

Учредители:  
Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации,  
Межрегиональная общественная организация  
«Академия проблем качества»

## КАЧЕСТВО И ЖИЗНЬ

Научно-производственный  
культурно-образовательный журнал

**2025 № 3(47)**

Свидетельство о регистрации в Роскомнадзоре  
ПИ № 77-16571 от 13.10.2003  
ISSN 2312-5209  
Подписной индекс Пресса России – 43453

### Редакционная коллегия:

**Б.В. Бойцов** (главный редактор), д.т.н., проф.,  
засл. деятель науки РФ;

**К.В. Леонидов; М.Ю. Куприков**, д.т.н., проф.;

**А.И. Ресинец**, канд. воен. наук, доцент;

**Е.П. Плавельский**, д.т.н., проф.;

**А.Е. Плавельский**, к.т.н.;

**Г.Н. Иванова**, к.э.н., доцент;

**И.А. Сосунова**, д.социол.н., проф.;

**Ю.И. Денискин**, д.т.н., проф.;

**М.М. Копкина** (отв. секретарь),

Издатель – Межрегиональная общественная  
организация «Академия проблем качества  
им. В.В. Бойцова»  
117393, Москва, ул. Профсоюзная, д. 78, стр. 1  
Тел./факс: (499) 236-1536, www.academquality.ru

### Редакционный совет:

**Г.И. Элькин** (председатель), д.э.н.; **А.П. Шалаев;**

**В.Н. Азаров**, д.т.н., проф.;

**В.Ф. Безъязычный**, д.т.н., проф.;

**В.Я. Белобрагин**, д.э.н., проф.;

**А.Б. Бельский**, д.т.н., проф., доцент;

**Б.В. Бойцов**, д.т.н., проф.;

**И.Н. Бокарев**, д.мед.н., проф.;

**В.А. Васильев**, д.т.н., проф.;

**С.А. Васин**, д.т.н., проф.;

**Г.П. Воронин**, д.э.н., проф.;

**А.В. Евсеев**, д.т.н., доцент;

**С.Г. Емельянов**, д.т.н., проф.;

**Ю.В. Илюхин**, д.т.н., проф.;

**Л.К. Исаев**, д.т.н., проф.;

**И.А. Коровкин**, к.э.н.;

**Ю.В. Кранев**, д.филос.н., проф.;

**В.И. Кулайкин**, к.п.н.;

**В.В. Окрепилов**, д.э.н., проф., акад. РАН;

**М.А. Погосян**, д.т.н., проф., доцент, акад. РАН;

**М.Л. Рахманов**, д.т.н., проф., доцент;

**А.К. Скворчевский**, д.т.н., проф.;

**Н.Б. Топоров**, д.т.н., проф.;

**Б.А. Якимович**, д.т.н., проф.

# СОДЕРЖАНИЕ

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

**Алексенцева С.Е.**

Тестовые испытания материалов внешних защитных  
оболочек космических летательных аппаратов с ядерными  
установками от повреждающего воздействия пылевидных  
фракций..... 3

**Бойцов Б.В., Бехметьев В.И., Семенченко Д.С.**

Информационная поддержка процессов технологического  
проектирования, сборки и контроля авиационных  
конструкций ..... 7

**Бойцов Б.В., Ресинец А.И., Ресинец А.А.,**

**Суворов Г. А.**

Повышение качества и эффективности совместного применения  
вертолетов и беспилотных летательных аппаратов  
при патрулировании лесных массивов на предмет выявления  
очагов пожаров и их ликвидации ..... 28

**Бойцов Б.В., Ресинец А.И., Ресинец А.А.,**

**Тилинин М.И.**

Оптимальный выбор конструкции панелей планера вертолета  
на основе анализа их массовых характеристик ..... 37

## РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

**Поезжаева Е.В., Старцев М.К., Трясцын Е.С.,**

**Реутов В.А., Кучев Н.Н.**

Исследование характеристик нелинейной упругости  
звеньев роботов-манипуляторов..... 44

## УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

**Белай В.Е., Приходский А.А.**

Программа управления принтером этикеток по интерфейсу  
USB на языке Python..... 47

**Беклямишев М.О.**

Системно-динамическая модель управления качеством  
в текстильном кластере ..... 51

**Третьяк Л.Н., Вольнов А.С., Косых Д.А.**

Применение методов и инструментов управления качеством  
для обоснования выбора методик измерений (на примере  
количественного химического анализа) ..... 56

**Ответственный**

за выпуск: М.М. Копкина

**Редактор и корректор:**

Е.В. Масибута

**Дизайн и компьютерная верстка:**

Ж.И. Егорова

**Работа с авторами****и подписчиками:**

Н.С. Боцманова,

В.Ю. Ивашкова

Е.А. Солнцева

Тел/факс: (499) 236-35-84,

e-mail: info@100best.ru,

ql-mail@mail.ru

Подписано в печать 20.09.2025

Бумага мелованная. Заказ №

Формат 60×90/8

Гарнитура YanusC, Minion Pro

Печать офсетная

Тираж 300 экз.

Отпечатано в типографии

ООО «Полиформат», Москва

Мнение авторов статей может  
не совпадать с мнением редакции.

Перепечатка материалов,  
а также полное или частичное  
воспроизведение

их в электронном виде  
возможны только с письменного  
разрешения издателя.

Ссылка на журнал обязательна.

**Бободжонов Д.М.**

Обеспечение качества продукции при производстве  
поливинилхлорида и битумных эмульсий..... 64

**ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ  
И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ****Соколова А.М.**

Математическое моделирование процесса создания  
леденцовой карамели..... 68

**Соколова А.М.**

Физико-математическое моделирование процесса  
вытягивания карамельной массы..... 71

**ЦИФРОВИЗАЦИЯ.  
ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКЦИИ****Самошкин М.М.**

Рекомендации по определению степени готовности предприятий  
центрального теплоснабжения к цифровой трансформации  
в условиях концепции «Индустрия 4.0» и дальнейшему  
применению полученных результатов..... 74

**Чекмарев А.В.**

Модель зрелости цифровых проектов гибридных систем  
распределенного реестра и распределенных нейронных сетей  
для управления качеством ..... 80

**ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.  
ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА****Малявина П.А., Попов А.Ю.**

Переработка пластиковых отходов в топливо  
и нефтехимическое сырье методом термолиза..... 92



# Тестовые испытания материалов внешних защитных оболочек космических летательных аппаратов с ядерными установками от повреждающего воздействия пылевидных фракций

**С.Е. Алексенцева**

*профессор СамГТУ; г. Самара*

Аннотация. Исследована проблема опасности на космической орбите летательных аппаратов с ядерными энергетическими установками. Рассматриваются аспекты ударного воздействия космических объектов на внешние защитные оболочки летательных аппаратов. Особое внимание уделяется качеству и техническим требованиям к материалам и конструкциям защитных оболочек, в том числе при ударном воздействии космических микротел в виде частиц космического и техногенного происхождения. Предложен метод проведения тестовых испытаний материалов внешних защитных оболочек космических летательных аппаратов с ядерными установками от повреждающего воздействия пылевидных фракций при модельном тестовом испытании методом сверхглубокого проникания.

