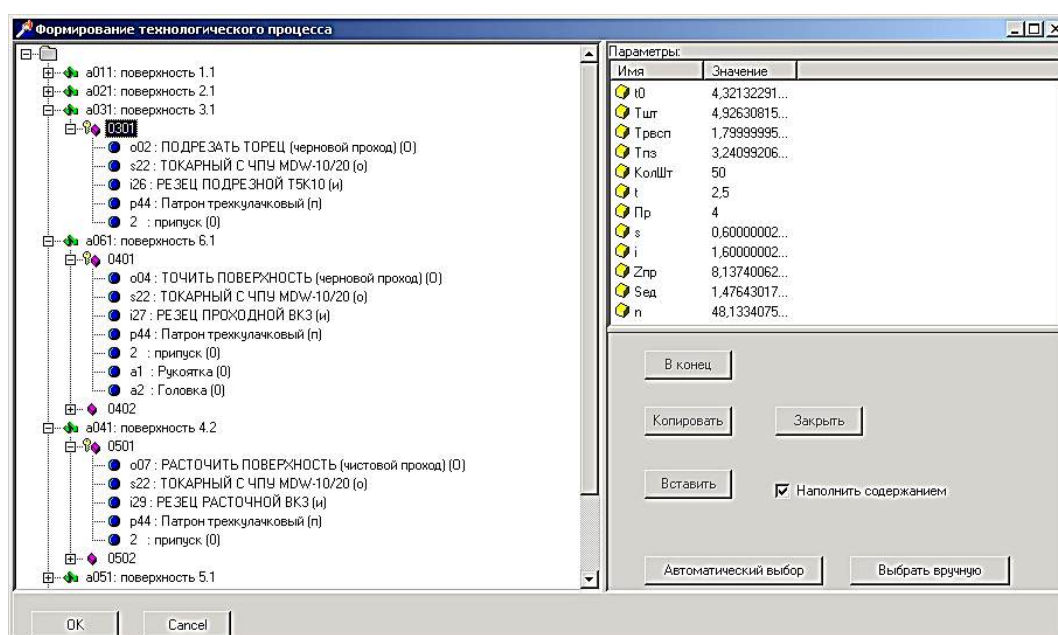


Рис. 7. Процедура "Формирование ТП"



Модель технологического решения (МТР) имеет три уровня: первый уровень — элементарно обрабатываемые поверхности (ЭОП). Обработка будет выполнена, если на этапе нормирования были рассчитаны соответствующие характеристики решения (выполнения операции или перехода):  $T_{шт}$  — штучно-калькуляционное время;  $Z_{пр}$  — приведенные затраты;  $S_{ед}$  — себестоимость единицы продукции. При выполнении процедуры происходит автоматический выбор элемента ТП по указанному критерию и установление признака его включения в технологический процесс.

Изначально такой признак устанавливается для каждого первого полученного варианта решения. Для просмотра результатов проектирования пользователю необходимо выполнить развертку уровня вариантов решения в модели технического решения и заполнить дерево МТР содержательной информацией. Можно последовательно просмотреть все фрагменты ТП с указанием наименования операции, перехода, оборудования, инструмента, оснастки, а также наименованием и обозначением элемента изделия. Числовая информация о технико-экономических показателях, состав которой определен в модели элементарного решения, выводится в окно "Параметры". Диалоговый режим дает возможность пользователю самостоятельно на основе анализа вариантов выбрать из найденных решений нужное и сформировать окончательное решение. Выполнить данное действие можно с помощью команды "Выбрать". Для осуществления анализа вариантов пользователь может руководствоваться информацией о содержании и количественных характеристиках решения [4].

Необходимо также рассмотреть архитектурные принципы всей системы и ее интеграцию в структуру предприятия. Выделим два типа баз: консистентное хранилище, отвечающее принципам *ACID* (*atomicity* — атомарность, *consistency* — консистентность, *isolation* — изолированность, *durability* — стойкость). Базы (МТР), принимающие большой поток неструктурированных данных в процессе проектирования и работы технологического моделилера, могут быть построены по принципу *NoSQL*-документных баз. Используем реплики баз данных *MongoDB*. Базы МПС будут представлять размещаемое в памяти хранилище "ключ-значение". Очевидно, что необходимо, чтобы каждую базу обслуживал свой сервис. Для повышения масштабируемости авторской системы, предполагая в будущем увеличение количества реплик баз МПС, взаимодействие между сервисами должно быть асинхронным. Таким образом для построения авторской системы выберем микросервисную архитектуру.

Микросервисы маленькие, независимые и не имеют жестких связей. Сравнительно маленькая команда разработчиков может поддерживать сервис. Каждый сервис может иметь раз-

личную кодовую базу и поддерживаться независимой группой разработчиков. Сервисы проектирования, редактирования, оптимизации технологических процессов могут быть развернуты независимо. Команда разработчиков может вносить изменения в существующие сервисы без полной сборки и развертывания всего приложения. Сервисы несут ответственность за хранение своих собственных данных или внешнего состояния. Данный подход отличается от традиционных моделей, где отдельный слой управления данными отвечает за поддержку базы данных [5]. Сервисы взаимодействуют друг с другом, используя спроектированный *API*, посредством *REST* или брокеров-сообщений. Внутренняя реализация сервисов скрыта друг от друга. Сервисы могут использовать различные технологические стеки, библиотеки и фреймворки. При данном подходе может легко осуществляться управление и оркестрация сервисов. Если какой-либо сервис становится недоступен, это не приводит к потере работоспособности всего приложения при условии, что грамотно спроектированные сервисы способны обрабатывать ошибки. Существуют технологии, ответственные за развертывание сервисов на узлах кластера, способные выполнять мониторинг работоспособности системы, выявлять неисправности, выполнять балансировку реплик сервисов на кластерных узлах. Существуют готовые решения, например, *Kubernetes*, избавляя от необходимости разрабатывать данный функционал самостоятельно. Сервисы могут быть масштабированы независимо, если какая-либо часть подсистемы требует большее количество ресурсов, а полное масштабирование всей системы не требуется. В этом помогают такие эффективные оркестраторы как *Kubernetes*. Независимость при таком подходе достигается за счет изоляции данных. В монолитных системах модификация данных является вызовом для разработчиков, так как различные части модели данных используются различными сервисами совместно. Теперь модификация данных полностью безопасна, а тип базы данных можно варьировать в зависимости от характера данных и нагрузки системы. В высоконагруженных системах трафик перенаправляется в *API Gateway*, шлюзу-систему, которая является общей точкой входа в приложениях, работающих через *API*. *API Gateway* является входной точкой для клиентов. Преимуществами такого подхода является наличие единой точки входа для всех клиентов. Вместо прямого вызова сервисов клиенты обращаются к *API Gateway*, который перенаправляет вызовы на соответствующий сервис в серверной части, что разрывает жесткую связь между сервисами и клиентами. Сервисы могут быть версионированы или реорганизованы без необходимости обновления всех клиентов. Сервисы в таком случае могут использовать *AMQP*-протоколы, используемые брокерами сообщений. Также *API Gateway* выполняет общеорганиза-

ционные функции: аутентификацию, логирование, *SSL* терминацию и балансировку нагрузки.

Большое внимание при интеграции всей системы следует уделить принципам коммуникации сервисов в системе. Клиенты и сервисы могут взаимодействовать через различные протоколы взаимодействия, преследуя различные сценарии и цели. *Web*-ориентированные модули технологического редактора используют синхронный протокол *HTTP*. *Web*-ориентированный клиент посылает запрос и ждет ответа от сервера. Независимо от кода клиент может продолжить работу, когда он получит ответ от *HTTP*-сервиса. Взаимодействие между сервисами проектирования, оптимизации и редактирования использует *AMQP*-протокол. Протокол поддерживается многими операционными системами и облачными средами и использует асинхронные сообщения. Приложение клиента, пославшее сообщение обычно не ждет ответа, оно просто посылает сообщение в очередь *RabbitMQ* или другому брокеру. Также необходимо определиться с топологией консьюмеров и продюсеров. Возможно, что каждый запрос должен выполняться только одним консьюмером. Однако высоконагруженные сервисы технологического проектирования и технологической оптимизации требуют эффективного масштабирования. В этом случае потребуются топология "один-ко-многим". В данной структуре запросы одного продюсера, генерирующего задачи на технологическое проектирование, могут выполняться несколькими консьюмерами,

т. е. сервисами проектирования и оптимизации. Такой тип взаимодействия должен быть асинхронным, должен использоваться механизм издатель/подписчик, используемый в событийно-ориентированной архитектуре. Таким образом можно эффективно интегрировать технологические микросервисы в структуру предприятия. В идеале необходимо пытаться минимизировать взаимодействие между внутренними сервисами. Чем меньше сообщений между сервисами, тем лучше. Но такой сложный процесс, как процесс технологического проектирования, не может полностью исключить взаимодействий между модулями системы. Критическим правилом здесь будет то, что взаимодействие между сервисами будет асинхронным. Это не означает, что необходимо использовать определенный протокол (например, асинхронный обмен сообщениями по сравнению с синхронным *HTTP*). Это означает, что связь между микросервисами должна осуществляться только путем асинхронного распространения данных, и при этом не зависеть от других внутренних сервисов. Пытаемся не полагаться на синхронную связь (запрос/ответ) между несколькими микросервисами даже для выполнения запросов. Цель каждого микросервиса — быть автономным и доступным для клиента-потребителя, даже если другие службы, являющиеся частью сквозного приложения, отключены или неработоспособны. Архитектура технологической системы, включающая несколько моделлеров и оптимизаторов, представлена на рис. 8.

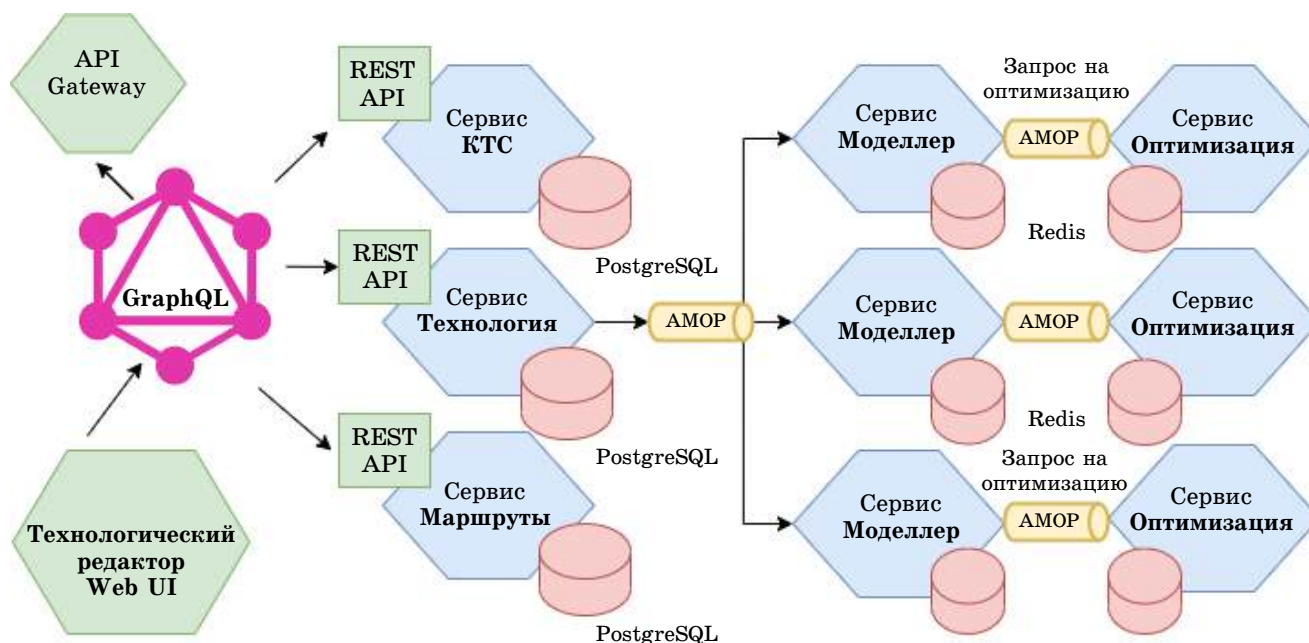


Рис. 8. Архитектура технологической системы

Технологический редактор построен с помощью *Web*-ориентированных технологий, сервис "Технология" предоставляет синхронный *REST API* для реализации взаимодействия сервиса и пользователей. Сервис обслуживает консистентное хранилище, построенное на базе данных *PostgreSQL*. Приложение построено по принципам микросервисной архитектуры и включает следующие сервисы: технология, конструкторско-технологический сервис (КТС), сервис технологических маршрутов, при этом сервисы проектирования (моделлер) и оптимизации представлены в виде нескольких реплик. Внутренне взаимодействие сервисов реализовано с помощью асинхронного протокола *AMPQ*. Сервисы моделлера и оптимизатора работают со слабоструктурированной информацией огромного объема, большого разнообразия, которая обрабатывается горизонтально масштабируемыми программными инструментами. Для поддержания этих баз эффективно применять быстрые хранилища данных в памяти, такие как *Redis*.

Таким образом, результатом архитектурного проектирования стала хорошо масштабируемая и высокопроизводительная система технологи-

ческого проектирования, которая позволит осуществлять наращивание объемов и количества технологических баз, выполнять ресурсоемкие алгоритмы оптимизации, хранить большие объемы моделей технологических решений и взаимодействовать с остальными системами предприятия.

#### Литература

1. Mohit Takkar. Building React Apps with Server-Side Rendering. — Apress, 2020. — 192 p.
2. Цырков А. В. Структурно-параметрический моделлер — основа построения комплексных информационных моделей производственных систем // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2005. № 1. С. 51—58.
3. Островерх А. И., Цырков Г. А. Информационно-алгоритмическая среда системы подготовки производства // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2009. № 2. С. 3—12.
4. Бутко А. О., Сычев В. Н., Цырков А. В. Особенности реализации методики поддержки базы технологических процессов // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2011. № 4. С. 32—39.
5. Richardson C. Microservices Patterns, Manning Publications. 2018. — 520 p.

## INTEGRATION MECHANISM DEVELOPMENT FOR TECHNOLOGY EDITOR AND MODELER USING MICROSERVICE ARCHTECTURE

G. E. Semenov

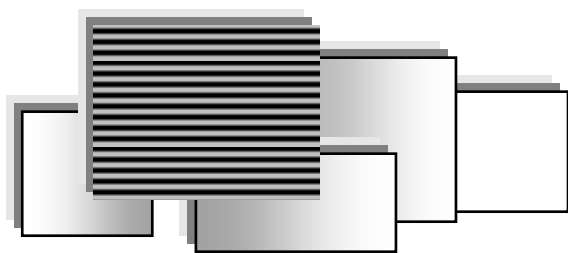
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

*This article describes the range of solutions to develop technology editors and modeler acting as expert systems for technology solution generation. Also different approaches considered to integrate different modules into a centralized enterprise system. This article reflects benefits of developing technology editors in the form of Web-based applications. This article describes backend monolithic applications to microservices architecture migration which allows to improve system scalability and development flexibility.*

**Keywords:** PLM, PDM, design for manufacturing, microservices architecture, Web-based software.

Семенов Григорий Евгеньевич, доцент.  
E-mail: semenovge@mai.ru

Статья поступила в редакцию 11 июня 2022 г.



## ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 519.63:539.373

DOI: 10.52190/2073-2597\_2022\_3\_41

EDN: QFRWEO

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР ОКРУЖАЮЩЕГО ВОЗДУХА НА ТЕРМОУПРУГОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕКТРОМУФТОВОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ

Р. С. Тихонов, канд. техн. наук; Н. П. Старостин д-р техн. наук;

О. А. Аммосова, канд. техн. наук

Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН — обособленное подразделение  
ФГБН ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения РАН», г. Якутск, Россия

*Приведены результаты расчета динамики температурного поля и напряженно-деформированного состояния электромuftового сварного соединения полиэтиленовых труб при различных температурах окружающего воздуха. Показано, что при сварке по регламентированному режиму в условиях низких температур размер расплавленной зоны существенно меньше, чем при допустимой температуре. Расчетами показано, что сварка при низких температурах может привести к таким нежелательным эффектам, как низкое значение давления между трубой и муфтой и большие значения остаточных напряжений.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, тепловой процесс, термоупругое состояние, сварка, полиэтиленовая труба, муфта, фазовое превращение, метод конечных элементов, низкие температуры.

При электромuftовой сварке концы полиэтиленовых труб вводят в электросварную муфту. На закладной нагреватель, вмонтированный в тело муфты, подается электрический ток, в результате которого спираль нагревает внутреннюю поверхность муфты и наружную поверхность трубы до вязкотекучего состояния. В муфте и трубе реализуется нестационарное неоднородное температурное поле, обуславливающее появление температурных напряжений, в том числе необходимое для сварки давление между трубами и муфтой на стадии формирования сварочного шва. В процессе сварки в зоне оплавления полиэтиленового материала происходят фазовые превращения в интервале температур с поглощением и выделением скрытой теплоты и изменением степени кристалличности материала. Расчет динамики температурного поля и напряженно-деформированного состояния необходим при разработке технологии сварки полиэтиленовых труб при низких температурах [1, 2]. Естественно, термоупругая мо-

дель, не учитывающая вязкоупругие свойства свариваемого материала, является приближенным описанием термомеханических процессов сварки полимерного материала. Тем не менее, разработанные алгоритмы решения термоупругой задачи послужат основой для развития методов решения термомеханических задач сварки полимерных материалов в дальнейших исследованиях. В данной работе на основе численного решения термоупругой задачи проводится сравнительный анализ тепловых процессов и напряженно-деформированного состояния при электромuftовой сварке в нормальных условиях и при низких температурах, необходимый для разработки технологии сварки при температурах ОБ путем управления термоупругим состоянием сварного соединения.

#### Моделирование теплового процесса

Распределение температуры при электромuftовой сварке полиэтиленовых труб можно опи-

сать уравнением теплопроводности с учетом двухфазной зоны [3]:

$$\begin{aligned} & \left( c(T) - \rho L^{100\%} \frac{dX_C}{dT} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \\ & = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \\ & + \frac{Q(T) - c_S \rho_S \frac{\partial T_S}{\partial t} V_S}{k 2 \pi r} \delta(r - r_S) \sum_{i=1}^k \delta(z - z_i), \\ & r, z \in \Omega, \quad 0 < t \leq t_m, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $T$  — температура;  
 $t$  — время;  
 $t_m$  — время расчета;  
 $r, z$  — цилиндрические координаты;  
 $z_i$  — осевые координаты расположения витков;  
 $r_S$  — радиус намотки электронагревательной спирали в теле муфты;  
 $k$  — количество витков;  
 $Q(T)$  — плотность теплового источника;  
 $V_S$  — объем спирали;  
 $c$  — объемная теплоемкость;  
 $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  
 $\rho$  — плотность материала трубы и муфты;  
 $c_S, \rho_S$  — удельная теплоемкость и плотность материала спирали;  
 $L^{100\%}$  — удельная теплота фазового превращения полностью кристаллического полимера;  
 $X_C$  — степень кристалличности;  
 $\delta$  — дельта-функция Дирака.

Уравнение теплопроводности (1) дополняется начальным условием

$$T(x, t)|_{t=0} = T_{rd} \quad (2)$$

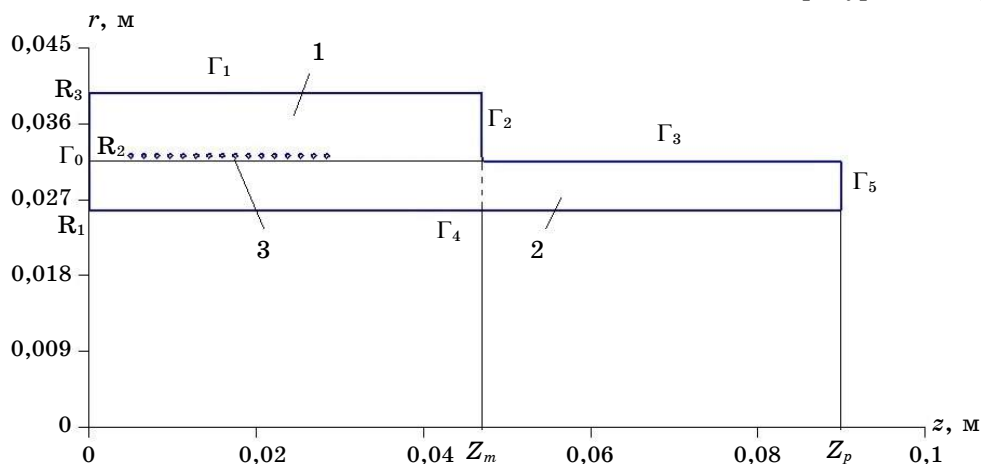


Рис. 1. Расчётная схема термоупругой задачи:  
 1 — муфта; 2 — труба; 3 — закладной нагреватель (спираль)

Граничные условия согласно расчётной схеме (рис. 1) имеют вид:

$$\begin{aligned} & \partial T / \partial \mathbf{n}|_{\Gamma_0} = 0, \\ & k(\partial T / \partial \mathbf{n})|_{\Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_3 \cup \Gamma_4} = \\ & = -\alpha \left( T|_{\Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_3 \cup \Gamma_4} - T_{rd} \right), \\ & T(x, t)|_{\Gamma_5} = T_{rd}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\mathbf{n}$  — вектор внешних нормалей границы тела;

$T_{rd}$  — температура окружающего воздуха.

Значения коэффициентов уравнения определялись по следующим формулам:

$$\begin{aligned} & c(T) = \rho^+ c^+ + X_C(T) \cdot (\rho^- c^- - \rho^+ c^+), \\ & \lambda(T) = \lambda^+ + X_C(T) (\lambda^- - \lambda^+), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $c^-, \rho^-, \lambda^-$  и  $c^+, \rho^+, \lambda^+$  — удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность для твердой и жидкой фазы материала свариваемых тел соответственно.

Степень кристалличности определялась по формуле:

$$X_C(T) = X_C^\infty + \frac{T_1}{L^{100\%} v_T} \int_{T_1}^T q(u) du, \quad T_1 < T < T_2, \quad (5)$$

где  $q(T)$  — зависимость теплового потока от температуры, отнесенная к единице массы вещества, регистрируемая дифференциальным сканирующим калориметром (ДСК);

$X_C^\infty$  — степень кристалличности материала трубы и муфты до начала сварки;

$v_T$  — скорость изменения температуры в ДСК;

$T_1, T_2$  — температуры солидуса и ликвидуса.

Дифференцируя интеграл по переменному верхнему пределу, имеем

$$\frac{dX_C}{dT} = \frac{q(T)}{L^{100\%}v_T}, \quad T_1 < T < T_2. \quad (6)$$

Уравнение (1) с эффективной теплоемкостью, записанной с использованием (6), описывает нестационарное температурное поле в сварном соединении с движущейся зоной раздела фаз. При этом теплота фазового превращения материала учитывается, используя данные ДСК и функцию степени кристалличности. Использование функции степени кристалличности позволяет учесть при расчетах, что полиэтилен кристаллизуется частично.