Ключевые слова: разрушение, космические летательные аппараты, поток сгустков высокоскоростных микротел, сверхглубокое проникание, ядерные установки.

Summary. The problem of danger of a finding in a space orbit of flying machines with nuclear power installations is investigated. Aspects of influence of space objects on external protective covers of flying machines are considered. The special attention is given to quality and technical requirements to materials and designs of protective covers, including at shock influence of space microbodies in the form of particles of a space and technogenic origin. The method of carrying out of test tests of materials of external protective covers of space flying machines with nuclear installations from damaging influence fractions is offered at modelling test by a method superdeep penetration.

Keywords: destruction, space flying machines, stream of clots of high-speed microbodies, superdeep penetration, nuclear installations.

Создание защитных конструкций и материалов космических аппаратов с ядерными энергетическими установками (ЯЭУ) и объектов с ядерным оружием не обеспечивает абсолютной гарантированной защиты аппаратов от космических метеоритных микротел. Одной из последних аварийных ситуаций, по данным НАСА, является фрагментация спутника с ЯЭУ на орбите. Разрушение аппаратов на орбите не единичны. Во многих аварийных ситуациях отсутствует возможность однозначно определить причину разрушений и поломок из-за необходимости выведения аварийного объекта на орбиту уничтожения.

Однако основной опасностью на космической орбите является возможность ударного воздействия на конструкцию ЯЭУ. Результатом может оказаться локальное разрушение или катастрофа с возможным выбросом радиоактивных материалов. Земная атмосфера и околоземное пространство могут быть подвергнуты опасным загрязнениям [1, 2].

Наличие на орбитальных сферах большого количества мусора приводит к опасности столкновения с отработанными техногенными объектами и конструкциями. Это может привести к такому частичному повреждению ЯЭУ, как пробой теплоносителя, разрушение конструктивных элементов, что приводит к незапланированному спуску в срочном режиме и падению на Землю с траектории безопасной орбиты.

Вследствие падения космического аппарата может произойти радиоактивное заражение области земного пространства, разрушение остатков конструкции реактора, имеющего высокий радиоактивный фон. Возможно возникновение радиоактивных элементов и частиц в пространстве земной атмосферы, выпадение радиоактивных частиц на земную поверхность.

### **Конструкционные особенности и материалы внешних защитных оболочек космических летательных аппаратов**

Внешние защитные оболочки космических летательных аппаратов (ЛА) предназначены для защиты от таких факторов, возникающих в космическом пространстве, как ионизирующая и солнечная радиация, вакуум, опасности столкновения с космическими объектами, метеорными и техногенными частицами.

Для защиты космических ЛА в основном используют конструкции внешних оболочек [3, 4] – это тонкостенные оболочки из композиционных материалов, используемые в обтекателях носителей ракет и разгонных блоков, а также в отсеках ЛА. В соответствии с пространственно-структурной композицией оболочки имеют сетчатую, сотовую трехслойную модель конструкции, стрингерно-шпангоутное заполнение и другие виды. Имеются примеры применения конструкций спиральных ребер в оболочках с изменяемыми характеристическими габаритными размерами, их расщеплением, угловым расположением, числом ребер. Изменяемые структуры ребер и поперечное сечение, вариативность по шагу, расположению и числу ребер имеются в интегральных стрингерных панелях и др.

Для изготовления конструкций внешних оболочек космических ЛА используют материалы, которые должны отвечать совокупным требованиям легкости и высокой прочности. Применяют композиционные материалы из углеродных волокон и полимерных смол, углепластики, что минимизирует весовые характеристики и дает сверхпрочность.

Алюминий и сплавы алюминия давно известны в аэрокосмической промышленности, отличаются сочетанием высокой прочности, технологичности и малого удельного веса. Алюминий-магниево-скандиевые сплавы и с добавлением скандия – основные металлические композиции для оболочек. Сплав АМг6 в отожженном состоянии имеет оптимальное сочетание прочности и пластичности. Новым направлением является использование гранулированных алюминиевых сплавов, класс интерметаллидов, которые включают композиции алюминий – титан, алюминий – скандий, алюминий – никель и другие, позволяющие снизить вес на треть и повысить температурный интервал применения.

Используются специальные покрытия для защиты от воздействия высоких температур в процессе вхождения аппарата в атмосферу. В качестве материалов применяют керамические покрытия.

### **Опасность взаимодействия космических объектов с ЛА**

Для защиты космических ЛА от элементов космических объектов, метеорных тел, орбитального мусора, техногенных и метеорных частиц разработаны комплексы панелей и сеток, ведется подбор материалов с заданными свойствами, задерживающие проникание частиц в материалы обшивок. Период эксплуатации защитных панелей составляет порядка 10 лет. Однако в размерном интервале космических объектов большую долю занимают микротела с массой в интервале от десятых долей грамма до килограмма. Нижняя размерная граница метеорных тел – доли мкм. Частицы техногенного происхождения, сформированные при функционировании космического аппарата, имеют размеры от 1 до 10 мкм. Микрометеорные частицы в основном имеют плотность порядка 1 г/см<sup>3</sup>. Плотность частиц техногенного происхождения составляет около 4 г/см<sup>3</sup>.

Известно, что скорость космического ЛА на орбите около 8 км/с [5]. Диапазон скоростей взаимодействия космических объектов с ЛА составляет 0,1–16 км/с. При этом скорости метеорных частиц – порядка 20 км/с. Также существуют осколки лунного грунта, движущиеся со скоростью около 1 км/с.