Плотность теплового источника вычислялась по формуле

$$Q(t) = \frac{U^2}{R[1 + \beta_R(T - 20)]V_S}, \quad (7)$$

где  $R$  — сопротивление спирали при температуре 20 °C;

$\beta_R$  — температурный коэффициент сопротивления.

Проведем аппроксимацию уравнения (1) с учетом граничных условий (3) с использованием метода конечных элементов с разбиением области на треугольные элементы [4]. Поскольку в действительности область цилиндрическая, элементы образуются вращением треугольников вокруг оси  $Oz$ . Чтобы интегрирование в среде Dolphin/FEniCS производилось по такой области, умножим уравнение (1) на  $2\pi r$ . Для конечно-элементной дискретизации умножим уравнение (2) на функцию  $v$  и проинтегрируем по области  $\Omega$  с использованием интегрирования по частям, получим

$$\begin{aligned} & 2\pi \int_{\Omega} r [c(T) - \rho_{df}\chi(T)] \frac{\partial T}{\partial t} v dr dz + \\ & + 2\pi \int_{\Omega} r [\lambda(T) \text{grad} T, \text{grad} v] dr dz = \\ & = 2\pi \int_{\Gamma} r \alpha (T - T_{rd}) v ds + \\ & + 2\pi \int_{\Omega} \frac{Q(T) - c_S \rho_S \frac{\partial T_S}{\partial t} V_S}{k 2\pi r} \delta(r - r_S) \sum_{i=1}^k \delta(z - z_i) v dr dz \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_3 \cup \Gamma_4$ .

Определим равномерную сетку по времени  $\omega_t = \{t^n = n, n = 0, 1, \dots, N_0, \tau N_0 = t_m\}$  и проведем аппроксимацию по времени с использованием стандартной чисто неявной схемы, тогда получим:

$$\begin{aligned} & 2\pi \int_{\Omega} r [c(T)^n - \rho_{df}\chi(T)^n] \frac{T^{n+1} - T^n}{\tau} v dr dz + \\ & + 2\pi \int_{\Omega} r [\lambda(T)^n \text{grad} T^{n+1}, \text{grad} v] dr dz = \\ & = 2\pi \int_{\Gamma} r \alpha (T^{n+1} - T_{rd}) v ds + \\ & + 2\pi \int_{\Omega} \frac{Q(T) - c_S \rho_S \frac{\partial T_S}{\partial t} V_S}{k 2\pi r} \delta(r - r_S) \sum_{i=1}^k \delta(z - z_i) v dr dz, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $T^n = T(t^n)$ .

Тогда имеем следующую вариационную постановку задачи для каждого временного слоя: найти  $T$  такую, что

$$a(T^{n+1}, v) = f(v),$$

где

$$\begin{aligned} f(v) = & \frac{2\pi}{\tau} \int_{\Omega} r [c(T)^n + \chi(T)^n] T^n v dr dz - \\ & - 2\pi \int_{\Gamma_1} r \alpha T_{rd} v ds + \\ & + 2\pi \int_{\Omega} \frac{Q(T) - c_S \rho_S \frac{\partial T_S}{\partial t} V_S}{k 2\pi r} \delta(r - r_S) \sum_{i=1}^k \delta(z - z_i) v dr dz. \end{aligned} \quad (10)$$

### Моделирование термоупругого состояния

Температурные напряжения при электромуфтовой сварке полиэтиленовых труб рассмотрим в квазистационарной постановке, в которой напряжения зависят от решения тепловой задачи сварки:

$$\text{div} \sigma - \beta \text{grad}(T - T_0) = 0. \quad (11)$$

Здесь  $\sigma$  — тензор напряжений,  $\beta = \beta_T(3\lambda + 2\mu)$ ,  $\beta_T$  — температурный коэффициент линейного расширения;  $\lambda, \mu$  — коэффициенты Ламе,  $T$  — текущая температура,  $T_0$  — равновесная начальная температура.

Соотношения Коши между тензором деформаций  $\varepsilon$  и вектором перемещений  $u$  имеют вид:

$$\varepsilon = 0,5 [\nabla u + (\nabla u)^T]. \quad (12)$$

Поскольку термическое влияние учтено в уравнении равновесия (9) в виде объёмных напряжений, физические соотношения Гука между тензорами напряжений и деформаций напомним без учёта температурных деформаций

$$\sigma = \lambda \nabla u \mathbf{I} + 2\mu \varepsilon, \quad (13)$$

в котором  $\mathbf{I}$  — единичный тензор.



Напряжённо-деформированное состояние (НДС) описывается уравнениями (11)–(13) со следующими граничными условиями:

$$\begin{aligned} \sigma n &= \beta(T - T_0), \quad x \in \Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_3 \cup \Gamma_4; \\ u_z &= 0, \quad x \in \Gamma_0; \quad u = 0, \quad x \in \Gamma_5. \end{aligned} \quad (14)$$

Термоупругая задача (11)–(13), (14) в вариационной постановке предполагает равенство энергии деформации и внутренних объёмных сил с энергией поверхностных сил

$$\begin{aligned} 2\pi \int_{\Omega} \left\{ \varepsilon^T(\mathbf{v}) D \varepsilon(\mathbf{u}) - [\beta \operatorname{grad}(T - T_0), \mathbf{v}] \right\} r dr dz = \\ = 2\pi \int_{\Gamma} \beta(T - T_0) \mathbf{v} r ds. \end{aligned} \quad (15)$$

Здесь  $\mathbf{v}$  — пробная вектор-функция для вектора перемещений  $\mathbf{u}$ ,  $D$  — известная матрица перехода между компонентами тензоров напряжений и деформаций согласно соотношению (13).

### Результаты расчета

Задача определения динамики температурно-го поля и НДС решалась методом конечных элементов с использованием программы свободного доступа Dolfen/FEniCS. Основным достоинством FEniCS-а является простая запись вариационного уравнения, близкая к математическим обозначениям, и возможность задания коэффициентов дифференциального уравнения в виде функций от температуры. Приведем результаты расчетов термоупругого состояния электромуфтовой сварки полиэтиленовых труб для газопроводов диаметром 63 мм из ПЭ100 SDR 11 при различных температурах окружающего воздуха (ОВ). Равновесная температура равна 20 °С. При моделировании термоупругого состояния в условиях низких температур считается, что сварное соединение с равновесной температурой охлаждается свободно при -40 °С в течение 3 ч, затем производится стандартная сварка. В расчетах использовались следующие значения свойств

материала трубы и муфты: коэффициенты теплопроводности твердой (индекс -) и жидкой (индекс +) фазы  $\lambda^- = 0,46$ ;  $\lambda^+ = 0,24$  Вт/(м·К); плотности  $\rho^- = 950$ ;  $\rho^+ = 800$  кг/м<sup>3</sup>; удельные теплоемкости  $c^- = 1900,0$ ;  $c^+ = 2400,0$  Дж/(кг·К); температурные коэффициенты линейного расширения  $\beta^- = 0,9 \cdot 10^{-5}$ ,  $\beta^+ = 2,8 \cdot 10^{-5} = 2,8 \cdot 10^{-5}$  1/К; модули упругости  $E^- = 250,0$ ;  $E^+ = 12,5$  МПа; коэффициенты Пуассона  $\nu^- = 0,35$ ;  $\nu^+ = 0,49$ . Расчеты проводили при следующих геометрических размерах трубы и муфты:  $r_1 = 0,0257$ ;  $r_2 = 0,0315$ ;  $r_3 = 0,0397$  м. Спираль в муфте выполнена из меди: теплопроводность  $\lambda_{Cu} = 401,0$  Вт/(м·К); плотность  $\rho_{Cu} = 8933,0$  кг/м<sup>3</sup>; теплоемкость  $c_{Cu} = 381,0$  Дж/(кг·К);  $\beta = 1,7 \times 10^{-5}$  1/К;  $E = 100$  ГПа;  $\nu = 0,34$ . Подаваемое напряжение при сварке 32 В. Количество витков спирали в муфте — 32; диаметр проволоки спирали — 0,5 мм.

Распределение температуры при электромуфтовой сварке в условиях допустимой (20 °С) и ниже допустимой (-40 °С) температуры окружающего воздуха в различные моменты времени представлены на рис. 2. В момент времени (68 с) согласно регламентированному режиму при допустимой температуре ОВ завершается стадия нагрева (оплавления). Если время нагрева остается неизменным при температуре ОВ ниже допустимого размер оплавленной зоны, ограниченной изотермой 130 °С, значительно уменьшается (рис. 2, а). В окрестности первого и последнего витков материалы оплавляются частично. В момент завершения кристаллизации материала сварного шва при допустимой температуре ОВ (430 с) при сварке в условиях низкой температуры скорость охлаждения заметно выше, чем при сварке в условиях допустимых температур (рис. 2, б). При таком охлаждении может сформироваться мелкокристаллическая структура, обуславливающая пластичность материала.

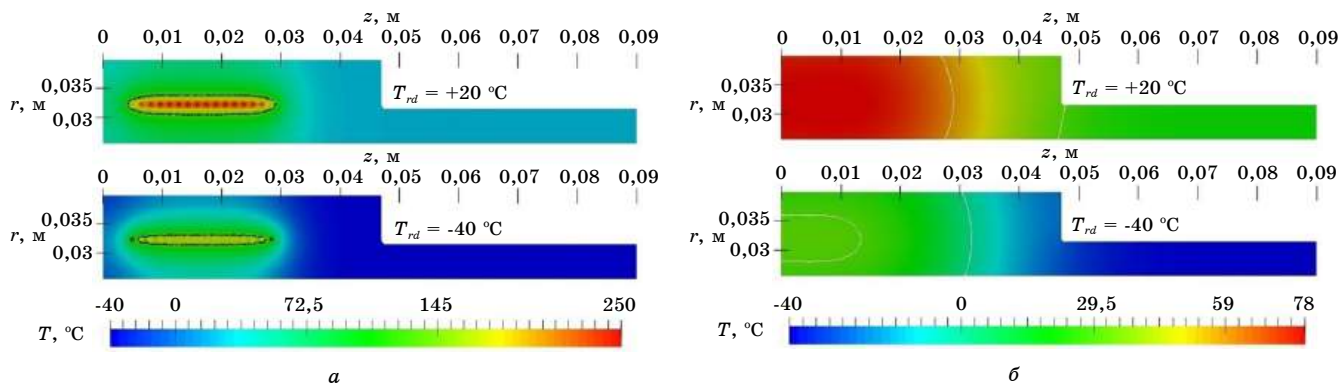


Рис. 2. Распределение температуры при электромуфтовой сварке при различных температурах окружающего воздуха:

а — в момент времени 68 с; б — в момент времени 430 с

На рис. 3 представлены поля напряжений и перемещений при допустимой (20 °С) и ниже нормативной (–40 °С) температуре окружающего воздуха при  $t = 68$  с с момента начала процесса сварки.

На рис. 4 представлены поля напряжений при допустимой (20 °С) и ниже нормативной (–40 °С) температуре окружающего воздуха в момент завершения нагрева ( $t = 68$  с) и в момент завершения кристаллизации ( $t = 430$  с).

Расчеты показывают, что сжимающие радиальные напряжения, характеризующие давление между муфтой и трубой, при сварке в условиях допустимой температуры окружающего воздуха (20 °С) достигают 2,68 МПа, при темпе-

ратуре –40 °С — не превышают 2,33 МПа, что может оказаться недостаточным для получения качественного соединения. Низкое значение давления при низкой температуре воздуха обусловлено высокими растягивающими радиальными напряжениями в периферийных участках соединения, что, в свою очередь, объясняет большее "разбухание" при низкой температуре внутренней поверхности трубы, по сравнению с "разбуханием" при сварке в условиях допустимых температур. В то же время, температура на внутренней поверхности трубы выше равновесной температуры, температура на внешней поверхности муфты — ниже.

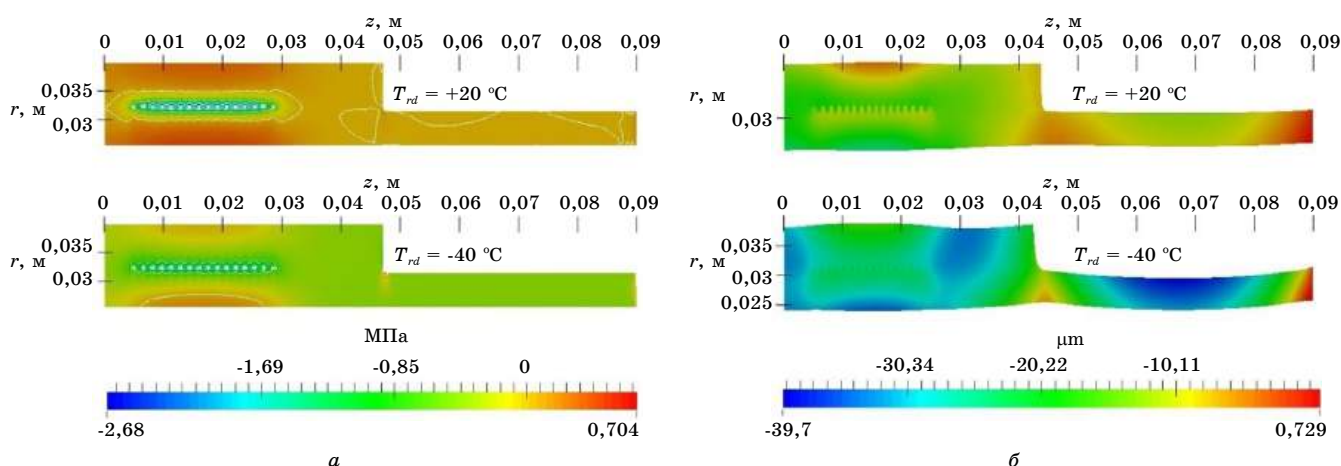


Рис. 3. Распределение радиальных напряжений (а) и перемещений (б) при  $T_{rd} = 20$  и  $T_{rd} = -40$  °С в конце стадии нагрева  $t = 68$  с

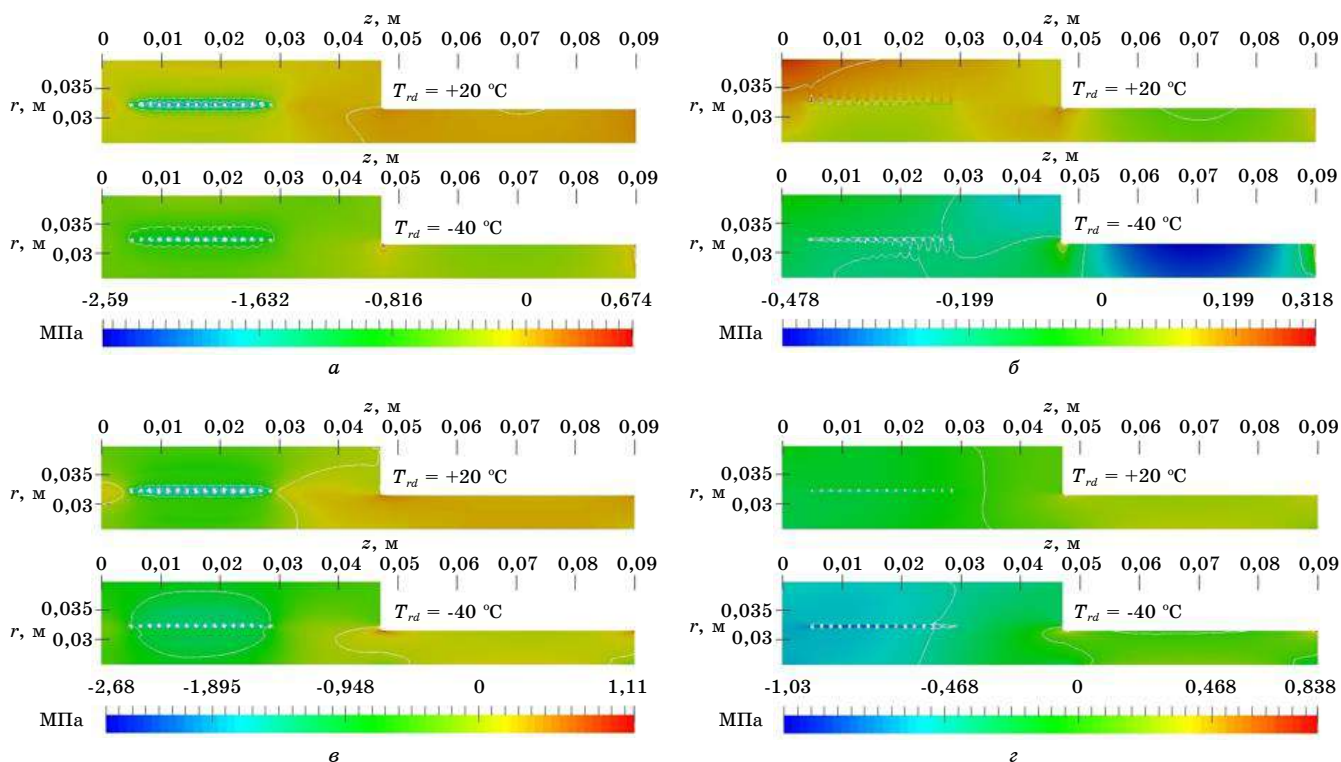


Рис. 4. Распределение окружных напряжений при различных температурах окружающего воздуха (а — в момент времени 68 с; б — в момент времени 430 с) и осевых напряжений при различных температурах окружающего воздуха (в — в момент времени 68 с; г — в момент времени 430 с)

Окружные и осевые напряжения при сварке в условиях низких температур также ниже, чем при сварке в условиях допустимых температур ОВ. Окружные сжимающие напряжения при стандартной сварке достигают значения 2,59 МПа, в то время как в условиях низких температур — 2,21 МПа. Осевые напряжения достигают значений 2,68 и 2,2 МПа соответственно.

На рис. 5 представлены поля радиальных напряжений и перемещений при допустимой (20 °С) и ниже нормативной (–40 °С) температуре окружающего воздуха в момент завершения кристаллизации материала в зоне термического влияния (в момент достижения 80 °С).

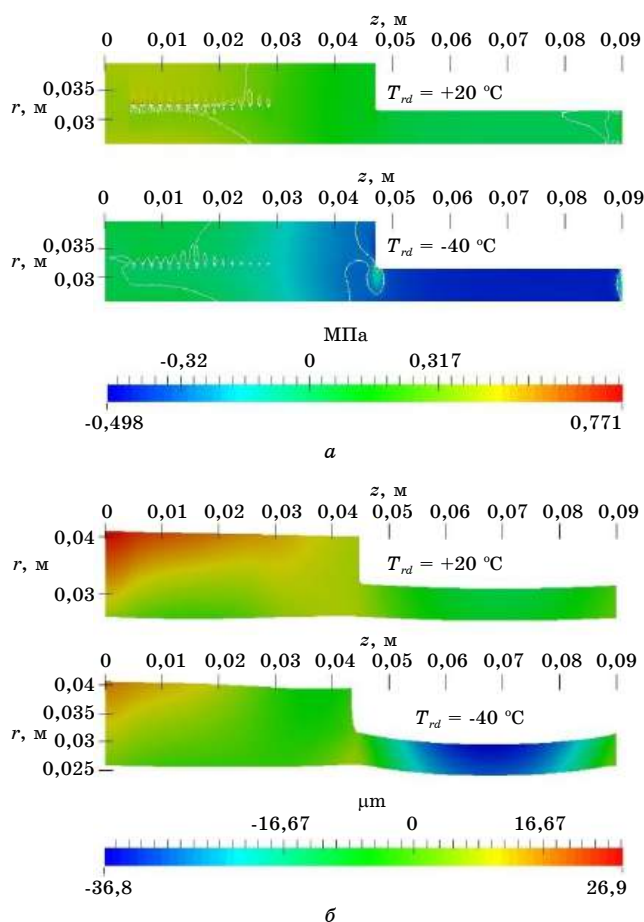


Рис. 5. Распределение радиальных напряжений (а) и деформаций (б) при  $T_{rd} = 20$  и  $T_{rd} = -40$  °С на момент завершения кристаллизации материала в зоне термического влияния

Из рис. 5 видно, что в момент завершения кристаллизации радиальные сжимающие напряжения на периферийных участках выше при сварке в условиях низких температур, что приводит к большим деформациям. Кроме того максимальные значения напряжений при сварке при низких температурах выше. Таким образом, электрофузионная сварка полиэтиленовых труб при низких температурах по существующей технологии может привести к большим значениям остаточных напряжений.

### Заключение

Расчеты термоупругого состояния сварного соединения полиэтиленовых труб с помощью муфт с закладным нагревателем показывают, что сварка в условиях низких температур по регламентированному режиму может привести к нежелательным эффектам: низкому значению давления между трубой и муфтой и большим значениям остаточных напряжений.

Работа выполнена в рамках  
государственного задания Минобрнауки России  
№ 122011100162-9

### Литература

1. Старостин Н. П., Аммосова О. А. Конечно-элементное моделирование теплового процесса и расчет параметров электрофузионной сварки полиэтиленовых труб при низких температурах // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2018. № 2. С. 69—75.
2. Старостин Н. П., Васильева М. А., Андреев Б. И. Определение технологических параметров приварки седлового отвода к полиэтиленовой трубе на основе анализа температурного поля // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2017. № 2(166). С. 78—83.
3. Авдонин Н. А. Математическое описание процессов кристаллизации. — Рига: Зинатне, 1980. — 180 с.
4. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z. The Finite Element Method: its Basis and Fundamentals (Seventh Edition). — Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. — 714 p.

---

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF LOW AMBIENT TEMPERATURES ON THE THERMOELASTIC STATE OF ELECTROFUSION WELDED JOINT OF POLYETHYLENE PIPES

R. S. Tikhonov, N. P. Starostin, O. A. Ammosova

Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the RAS —  
Division of Federal Research Centre "The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch  
of the Russian Academy of Sciences", Yakutsk, Russia

*Calculating results of the dynamics of the temperature field and the stress-strain state of an electrofusion welded joint of polyethylene pipes at various ambient temperatures are presented in this article. The size of the molten zone, when welding happens according to a regulated regime at low temperatures, is significantly smaller than at an allowable temperature. Calculations show that welding at low temperatures can lead to such undesirable effects as low pressure between the pipe and the sleeve and high values of residual stresses.*

*Keywords:* mathematical modeling, thermal process, thermoelastic state, welding, polyethylene pipe, sleeve, phase transformation, finite element method, low temperatures.

---

**Тихонов Роман Семенович**, старший научный сотрудник.

E-mail: roman\_tikhon@mail.ru

**Старостин Николай Павлович**, главный научный сотрудник.

E-mail: nikstar56@mail.ru

**Аммосова Ольга Александровна**, старший научный сотрудник.

E-mail: ammosova\_o@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 5 мая 2022 г.*



УДК 621.9.015

DOI: 10.52190/2073-2597\_2022\_3\_48

EDN: QFTYVF

## ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ ПО АВТОМАТИЗИРОВАННОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИЙ И УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ

И. Е. Колошкина

Федеральный центр компетенций в сфере производительности труда, Москва, Россия

*В статье изложены сведения о содержании подготовки специалистов по автоматизированному проектированию технологий и управляющих программ для станков с ЧПУ в интегрированной конструкторско-технологической системе CAD/CAM/CAPP. Рассмотрена структурная схема поэтапной подготовки, описано содержание каждого этапа и сведения о методическом обеспечении. Приведены алгоритмы последовательности действий при автоматизированном проектировании технологической документации и управляющих программ для станков с ЧПУ.*

**Ключевые слова:** технология обработки на станках с ЧПУ, автоматизированная подготовки технологической документации, программирование для станков с ЧПУ в САМ-системе.