Пылевые фракции и сгустки микротел могут проникать через защитную оболочку и при этом генерировать в объеме трека интенсивное сложное комбинированное излучение, поражать системы управления (механическим воздействием, наводками электромагнитных волн), возбуждение атомарно-химических структур металлических материалов до уровней и состояний радиоактивных излучений. При длительном воздействии микротел алюминиевая оболочка может иметь преобразования в хрупкие химические соединения. Известны эксперименты исследования преобразования технически чистого алюминия сгустками частиц в размерном интервале до 100 мкм со скоростями 8–11 км/с, что показало возможность их проникания на глубины до тысяч исходных размеров ударников, что получило название «эффект сверхглубокого проникания» (СГП).

### **Тестовые испытания материалов внешних защитных оболочек космических ЛА**

В целом сформированы технические требования к внешним защитным оболочкам космических ЛА [3, 4]. Это повышенная устойчивость к космическим воздействиям. Требуется заданная герметичность, долговечность, усталостная и статическая прочность конструкций антенн, телескопов и других крупногабаритных элементов ЛА при тепловом воздействии и силовом нагружении в условиях космоса. Для конструкций отсеков, баллонов,



технологических емкостей проводят испытания на герметичность. В процессе изготовления внешних оболочек космических ЛА проводят тепловакуумные испытания в камерах с сверхнизким давлением при имитировании нагрева с температурами на солнечной орбите. Перепады температур на орбите космического ЛА проверяют по степени термической усталости.

Однако важнейшей областью является также защита внешних оболочек космических ЛА от повреждающего воздействия сгустков пылевых метеорных частиц [6]. При этом качество и защитные характеристики материалов конструкций внешних оболочек ЛА можно повысить тестовыми испытаниями при динамическом воздействии потоком частиц в режиме сверхглубокого проникания. Метод позволяет изучать с вероятностными характеристиками возможности разрушительного поражения защитных панелей и корпусных оболочек в результате ударного взаимодействия в режиме сверхглубокого проникания сгустков модельных частиц.

Моделирование высокоскоростного соударения частиц техногенного и космического происхождения с конструктивными элементами ЛА в лабораторных условиях можно проводить с применением пушек и ускорителей модельных частиц целым рядом методов. Это электростатические, электромагнитные, газодинамические и импульсные методы. Конструкции взрывных ускорителей в основном зависят от типа заряда энергонасыщенных материалов, использующие ударники с массой метаемых частиц  $10^{-5}$ – $10^{-3}$  кг в скоростном интервале 1–10 км/с [7].

В методе тестовых испытаний материалов внешних защитных оболочек космических летательных аппаратов от повреждающего воздействия фракций пылевых частиц использованы эффективные ускорители с кумулятивными зарядами [8], в конструктивной схеме которых частицы размещают на выемке заряда (см. рисунок). На рисунке – материал конструкции ЛА (1), подвергаемый воздействию потока частиц (2), разгоняемых энергией кумулятивного заряда (3). Данные конструктивные схемы позволяют повысить скорость и обеспечить скоростной интервал метаемых частиц, сопоставимый со скоростями обстрела космическими сгустками микротел в околоземной обстановке в космосе. Данный метод позволяет провести ударное воздействие потоками частиц разных плотностей и разных дисперсностей.

Проникание частиц сопровождается микро- и макроструктурными изменениями алюминиевых сплавов конструкции ЛА. В материале возникают каналные структурные элементы в трековых областях проникания частиц. Канальные образования представляют собой волоконные структуры,

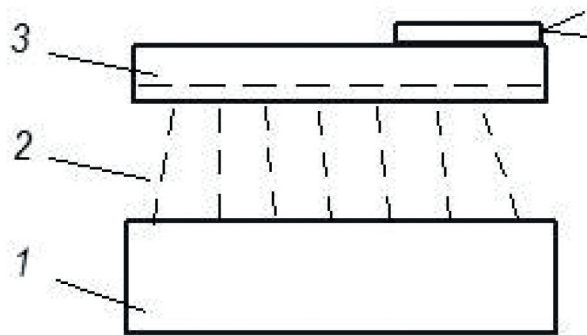


Схема тестовых испытаний материалов внешних защитных оболочек космических ЛА от повреждающего воздействия фракций пылевых частиц в режиме сверхглубокого проникания

включающие элементы материалов проникающих частиц. Также в них образуются зоны химических преобразований вследствие взаимодействия проникающих частиц и материала конструкции. При сквозном проникании частиц в сварные элементы конструкций имеется изменение исходных прочностных параметров [6, 9, 10].

Исследование алюминия А7, используемого для изготовления оболочки ЛА, при метании фракций порошковых частиц карбида кремния в размерном интервале до 100 мкм со скоростями 8–11 км/с показало появление локальных микровзрывов и выделение микрообъемов энергии при соударениях в локальных зонах [6]. Структурные преобразования, возникающие в результате взаимодействия частиц, аналогичных космическим частицам, с конструкциями ЛА, приводят к возможности охрупчивания материала защитной оболочки, снижению пластичности и прочности.

Сверхглубокому прониканию сопутствуют эффекты электромагнитных волновых корпускулярных излучений, что регистрируется с применением рентгеновского метода [11, 12]. В результате ударного взаимодействия частиц с материалами конструкции ЛА возникают всплески излучений электромагнитных волн сложного спектра.

Тестовые испытания материалов конструкций космических ЛА позволяют сделать выводы, что в ряде случаев аварийные ситуации могут быть вызваны структурными преобразованиями в результате ударных воздействий космических частиц. В целом преобразования в структуре алюминиевого материала могут привести к отрицательному тренду в функциональной пригодности материала космического ЛА. На микроуровне материала возможны возникновения локальных разупрочненных зон с дальнейшим развитием во всем объеме материала конструкции. Накопление данных микрорегиональных искажений структуры в продолжение длитель-

ного ударного воздействия сгустков космических микротел на защитные внешние оболочки космического ЛА может приводить к объемному снижению прочности.

Таким образом, вероятность нештатного активирования уранового стержня  $^{235}\text{U}$  тесно связана с надежностью системы многоуровневой защиты, термостойкого корпуса и контура охлаждения для ЯЭУ.