Требования к компетентности специалиста технологического профиля в сфере информационных технологий, в соответствии с запросами производства, отражены в профессиональном стандарте 40.089 Специалист по автоматизированной разработке технологий и программ для станков с числовым программным управлением. Одно из требований этого профессионального стандарта "...обеспечение качества и производительности изготовления машиностроительных деталей на станках с ЧПУ при помощи систем автоматизированного проектирования...". Актуальность подготовки специалистов этого уровня отражена в Федеральном проекте "Передовые инженерные школы". Информация о специфике

подготовки специалистов этого профиля представлена в работе [1].

Для реализации указанных положений разработана структурная схема поэтапной подготовки специалистов по автоматизированной подготовке технологий и управляющих программ для станков с ЧПУ в системе CAD/CAM/CAPP (рис. 1). Эти решения реализуются в учебных заведениях профессионального образования и при подготовке специалистов на предприятиях. Наличие рекомендуемых учебных пособий позволяет использовать разработки при самостоятельной подготовке специалистов, имеющих базовые знания по технологии машиностроения.

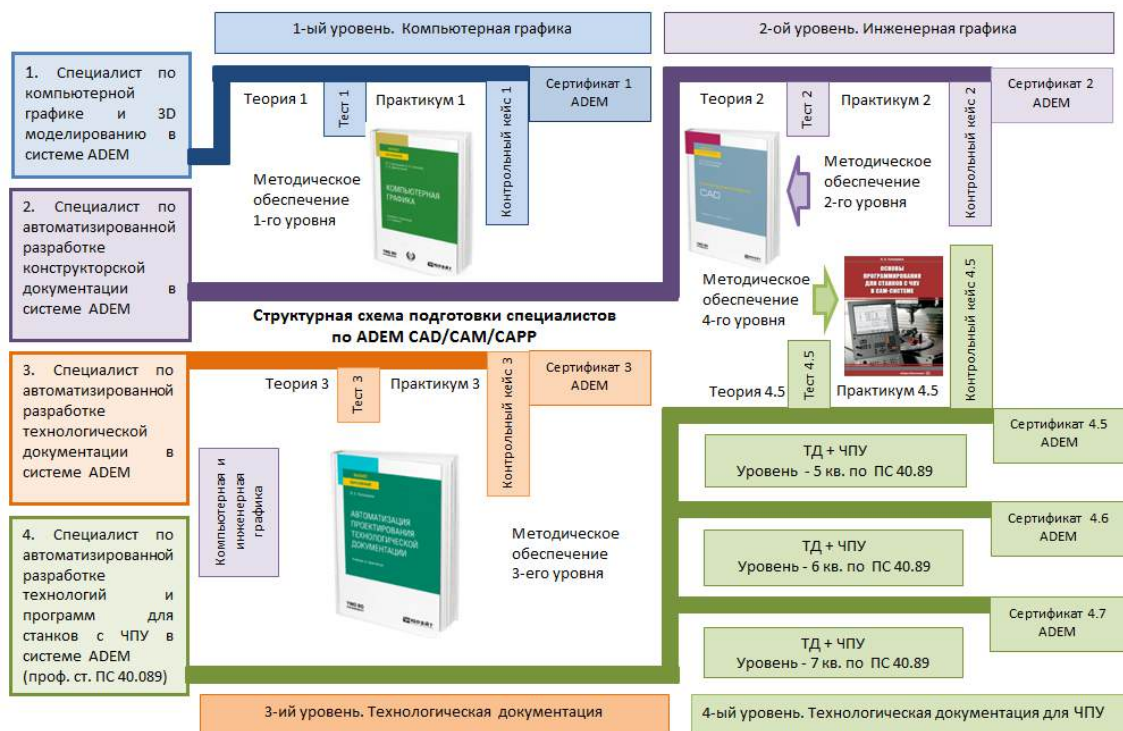


Рис. 1. Структурная схема подготовки специалистов по автоматизированной подготовке технологий и управляющих программ для станков с ЧПУ в системе ADEM CAD/CAM/CAPP



Разработка реализована в отечественном программном обеспечении ADEM (Automated Design Engineering Manufacturing). Российская интегрированная ADEM CAD/CAM/CAPP — система, предназначенная для автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства (КТПП). ADEM представляет единый продукт, включающий в себя инструментарий для проектантов и конструкторов (CAD), технологов и нормировщиков (CAPP) и программистов ЧПУ (CAM). Оно содержит несколько различных предметно-ориентированных САПР под единой логикой управления и на единой информационной базе. Аналог функциональности подобного продукта можно составить только из нескольких профессиональных систем, но при этом вряд ли можно добиться той синхронизации и глубокого взаимодействия, которую обеспечивает глубоко интегрированная CAD/CAM/CAPP система ADEM. Важно, что для организации учебного процесса имеется лицензионная версия программы для учебных заведений и свободно распространяемая учебная версия этой системы ADEM с некоторыми ограничениями, которую можно скачать на сайте компании-разработчика.

**Первый уровень — Компьютерная графика. Специализация "Специалист по компьютерной графике и 3D-моделированию в системе ADEM"**

*Содержание теоретического материала первого уровня:* изображение 2D-геометрических примитивов, управление 2D-изображениями, редактирование 2D-изображений, объемное 3D-моделирование, управление 3D-изображениями, редактирование 3D-изображений, получение аксонометрического изображения с 3D-модели, оформление технического рисунка.

*Содержание практикума первого уровня:* разработка геометрических примитивов, разработка 2D-изображений, разработка поверхностных и твердотельных объемных моделей вращением профиля вокруг оси, разработка объемных моделей смещением профиля, получение аксонометрического изображения с 3D-модели, разработка технического рисунка детали тела вращения и корпусной детали.

*Методическое обеспечение первого уровня* описано в работе [2].

**Второй уровень — Инженерная графика. Специализация "Специалист по автоматизированной разработке конструкторской документации в системе ADEM"**

*Содержание теоретического материала второго уровня:* виды и комплектность конструкторских документов, автоматизация разработки конструкторской документации, компьютерный инжиниринг, разрезы и сечения в изображениях, оформление чертежа — технические требования, размеры, шероховатость поверхности, штриховка, разработка сборочных чертежей, оформление спецификации.

Разработка чертежных видов при автоматизированном проектировании конструкторской

документации, как правило, выполняется с помощью геометрических примитивов системы. В современных интегрированных конструкторско-технологических системах есть более производительный приём — проектирование по принципу "компьютерного инжиниринга", когда первоначальным источником информации для дальнейшей разработки является либо уже созданная, либо создаваемая разработчиком объемная модель изделия. Последовательность реализации этого приёма в модуле CAD системы ADEM отражена в алгоритме на рис. 2. Ключевым моментом реализации этого принципа является содержание действий в блоке 6 — автоматическое получение чертежных видов по 3D-модели изделия.

*Содержание практикума второго уровня:* разработка конструкторской документации на деталь тела вращения и корпусную деталь, разработка сборочного чертежа и спецификации, детализации деталей входящих в сборочную единицу.

*Методическое обеспечение второго уровня* описано в [3].

**Третий уровень — Технологическая документация. Специализация "Специалист по автоматизированной разработке технологической документации в системе ADEM"**

Важнейшим показателем компетентности специалиста технологического профиля являются умения по разработке технологической документации. Это объясняется тем, что первичным источником для любого планирования подготовки производства является технологический процесс изготовления изделия в формате комплекта технологической документации, в котором должна быть отражена необходимая информация о материальных и временных ресурсах изготовления будущей продукции. Наличие необходимой информации, которую должен отразить в комплекте технологической документации технолог, позволяет обрисовать истинную картину процессов изготовления изделия и дает возможность разрабатывать объективную стратегию планирования подготовки производства и изготовления изделия для всех структурных подразделений предприятия. Наиболее эффективно автоматизация технологической подготовки производства реализуется с помощью интегрированных конструкторско-технологических программных систем. Ещё одним преимуществом применения программных продуктов автоматизированного технологического проектирования является то, что подготовленный специалист может выполнять с помощью системы, кроме разработки технологической документации, подготовку управляющих программ для станков с ЧПУ, определять временные показатели процесса, совмещая в одном лице обязанности технолога, программиста для станков с ЧПУ и нормировщика. Сведения о подготовке специалистов технологического профиля представлены в работе [4].

Алгоритм разработки конструкторской документации методом  
«компьютерного инжиниринга»

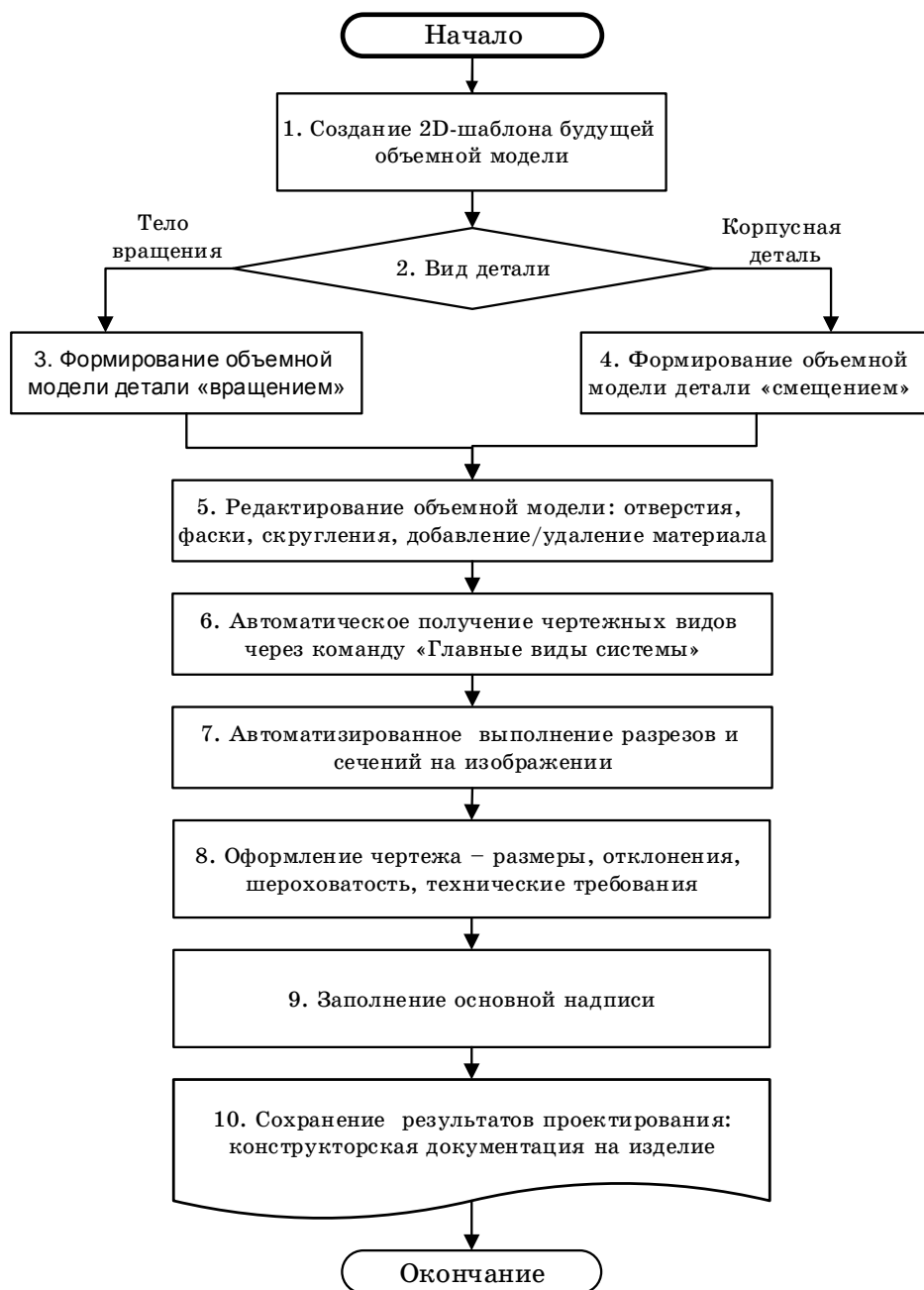


Рис. 2. Алгоритм разработки конструкторской документации методом «компьютерного инжиниринга»

Содержание теоретического материала третьего уровня: виды и комплектность технологических документов, автоматизация разработки технологической документации, базы данных и сервисы системы, автоматизированная разработка технологической документации для маршрутных, операционных и маршрутно-операционных процессов механической обработки.

Для повышения эффективности процесса освоения программы разработаны алгоритмы

для получения каждого вида технологической документации — маршрутный техпроцесс, операционный техпроцесс для универсального оборудования, операционный техпроцесс для механической обработки на станке с ЧПУ.

Блок-схема алгоритма автоматизированной разработки маршрутного технологического процесса механической обработки на универсальном оборудовании в системе CAD/CAM/CAPP представлена на рис. 3.

Блок-схема алгоритма разработки маршрутного технологического процесса

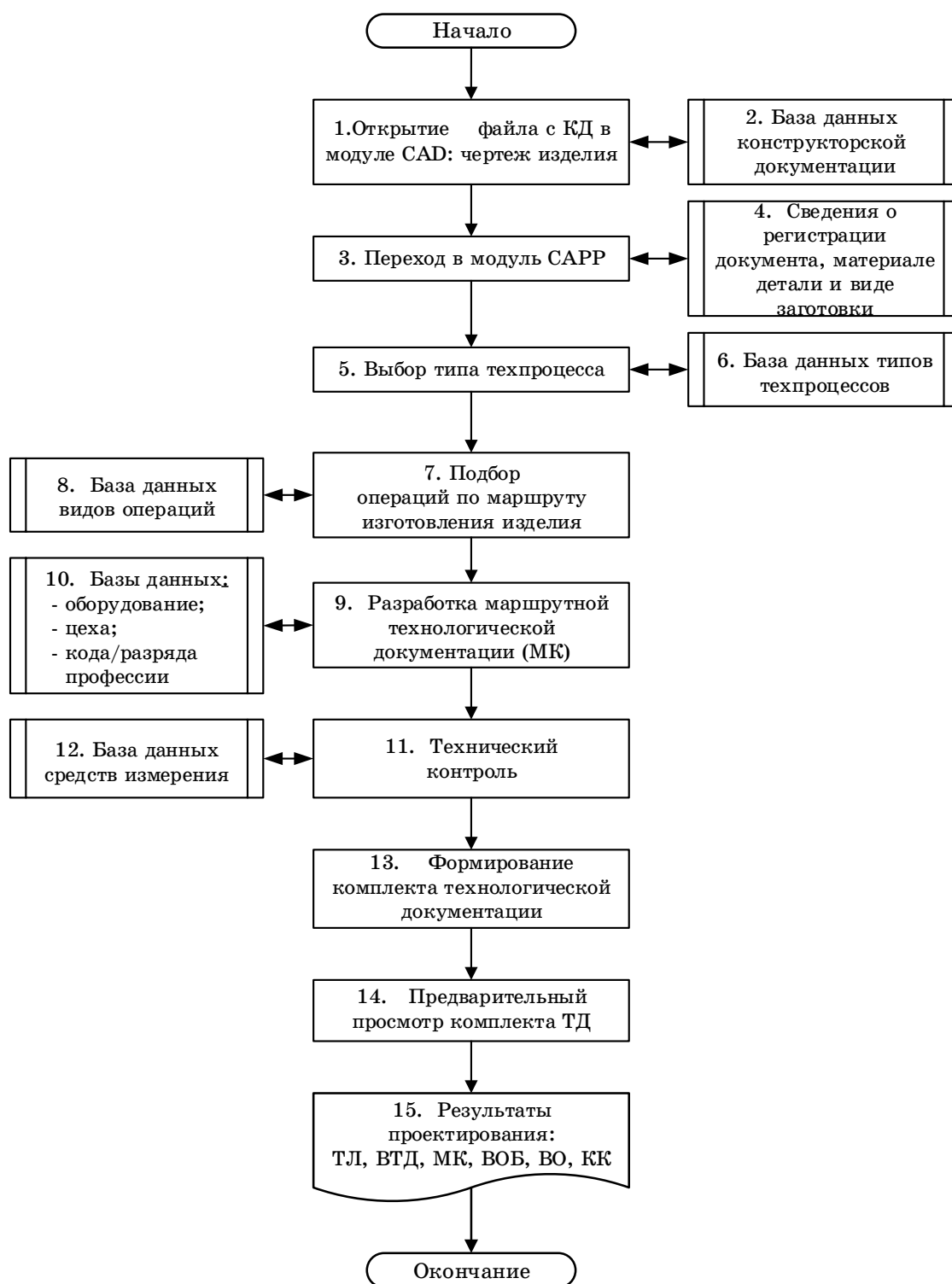


Рис. 3. Блок-схема алгоритма автоматизированной разработки маршрутного технологического процесса механической обработки в системе CAD/CAM/CAPP

Блок-схема алгоритма автоматизированной разработки операционного технологического процесса механической обработки на универсальном оборудовании в системе CAD/CAM/CAPP пред-

ставлена на рис. 4.

Блок-схема разработки технологической документации для выполнения обработки на оборудовании с ЧПУ показана на рис. 5.

Блок-схема алгоритма разработки операционного технологического процесса

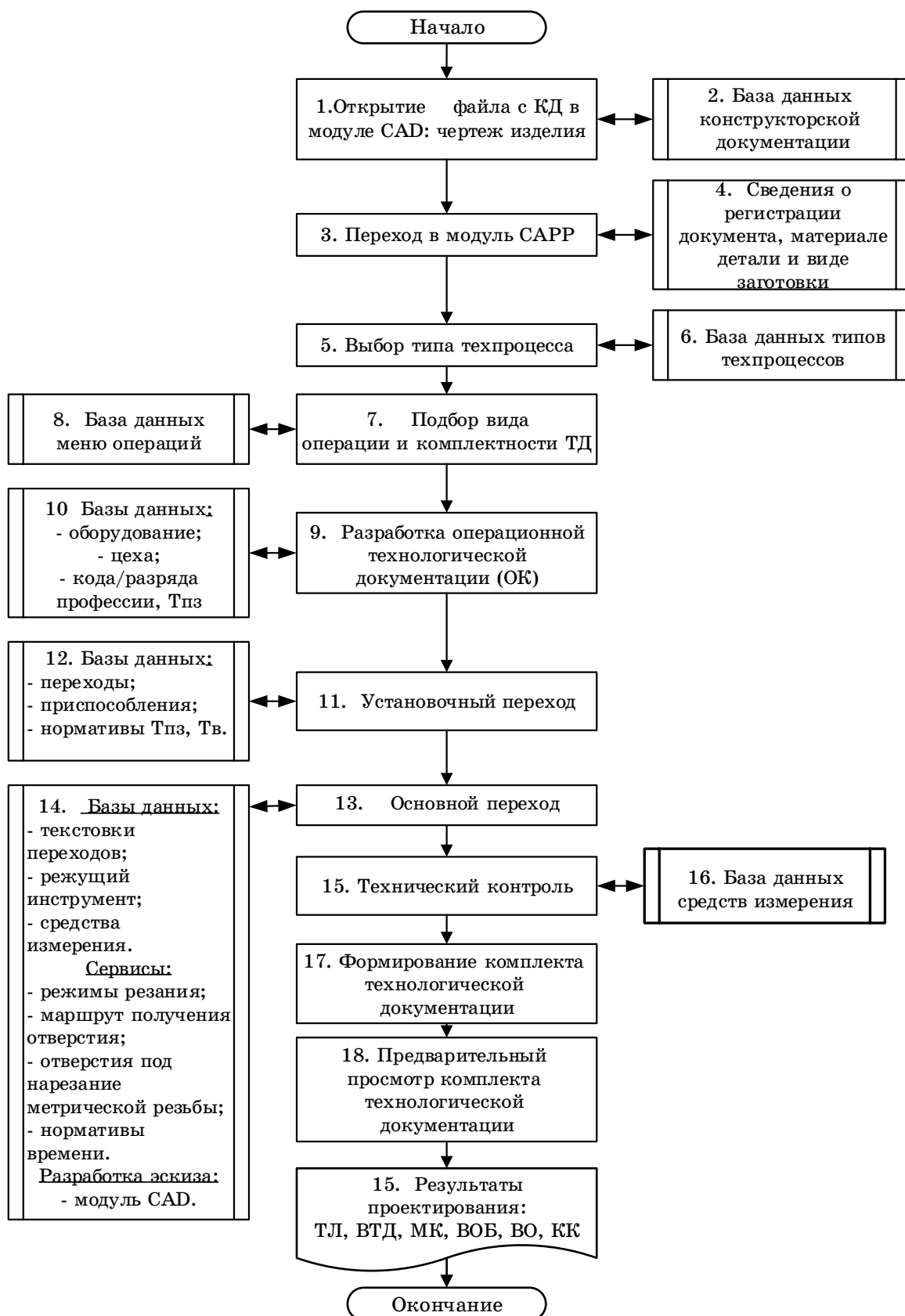


Рис. 4. Блок-схема алгоритма автоматизированной разработки операционного технологического процесса механической обработки в системе CAD/CAM/CAE