Предлагаемый метод тестовых испытаний при динамическом ударном воздействии потоком частиц, имитирующих космические микротела, в режиме сверхглубокого проникания позволяет более адекватно провести подбор материалов, обеспечивающих длительную прочность и высокое качество эксплуатационной работоспособности внешних защитных оболочек космических ЛА.

### Источники

1. Яковлев О.В. Системный анализ безопасности и риска космической ядерной энергетики // Вестник ВГУ. 2011. № 2. С. 44–48.
2. Федоров М.Ю., Краус Е.И., Шабалин И.И. Анализ последствий, аварий, приводящих к падению реактора космической ядерной энергоустановки на Землю // Труды МАИ. 2015. Вып. 82. С. 42–61.
3. Данилкин В.А. Собственная внешняя атмосфера космических аппаратов и ее влияние на параметры радиосигналов бортовых радиотехнических систем // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 5. № 1.
4. Евстафьев В.А. Конструирование космических аппаратов: Учеб. пособие. Ч. 1. СПб.: Балт. гос. ун-т, 2018. 99 с.
5. Семкин Н.Д., Телегин А.М. Преобразователи в электронных устройствах бортовых систем: Учеб. пособие. Самара: СГАУ, 2012. 307 с.
6. Ушеренко Ю.С., Алексенцева С.Е., Ушеренко С.М. Исследование надежности материалов внешних оболочек корпусов космических летательных аппаратов на орбите Земли в направлении взаимодействия с пылевидными фракциями // Технология металлов. 2022. № 5. С. 52–56.
7. Новиков Л.С. Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты: Учеб. пособие. М.: Университетская книга, 2009. 104 с.
8. Патент RU №2818023 U1 МПК F41 H 5/02, опубл. 23.04.2024. Метод тестирования материалов внешних оболочек космических летательных аппаратов от повреждающего воздействия фракций пылевых частиц на орбите Земли / С.Е. Алексенцева.
9. Ушеренко С.М. Сверхглубокое проникание частиц в преграды и создание композиционных материалов. Минск: НИИ ИП, 1998. 210 с.
10. Алексенцева С.Е. Повышение качества режущего инструмента, упрочненного методом

взрывной обработки потоком высокоскоростных дискретных частиц в режиме сверхглубокого проникания // Качество и жизнь. 2024. № 1-2. С. 92–97.

11. Ушеренко С.М., Гуцин В.И., Дыбов О.А. Результаты соударения потока микрочастиц с металлической преградой в режиме сверхглубокого проникания // Химическая физика. 2002. Т. 21. № 9. С. 43–51.

12. Sobolev V.V., Usherenko S.M. Physics of Super-Deep Penetration of Micro-Particles into Metals // Shock Waves in Condensed Matter: Proc. of Int. Conf. Kiev, Ukraine, 2012, 16–21 Sept. P. 171–179.

### Sources

1. Yakovlev O.V. Systems Analysis of Safety and Risk of Space Nuclear Power // Vestnik of VSU. 2011. No. 2. P. 44–48.
2. Fedorov M.Yu., Kraus E.I., Shabalin I.I. Analysis of Consequences, Accidents Leading to the Fall of a Space Nuclear Power Plant Reactor to Earth // Proceedings of MAI. 2015. Issue 82. P. 42–61.
3. Danilkin V.A. Own External Atmosphere of Spacecraft and Its Influence on the Parameters of Radio Signals of Onboard Radio Engineering Systems // Thermophysics and Aeromechanics. 2008. Vol. 5. No. 1.
4. Evstafiev V.A. Design of Spacecraft: Textbook. Manual. Part 1. SPb.: Baltic State University. un-t, 2018. 99 p.
5. Semkin N.D., Telegin A.M. Converters in electronic devices of on-board systems: Textbook. manual. Samara: SSAU, 2012. 307 p.
6. Usherenko Yu.S., Aleksentseva S.E., Usherenko S.M. Study of the reliability of materials of the outer shells of the bodies of spacecraft in Earth orbit in the direction of interaction with dust fractions // Technology of Metals. 2022. No. 5. Pp. 52–56.
7. Novikov L.S. Impact of solid particles of natural and artificial origin on spacecraft: Textbook. manual. Moscow: University book, 2009. 104 p.
8. Patent RU No. 2818023 U1 IPC F41 H 5/02, published 23.04.2024. Method of testing materials of outer shells of spacecraft from the damaging effects of dust particle fractions in Earth's orbit / S.E. Aleksentseva.
9. Usherenko S.M. Ultra-deep penetration of particles into barriers and creation of composite materials. Minsk: Research Institute of IP, 1998. 210 p.
10. Aleksentseva S.E. Improving the quality of a cutting tool strengthened by explosive processing with a flow of high-speed discrete particles in the ultra-deep penetration mode // Quality and Life. 2024. No. 1-2. P. 92–97.
11. Usherenko S.M., Gushchin V.I., Dybov O.A. Results of the collision of a flow of microparticles with a metal barrier in the super-deep penetration mode // Chemical Physics. 2002. Vol. 21. No. 9. Pp. 43–51.
12. Sobolev V.V., Usherenko S.M. Physics of Super-Deep Penetration of Micro-Particles into Metals // Shock Waves in Condensed Matter: Proc. of Int. Conf. Kiev, Ukraine, 2012, 16–21 Sept. Pp. 171–179.



# Информационная поддержка процессов технологического проектирования, сборки и контроля авиационных конструкций

## Бойцов Б.В.

*д-р техн. наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, профессор Московского авиационного института (НИУ); Москва*

## Бехметьев В.И.

*канд. техн. наук, доцент Московского авиационного института (НИУ); Москва*

## Семенченко Д.С.

*Московский авиационный институт (НИУ); Москва*

Аннотация. Приведены результаты теоретических и прикладных исследований построения информационных технологий и систем автоматизированного проектирования технологических процессов в производстве и контроле самолетных конструкций, а также освещены направления современной дефектоскопии и динамики дефектов в нагруженных авиационных конструкциях из полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: информационные технологии, САПР ТП, дефектоскопия, ПКМ, оснастка, линейный коэффициент ослабления, ЛКО, промышленный компьютерный томограф.

Abstract. The article presents the results of theoretical and applied research into the construction of information technologies and automated design systems for technological processes in the production and control of aircraft structures, and also highlights the trends in modern flaw detection and the dynamics of defects in loaded aircraft structures made of polymer composite materials.

Keywords: information technologies, CAD TP, flaw detection, PCM, tooling, linear attenuation coefficient, LCO, industrial computer tomograph.

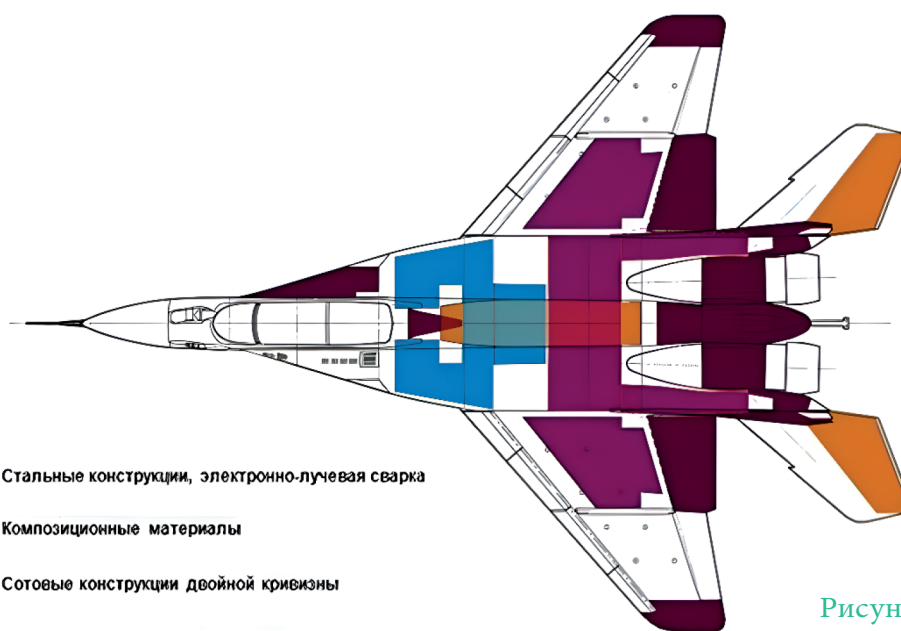
Технологическое совершенство конструкции как признак возможности использования про-

грессивных технологических процессов, методов и систем автоматизированного проектирования с применением информационных технологий, форм организации труда – все это влияет на технико-экономические показатели производства [1, 2]. Путем повышения технологичности конструкции самолета, использования комплексов автоматизированного проектирования и построения соответствующих технологий производства возможно добиться существенного снижения трудоемкости многих видов работ [3, 4]. В настоящей работе рассмотрен комплекс вопросов автоматизированного проектирования самолетных конструкций, технологической проработки изделий и контроля их качества с использованием системы информационных технологий применительно к современным маневренным самолетам.

В серийном производстве самолетов определенного тактического назначения существенный объем конструкций изготавливается из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Это обусловлено малым весом, высокой жесткостью и прочностью, высоким ресурсом этих материалов при работе в экстремальных условиях [5] (рис. 1).

Поскольку большая доля конструкций из ПКМ в проектируемой авиационной технике является элементами аэродинамических контуров, к ним предъявляются высокие требования по точности изготовления и прочностным показателям, откуда проистекают и жесткие требования к технологии изготовления, а также к подготовке производства [3, 6]. Конструкции из ПКМ с более высокими эксплуатационными характеристиками обеспечивают экономию материальных, энергетических и людских ресурсов. Исследования показывают существенное влияние режима изготовления на физико-механические свойства ПКМ в зависимости от температуры, влажности воздуха, отверждающих добавок, способов уплотнения наполнителей, степени влажности этих материалов, технологии подготовки связующего и других параметров [6].

Весь процесс от проектирования изделия до его утилизации представляет собой единый взаимосвязанный информационный комплекс, содержащий все необходимые связи: в едином информационном пространстве связано изделие, процессы,



- Стальные конструкции, электронно-лучевая сварка
- Композиционные материалы
- Сотовые конструкции двойной кривизны
- Сборка бакового отсека в специализированном стапеле

Рисунок 1. Технологические особенности маневренного самолета

завод и ресурсы. В основе этого подхода лежат геометрические модели проектируемого изделия, технологические модели и всего того окружения, в котором создается конструкция самолета. Визуализация этих моделей на всех стадиях жизненного цикла изделия (рис. 2) является важным аспектом комплексной автоматизации всего состава процессов [6–9].

Как известно, внедрения информационных технологий в производственный процесс предприятия позволяет существенно улучшить ряд показателей [11]:

- прямое уменьшение затрат на проектирование – от 10 до 30%;
- сокращение времени разработки изделий на рынок – в 1,5–2 раза;



Рисунок 2. Основные стадии жизненного цикла самолета



– сокращение времени ввода новых изделий на рынок – от 25 до 75%;

– уменьшение доли брака и объема конструктивных изменений от 23 до 73%;

– сокращение затрат на подготовку технической документации – до 40%;

– сокращение затрат на разработку эксплуатационной документации – до 30%. Внедрение этих цифровых технологий – трудоемкий процесс, требующий как освоения общих инструментальных средств, так и разработки новых методологий проектирования, методов анализа и синтеза технических решений с использованием специнструментов. Кроме того, требования к летно-техническим характеристикам сверхзвуковых самолетов, высокий уровень нагрузок на элементы конструкции требуют дальнейшего повышения объема использования ПКМ, что во многом определяет технический уровень изделий. Достижимый эффект при этом во многом зависит от следующего [6]:

– объема применения КМ, который, согласно мировой тенденции, постоянно растет;

– уникальных свойств КМ, в том числе от высоких удельных характеристик прочности и жесткости, высоких показателей сопротивления усталости, стойкости к вибрационным и акустическим нагрузкам, возможности управления в широких пределах анизотропией свойств и т.д.