Блок-схема алгоритма разработки технологического процесса для станков с ЧПУ

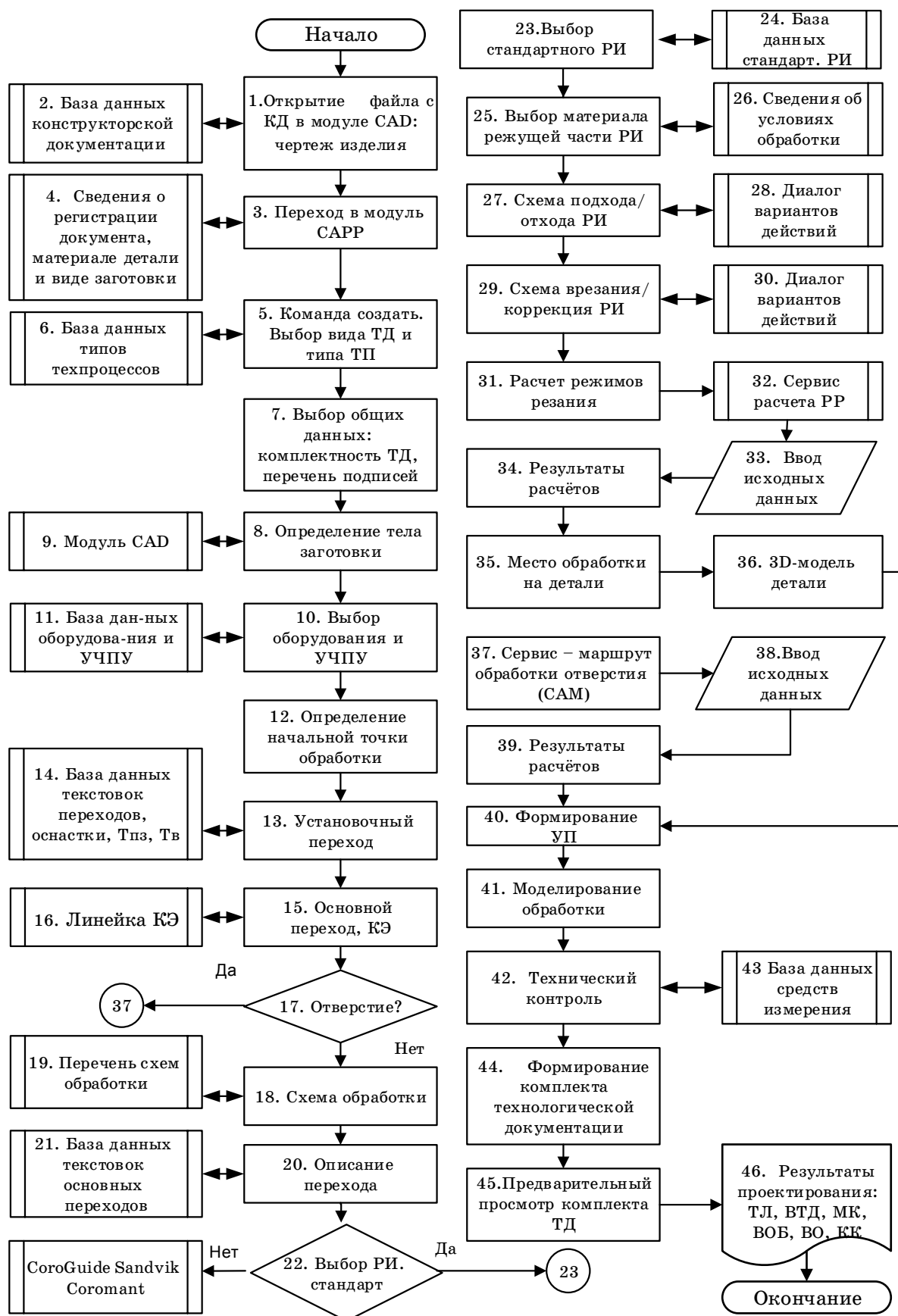


Рис. 5. Блок-схема разработки технологической документации и управляющей программы для выполнения обработки на оборудовании с ЧПУ



Система, подготовленная на основании выполненной разработки карты технологического процесса (КТП), автоматически готовит комплект технологической документации включающий — титульный лист (ТЛ), ведомость технологической документации (ВТД), операционную карту (ОК), ведомость оборудования (ВОБ), ведомость оснастки (ВО), комплекточную карту (КК), карту эскизов (КЭ), текст управляющей программы (УП), лист изменений (ЛИ).

*Содержание практикума третьего уровня:* разработка технологической документации для маршрутного и операционного техпроцессов обработки детали тела вращения и корпусной детали на универсальном и автоматизированном оборудовании. Информация об организации обучения по третьему разделу представлена в работах [5, 6].

*Методическое обеспечение третьего уровня описано в [7].*

**Четвертый уровень — Технологическая документация для станков с ЧПУ. Специализация "Специалист по автоматизированной разработке технологий и управляющих программ для станков с ЧПУ в системе ADEM (в соответствии с профессиональным стандартом ПС 40.089)"**

**Подготовка по 5-у уровню квалификации в соответствии с профессиональным стандартом ПС 40.089**

*Содержание теоретического материала четвертого уровня 4.5:* порядок автоматизированной разработки технологий и управляющих программ для двухкоординатной и двух с половиной координатной обработки (далее — простых операций) заготовок на станках с ЧПУ, структура управляющей программы для станков с ЧПУ, основы программирования в САМ-системе, виды конструктивных элементов, разработка управляющих программ для станков с ЧПУ для отдельного конструктивного элемента.

В модуле САМ-системы ADEM реализуются два способа программирования — последовательная разработка управляющей программы по каждому конструктивному элементу изделия и автоматическая комплексная разработка управляющей программы в модуле САМ-Expert. Первый способ применяется при обработке единичного конструктивного элемента или при небольшом количестве, одновременно обрабатываемых элементов, второй способ реализуется при значительном числе одновременно обрабатываемых конструктивных элементов на детали.

Последовательность действий по разработке управляющей программы по отдельному конструктивному элементу, для обработки изделия на станке с ЧПУ, отражена в алгоритме (рис. 6). Исходными данными для проектирования является разработанная конструкторская документация на изделие, подвергаемое обработке.

ADEM CAM Expert — модуль автоматического проектирования операций обработки, выпол-

няемых на оборудовании с ЧПУ. Функционал модуля ADEM CAM Expert позволяет распознать обрабатываемые элементы 3D-модели детали и предлагает технологу-программисту маршрут обработки этой детали на станке.

Как правило, под эту технологию подходят конструкции, описываемые стандартными технологическими элементами: "Уступ", "Паз", "Стенка", "Колодец", "Окно", "Отверстие", "Поверхность". Модуль САМ Expert для каждого обрабатываемого элемента детали в автоматическом режиме рассчитывает наиболее оптимальную траекторию обработки, осуществляет подбор режущего инструмента в зависимости от геометрии обрабатываемых поверхностей, а также рассчитывает режимы резания для выбранного инструмента. Основные этапы работы модуля ADEM CAM Expert показаны на блок-схеме алгоритма на рис. 7.

*Содержание практикума четвертого уровня 4.5:* разработка технологии и управляющей программы для сверления отверстий, обработки наружного и внутреннего контуров, обработки детали с различными конструктивными элементами на станке с ЧПУ.

*Методическое обеспечение четвертого уровня 4.5 описано в работе [8].*

Подготовка по этому уровню соответствует требованиям профессионального стандарта "ПС 40.089 Специалист по автоматизированной разработке технологий и программ для станков с ЧПУ" по трудовой функции "Автоматизированная разработка управляющих программ для простых операций обработки заготовок на станках с ЧПУ" 5-у уровню квалификации и требованиям ФГОС.

**Подготовка по 6-у уровню квалификации в соответствии с профессиональным стандартом ПС 40.089**

*Содержание теоретического материала четвертого уровня 4.6:* порядок автоматизированной разработки технологий и программ для трех, четырех и пятикоординатной обработки заготовок на станках с ЧПУ, разработка управляющих программ для станков с ЧПУ в модуле САМ Expert.

*Содержание практикума уровня четвертого 4.6:* разработка технологии и управляющей программы для трех, четырех и пятикоординатной обработки заготовок на станках с ЧПУ.

**Подготовка по 7-му уровню квалификации в соответствии с профессиональным стандартом ПС 40.089**

*Содержание теоретического материала четвертого уровня 4.7:* порядок автоматизированной разработки технологий и программ для многокоординатной (более пяти координат) обработки заготовок на станках с ЧПУ.

*Содержание практикума уровня четвертого 4.7:* разработка технологий и программ для многокоординатной (6—8 координат) обработки заготовок на станках с ЧПУ.

Алгоритм разработки управляющей программы для станков с ЧПУ поэлементно в САМ-системе

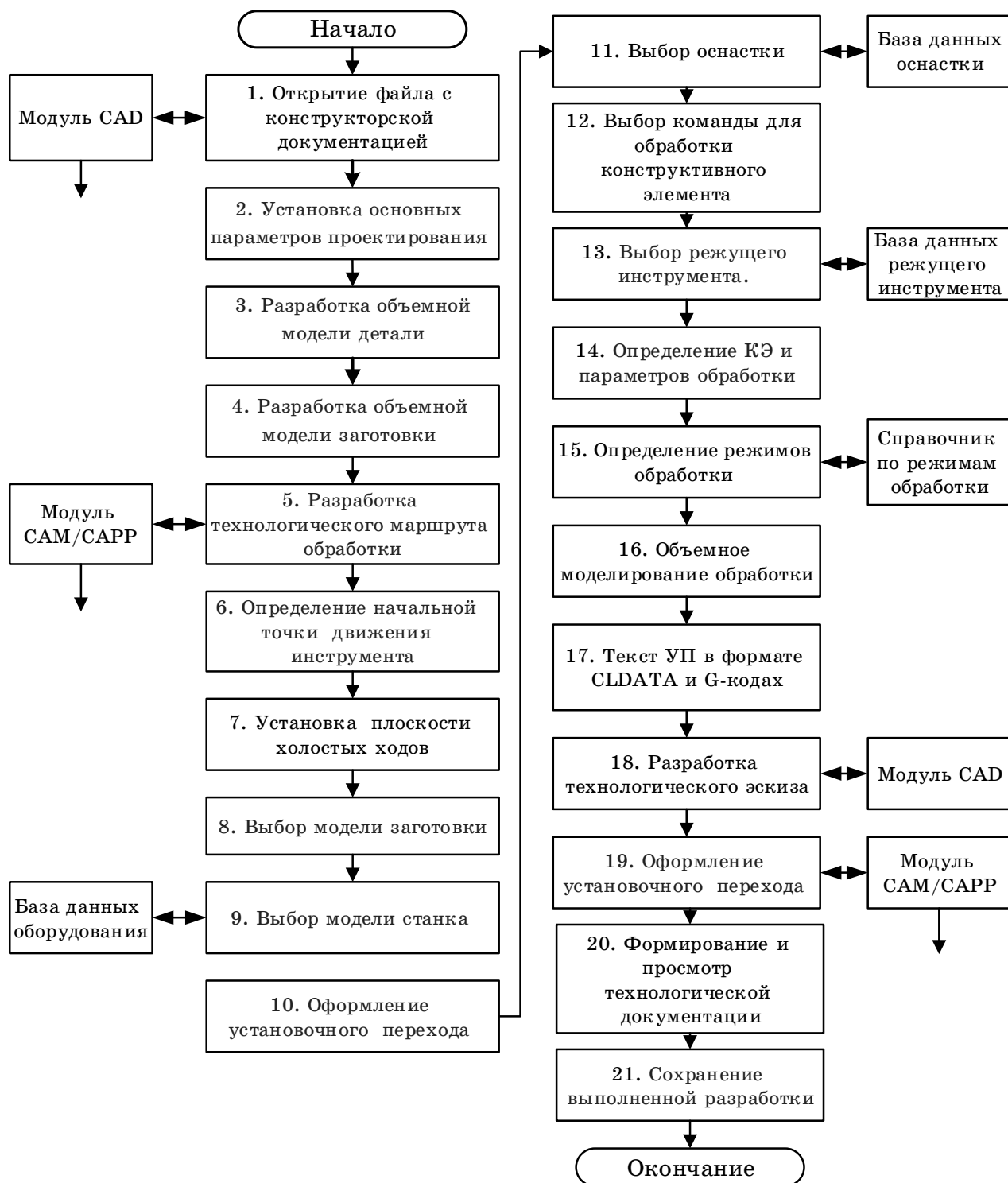


Рис. 6. Алгоритм разработки управляющей программы для станков с ЧПУ для отдельного конструктивного элемента

Программа подготовки специалистов по 1—4.5 уровням соответствует требованиям ФГОС профессионального образования по технологическим специальностям и может быть реализована в системе среднего и высшего профессионального образования. Подготовка

специалистов по 4.6 и 4.7 уровням выполняется для инженерно-технического персонала, имеющего опыт работы с программными продуктами и прошедшего предварительную подготовку по пользованию системой ADEM.

Блок-схема алгоритма разработки управляющей программы для станка с ЧПУ в модуле ADEM CAM Expert



Рис. 7. Алгоритм разработки управляющей программы для станка с ЧПУ в модуле ADEM CAM Expert

**Литература**

1. Аверченков А. В., Колошкина И. Е., Шептунов С. А. Формирование компетенций специалистов в наукоемких технологиях подготовки производства // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2019. № 6(96). С. 22—29.
2. Колошкина И. Е., Селезнев В. А., Дмитроченко С. А. Компьютерная графика: учебник и практикум для вузов. Изд. 3-е, испр. и доп. — М.: Юрайт, 2020. — 233 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://urait.ru/bcode/447417>.
3. Колошкина И. Е., Селезнев В. А. Инженерная графика. CAD: учебник и практикум для академического бакалавриата. — М.: Юрайт, 2019. — 220 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://urait.ru/bcode/429985>.
4. Колошкина И. Е. Подготовка специалистов по САПР технологического профиля применяемых в современной промышленности: сб. науч. тр. IV Междунар. науч.-практ. конф. "САПР и моделирование в современной электронике", 22—23 октября 2020 г. — Брянск: БГТУ, 2020. С. 28—32.
5. Колошкина И. Е. Автоматизация разработки технологической документации // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2019. № 1(173). С. 56—62.
6. Колошкина И. Е. Методика автоматизированной разработки технологической документации в системе CAD/CAM/CAPP // Автоматизация в промышленности. 2019. № 9. С. 32—34.
7. Колошкина И. Е. Автоматизация проектирования технологической документации: учебник и практикум для вузов. — М.: Юрайт, 2020. — 371 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://urait.ru/bcode/467467>.
8. Колошкина И. Е. Основы программирования для станков с ЧПУ в САМ-системе: учебник. — М.: — Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. — 260 с.

## TRAINING OF SPECIALISTS IN AUTOMATED TECHNOLOGY DESIGN AND MANAGEMENT PROGRAMS FOR CNC MACHINES

I. E. Koloshkina

Federal Competence Center in the Field of labor Productivity, Moscow, Russia

*The article provides information about the content of training specialists in automated design of technologies and control programs for CNC machines in the integrated design and technological system CAD/CAM/CAPP. The structural scheme of step-by-step preparation is considered, the content of each stage and information about methodological support are described. The algorithms of the sequence of actions in the automated design of technological documentation and control programs for CNC machines are given.*

**Keywords:** processing technology on CNC machines, automated preparation of technological documentation, programming for CNC machines in a CAM system.

---

Колошкина Инна Евгеньевна, старший руководитель проектов.  
E-mail: [inna.koloshkina@yandex.ru](mailto:inna.koloshkina@yandex.ru)

*Статья поступила в редакцию 21 июня 2022 г.*

# Правила для авторов по оформлению рукописей статей, предлагаемых к публикации в журналах

Направляя рукопись статьи в редакцию журнала, авторы передают редколлегии и издателю журнала безвозмездное неисключительное право опубликовать ее на русском языке в качестве статьи в печатной и электронной версиях журнала в сети Интернет. При этом за авторами сохраняются их интеллектуальные права на рукопись статьи (в том числе "авторское право"). В связи с этим и с учетом Четвертой части (Раздел VII) Гражданского кодекса РФ авторами должно быть представлено в редакцию письмо в следующей форме:

## Лицензионный договор о передаче права на публикацию (издательский лицензионный договор)

Мы, нижеподписавшиеся, авторы рукописи .....,  
предоставляем редколлегии журнала и издателю ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»  
.....  
(название журнала)

безвозмездную простую (неисключительную) лицензию на публикацию рукописи статьи как в печатной, так и в электронной версиях журнала.

Мы подтверждаем, что данная публикация не нарушает интеллектуальных прав других лиц или организаций.

Подписи авторов: ..... (ф.и.о., ученая степень, дата)

Статья должна быть подписана всеми авторами. В случае нескольких авторов указывается фамилия автора, ответственного за переписку с редакцией. Рукопись статьи направляется на адрес редакции журнала: 125424, Москва, Волоколамское ш., д. 77, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас», Редакция журнала. Дополнительная информация может быть получена в редакции при обращении по телефону: 8 (495) 491-43-17 или по E-mail: izdanie@ntckompas.ru.

Каждая статья рецензируется в соответствии с решением редколлегии журнала. Рецензенты выбирают из числа ученых и специалистов, компетентных в вопросах, рассматриваемых в статье, и имеющих собственные публикации в данном направлении. Решение о порядке публикации статьи принимается редколлгией с учетом мнения рецензентов. В случае разногласий среди членов редколлегии окончательное решение принимает главный редактор. При полном отклонении рукописи статьи от публикации редакция журнала направляет авторам мотивированный отказ. По этому факту редакция не вступает в полемику с авторами.

### Комплектование статьи (обзора)

Статья должна быть представлена в редакцию в следующем комплекте:

- сопроводительное письмо, подписанное руководством организации;
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати и распространения в Российской Федерации и других государствах. При отсутствии в организации экспертной комиссии вме-

сто экспертного заключения может быть представлено соответствующее заявление на имя главного редактора журнала от имени руководства организации, где работают авторы. В экспертном заключении или заявлении в обязательном порядке должна быть отражена возможность открытой публикации и передачи публикуемых материалов за границу.

- лицензионный договор по приведенному образцу;

- рукопись статьи — объем статьи (без рисунков) не должен превышать 10 страниц формата А4 при 1,5 межстрочных интервалах, а объем статьи обзорного характера — 20 страниц. Рекомендуемая гарнитура — New Times Roman. Размер шрифта — 12;

- Материал статьи представляется в редакцию в печатном виде (на бумажном носителе) и в электронном варианте с текстом в формате Word на электронную почту.

### Оформление статьи:

- статья начинается с указания УДК;
- название статьи набирается строчными буквами (кроме начальной прописной) полужирным шрифтом, размер шрифта 14, для остального текста используется простой шрифт размером 12, причем рекомендуемая гарнитура шрифта — Times New Roman;
- после названия — список авторов, инициалы авторов предшествуют их фамилиям;



- далее представляется аннотация статьи (10—15 строк с раскрытием цели работы и её основных результатов);

- далее приводится список ключевых слов для данной статьи (не более десяти);

- страницы текста нумеруются без пропусков и добавлений литерных обозначений (типа 1а, 2б и т. п.), причем в сквозную нумерацию должны быть включены все элементы статьи;

- внизу первой страницы текста помещается отдельный абзац (с полужирным шрифтом), содержащий контактную информацию об авторе (или авторах) в следующем виде: фамилия, имя, отчество, должность, ученая степень, почтовый адрес предприятия, телефон, E-mail;

- основной текст статьи должен начинаться с четкой постановкой цели и задач работы, сопровождаемой аргументами в пользу ее выполнения на фоне существующего состояния затронутой в статье проблемы. Дальнейший текст статьи также должен иметь смысловые рубрикаторы (разделы и подразделы) без их нумерации. Заканчиваться статья должна отдельным разделом «Заключение» с перечислением основных результатов, следующих из них выводов и, по возможности, предложений по развитию исследований и использованию их результатов.

- после основного текста — список использованных источников "Литература" (не менее 5 источников); Список использованной литературы должен соответствовать всем ссылкам на внешние источники в тексте статьи. Ссылки оформляются в квадратных скобках, например, [1—6], [7, 8]. Внутренние ссылки, т. е. ссылки на формулы, рисунки и таблицы статьи оформляются с использованием круглых скобок, например, формула (1), уравнение (4), (рис. 3), (табл. 2). Любые ссылки в подписях к рисункам и в самих рисунках не рекомендуются;

- далее размещается подробная англоязычная информация о статье: название статьи, фамилия и инициалы авторов (английская транслитерация), предприятие, аннотация, ключевые слова (Keywords).

### **Оформление рисунков:**

- рисунки и графики вставляются непосредственно в нужном месте в статье и в желаемом масштабе.

- рядом с осями графиков указываются отображаемые физические величины только в символьной (буквенной) форме, а через запятую — размерность величины по-русски (прямым шрифтом). Различные кривые на графиках рекомендуется нумеровать, даже если они характеризуются отдельным цветом или типом линии. Графики представляются только на

белом фоне. Вспомогательные сетки на площади графика не допускаются;

- подписи под соответствующими рисунками (полужирный курсивный) представляются в нужных местах текста. Каждая подпись должна быть по возможности лаконичной, но емкой по содержанию.

### **Оформление формул:**

- простые формулы вводить в текст в формате используемого текстового редактора, более сложные формулы — с использованием редактора формул MathType;

- стандартные математические обозначения (например,  $\max$ ,  $\log$ ,  $\sin$ ,  $\exp$  и т. д.) должны быть набраны прямо. То же относится к цифрам и числам;

- для символьного обозначения не векторных физических (технических) величин использовать только латинский и греческий алфавиты, при этом в тексте для греческих букв использовать прямой шрифт, для латинских букв — наклонный шрифт (курсив);

- векторы и матрицы обозначать полужирным прямым шрифтом;

- для нижних и верхних индексов применять арабские цифры, латинские или греческие буквы. Если индекс представляет собой сокращенную форму русского слова — характеристики, то допустимо использовать в его обозначении русские буквы (прямой шрифт), например  $U_{\text{вх}}$ ,  $I_{\text{вых}}$ ,  $v_{\text{гр}}$  и т. п.

- размерность физических величин обозначается всегда только по-русски прямым шрифтом.

### **Оформление таблиц:**

- содержание таблицы не должно дублировать данные, приводимые на графиках или в тексте;

- графы должны иметь название без сокращения отдельных слов.

Рисунки, формулы и таблицы должны иметь свою отдельную сквозную нумерацию. Если на конкретную формулу нет дополнительных (возвратных) ссылок в тексте или она в единственном числе, то нумерация ее не нужна. Единственные таблица и/или рисунок также не нумеруются.

При публикации в журнале каждая статья (в контактной информации) сопровождается сноской со знаком охраны авторского права ©, поставленным перед фамилией автора (фамилиями авторов) и годом издания.

Авторы (или автор) каждой статьи после выхода журнала в свет имеют право на получение от редакции электронной версии статьи в PDF-формате (редактор Adobe Acrobat).

**БЛАНК-ЗАКАЗ НА ПОДПИСКУ 2022 г.  
на издания ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»**

| Наименование издания  | Периодичность в год | Цена 1 экз., руб. | Кол-во выпусков в год | Общая сумма, руб. |
|---|---------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|
| Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России         | 4                   | 1550,00           |                       |                   |
| Конструкции из композиционных материалов                          | 4                   | 1700,00           |                       |                   |
| Экология промышленного производства                               | 4                   | 1500,00           |                       |                   |
| Информационные технологии в проектировании и производстве         | 4                   | 1750,00           |                       |                   |
| Вопросы защиты информации   | 4                   | 1750,00           |                       |                   |
| <i>В цену включены: НДС — 10 % и стоимость почтовой доставки.</i> |                     |                   |                       |                   |

*Поставка журналов подписчикам через издательство осуществляется почтовыми бандеролями с приложением всех необходимых бухгалтерских документов.*

**Наши реквизиты:**

Полное наименование организации: \_\_\_\_\_

Сокращенное наименование организации: \_\_\_\_\_

ИНН/КПП \_\_\_\_\_

ОКПО \_\_\_\_\_

Расчётный счёт № \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_

к/с \_\_\_\_\_ БИК \_\_\_\_\_

Юридический адрес: \_\_\_\_\_

Почтовый адрес: \_\_\_\_\_

Контактное лицо \_\_\_\_\_ тел. \_\_\_\_\_

E-mail: \_\_\_\_\_

*(Для оформления счёта и бухгалтерских документов просьба заполнить все строчки).*

**Справочно:**

Заполненный бланк-заказ просьба отправить по факсу: 8(495) 491-44-80 или

E-mail: [secretariat@ntckompas.ru](mailto:secretariat@ntckompas.ru)

Более подробную информацию об изданиях и подписке можно получить по телефону:

8 (495) 491-43-17.

E-mail: [ivleva@ntckompas.ru](mailto:ivleva@ntckompas.ru)

Адрес редакции: 125424, Москва, Волоколамское шоссе, д.77.

ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».