Основу информационных технологий составляет современное программное обеспечение, которое позволяет передать созданную 3-мерную геометрию детали непосредственно на станок с числовым программным управлением [7, 8]. Современные станки с ЧПУ, во-первых, напря-

мую связаны с персональными компьютерами; во-вторых, имеют 5 и выше степеней свободы (в настоящее время 12 степеней свободы – норма); в-третьих, обладают высокой точностью, а также в автоматическом режиме проводят измерение и коррекцию траектории инструмента в зависимости от величины износа режущей части инструмента (рис. 3). Все это позволяет снизить трудоемкость технологического процесса, повысить ресурс конструкции, ее точность изготовления и улучшить условия труда [6].

Одной из основных задач современного самолетостроительного производства является внедрение материалов и элементов авиаконструкций, позволяющих существенно улучшить технико-экономические показатели изделий (удельная прочность, жесткость, надежность, стоимость) при высоком качестве всех конструктивных элементов. Изготавливая детали из ПКМ, одновременно формируются физико-механические свойства материала, поэтому гарантировано качество и нужные свойства материала [5]. Современные методы контроля материалов должны обеспечивать возможность определения координат и размеров дефектов в 3D-пространстве. Как альтернативу росту объемов контроля и диагностики конструктивных элементов самолета, а также с целью расширения исследовательских работ, связанных с этой проблемой, рекомендуется использовать такой метод неразрушающего контроля, как вычислительная компьютерная томография, которую целесообразно применять в стационарных исследовательских условиях для детальной отработки качества технологических процессов [6]. Работа компьютерного

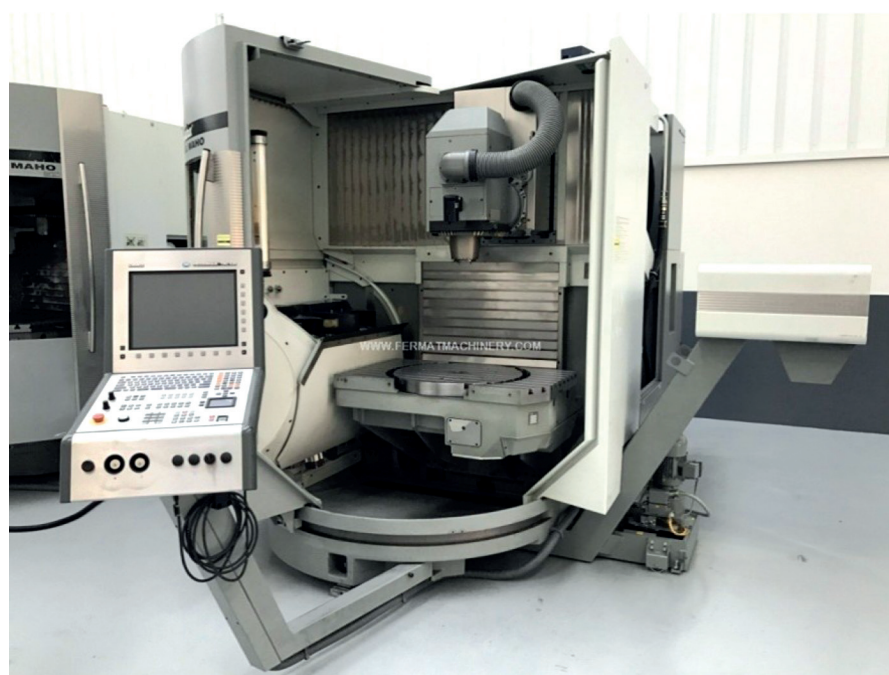


Рисунок 3. Высокопроизводительный фрезерный обрабатывающий центр DMU-60.

вычислительного томографа основана на радиационном методе контроля с использованием двух источников рентгеновского излучения (рис. 4): рентгеновской трубки и томобетатрона (ускорителя элементарных частиц).

Таким образом, на основе анализа применения информационных технологий в процессах технологического проектирования и производства конструкций самолетов происходит следующее [6]:

- снижается трудоемкость производства: использование цифровых технологий позволяет автоматизировать многие процессы, и это способствует уменьшению времени производства;

- растет уровень качества продукции: цифровые технологии могут помочь предотвратить ошибки в производственных процессах, что повышает качество продукции;

- снижаются затраты: автоматизированные процессы позволяют сократить затраты на рабочую силу и полуфабрикаты;

- увеличивается гибкость производства: идет быстросменность производственных процессов в зависимости от потребностей в номенклатуре изделий;

- создаются виртуальные двойники продукции: это позволяет проводить тестирование и оптимизацию продукции еще на этапе проектирования, уменьшается количество ошибок и снижаются затраты на борьбу с дефектами;

- растет уровень безопасности и надежности: ИТ-технологии повышают безопасность и надежность изделий (например, посредством использования систем автоматического контроля качества).

В качестве предметной основы формирования и применения ИТ-технологий в проектно-производственных процессах рассмотрим структурный цикл формирования изделия (конструктивных элементов самолетных узлов и агрегатов – рис. 5). Первым этапом идет процесс проектирования конструкций с использованием САД-систем различного уровня и назначения: КОМПАС-3D, NX, CATIA и др. [4, 9]. На этом этапе формируется конструкторская документация для деталей, узлов, агрегатов, сборок и подсборок, включающая 3D-модели, электронные чертежи, технические условия, необходимую сопроводительную документацию. Рассмотрим конструктивные элементы типового агрегата на примере закрылка маневренного истребителя. Закрылок композитной конструкции с сотовым блоком и двумя узлами навески (см. рис. 5, табл. 1). По конструкции сотовый блок состоит из двух составных нервюр, узлов навески закрылка, включающих титановые и композитные части, композитного лобового лонжерона, сухаря по задней кромке закрылка из углепластика и текстолитовых вкладышей по хвостовым частям нервюр, композиционной обшивки и сотового заполнителя из алюминиевой фольги, склеенных между собой. Нервюры – балочного типа, штампованные из листового материала. Они устанавливаются перпендикулярно оси лонжерона. К нервюрам узлов навески закрылка на болтовых соединениях крепятся кронштейны навески закрылка. Двухщелевой закрылок состоит из двух отдельных агрегатов – закрылка и дефлектора (профильная конструкция, которая располагается над закрылком и служит для уменьшения взлетной дистанции самолета). Деф-



Рисунок 4. Рентгеновский вычислительный томограф ВТ-600ХА

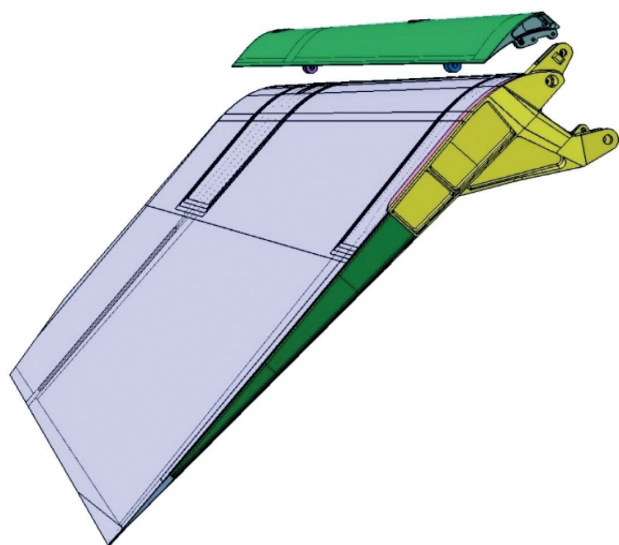
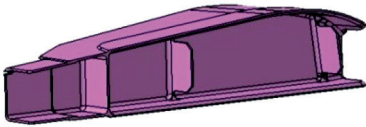
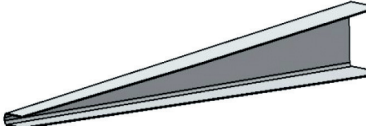

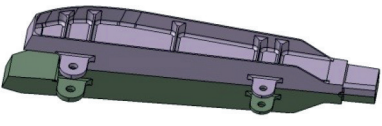
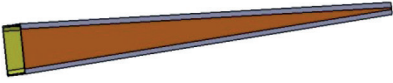
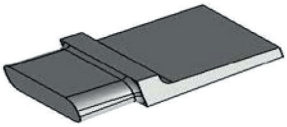


Рисунок 5. Пример 3D-модели закрылка маневренного самолета

латор является композитно-сотовой конструкцией. Узлы навески – из алюминиевых и титановых сплавов: два узла навески вклеены внутрь конструкции. Лонжерон выполнен из ПКМ (углепластик). По поверхности дефлектора и закрылка установлена медная сетка для снятия статического электричества. Каркас закрылка состоит из трубчатого продольного лонжерона, нервюры и обшивки. Лонжерон располагается вблизи носка и является основным силовым элементом конструкции, к которому крепятся узлы подвески и нервюры.

Следующим этапом в рассматриваемом цикле является технологическая составляющая – разработка комплекса технологических процессов производства конструктивных элементов самолета с использованием информационных технологий (рис. 6). В качестве системы автоматизированного технологического проектирования на последующих этапах разработки техпроцессов разного уровня рекомендуется использовать отраслевую

Таблица 1. Комплектация закрылка

№ п/п	Наименование элемента	Модель детали	Базирование элемента (базовые поверхности)	Элементы приспособления
1	Нервюра корневая			
1.1	Нервюра		Внутренняя поверхность	Технологический вкладыш (МН)
1.2	Стенка		Внутренняя поверхность	Технологический вкладыш (МН)
1.3	Вкладыш		Наружная поверхность	Технологический вкладыш (МН), БП
2	Нервюра концевая			
2.1	Нервюра		Отверстия стыковых болтов	Фиксатор штыревой
2.2	Стенка		Внутренняя поверхность	Прижим
2.3	Вкладыш		Наружная поверхность	БП

№ п/п	Наименование элемента	Модель детали	Базирование элемента (базовые поверхности)	Элементы приспособления
3	Лонжерон		Внутренняя поверхность	Оправка, ФП
4	Сухарь		Наружная поверхность	ПР – ОП
5	Соты		Наружная поверхность	БП, рамка каркаса
6	Обшивка		Внутренняя поверхность	Цулага (ПР)

отечественную систему САПР ТП «ВЕРТИКАЛЬ» российской компании «АСКОН», построенную на стандартах отрасли и имеющую соответствующие базы данных «ПОЛИНОМ:МДМ» в своей основе по разным видам процессов, оборудования, оснастки, инструмента и т.д.

Для формирования элементов конструкции агрегата (см. табл. 1) и комплектующих в процессе технологического проектирования, а также для получения производственной технологической доку-

ментации на эти комплектующие для последующей узловой и агрегатной сборки формируются основные базы данных (БД) на основе системы управления базами данных СУБД «ПОЛИНОМ:МДМ» (рис. 7). В рамках программного комплекса, БД, расчетно-нормировочных приложений и системы «ЛОЦМАН:PLM» решается весь спектр проекторочных и организационных задач технологического проектирования летательного аппарата и всех его конструктивных элементов (рис. 8).

*IT-технологии в проектно-производственном цикле*

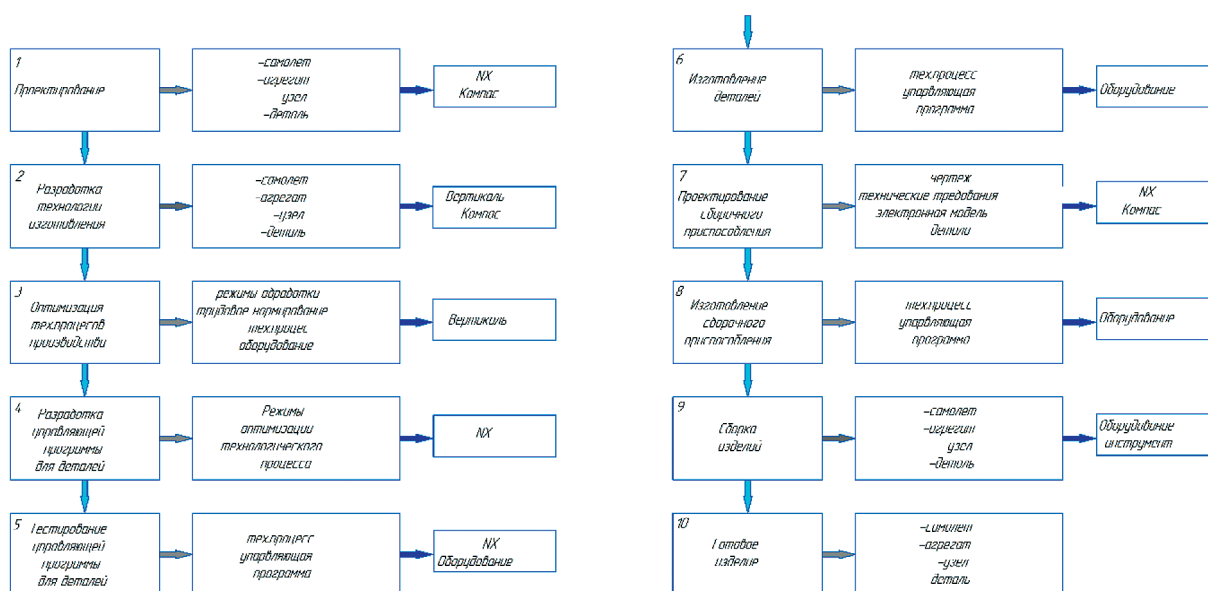


Рисунок 6. Информационные технологии в составе проектно-производственного цикла изделия



Рисунок 7. Основные базы данных в СУБД «ПОЛИНОМ:МДМ» для технологического проектирования в САПР ТП «ВЕРТИКАЛЬ»



Рисунок 8. Интеграция и взаимодействие элементов комплекса «АСКОН»

При выполнении технологического проектирования конструктивных элементов, представленных в табл. 1, следует воспользоваться их 3D-моделями, электронными чертежами или тем и другим одновременно. Это упрощает процесс считывания данных системой САПР ТП с носителя информации и перенос этих данных в технологический процесс.

Главной особенностью при работе в САПР ТП «ВЕРТИКАЛЬ», связанной с проектом детали/

сборкой, является отличительный набор инструмента и приспособлений, начиная от различного рода фрез и сверл и заканчивая всевозможными специальными контрольными инструментами. При всем этом БД «ПОЛИНОМ:МДМ» должна быть всегда на актуальном уровне и при необходимости дополняться необходимыми новыми инструментами. Данная система поддерживает все бизнес-процессы электронного инженерного документооборота, в том числе управление технологическими изменениями, а также может формировать блоки управляющих программ в маршрутной технологии. В системе применен качественно новый подход к организации данных о технологических процессах, основанный на объектной модели представления и обработки технологической информации. Поскольку система производства в России основана на маршрутно-операционных технологиях, то и применение систем САПР ТП для разработки этих технологий является одной из важнейших задач повышения эффективности проектирования и производства авиационной техники [6].

Однако базы данных системы СУБД «ПОЛИНОМ:МДМ» не всегда содержат требуемое оборудование, инструмент или оснастку [10]. Как и любые базы данных, справочники УТС и МИС могут наполняться и редактироваться в соответствии с производственной необходимостью применительно к конкретному предприятию [12]. Формирование технологической документации в системе реализовано через приложение «Вертикаль – отчеты». Данное приложение может быть использовано уже без системы «ВЕРТИКАЛЬ» и не требует лицензии на ее использование. Сохранить комплект сформированной документации можно в различных независимых от САПР ТП форматах (\*.pdf, \*.xls, \*.tif, \*.emf) [6, 10].

Рассмотрим последовательность проектирования техпроцесса формирования детали сложной геометрической формы (кронштейна для соединения крыла самолета с нервюрой корневого узла навески закрылка – табл. 1). Проект подразумевает следующие действия в системе:

- выбрать вид и габариты заготовки;
- выбрать вид станочного оборудования;
- выбрать специальные приспособления, режу-

щий, вспомогательный и измерительный инструмент;

- выбрать последовательность изготовления детали;
- ввести полученную информацию в САПР ТП «ВЕРТИКАЛЬ»;
- сформировать технологическую документацию.

Деталь «кронштейн» принадлежит к классу 73 (тела – не тела вращения) технологического классификатора и служит для соединения крыла самолета с нервюрой корневого узла навески закрылка. Конструкция имеет уклоны, карманы, радиусные переходы и отверстия (рис. 9).

Данная деталь имеет качество поверхности Ra = 3,2, особо ответственные поверхности Ra = 1,6. На детали отсутствуют острые кромки. Масса детали 3,6 кг, изготавливается из алюминиевого сплава В95пчТ3, обладает ударной вязкостью  $\delta = 45...54$  кгс/мм<sup>2</sup>. Обозначение Т3 в маркировке сплава означает, что материал прошел искусственное старение – нагрев до 150–165°C с выдержкой при этой температуре 6–15 ч. В95 хорошо обрабатывается резанием и сваривается точечной сваркой, применяется для изготовления высоконагруженных конструкций, работающих в условиях напряжений сжатия (детали обшивки, стрингеры, шпангоуты, лонжероны самолетов и другие детали). Анализ конструкции детали показывает, что она имеет унифицированную геометрическую форму, поэтому обработка детали в проектом технологическом процессе производится на станках с числовым программным управлением. Применение обработки на станке с ЧПУ позволило произвести концентрацию переходов операций, при этом число операций стало меньше. Концентрация операций позволила сократить трудоемкость изготовления за счет сокращения вспомогательного времени, а количество приспособлений и их конструкция стали проще и дешевле.

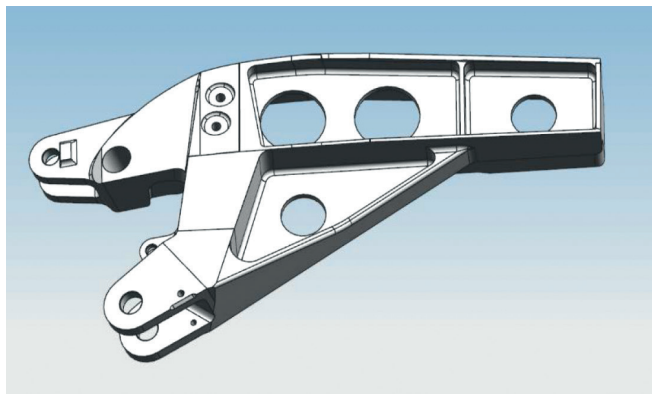


Рисунок 9. 3D-модель кронштейна крепления корневой нервюры

При разработке технологического процесса следует руководствоваться следующими принципами:

- в первую очередь обрабатывают те поверхности, которые являются базовыми при дальнейшей обработке;
- после этого обрабатывают поверхности с наибольшим припуском;
- далее выполняют обработку поверхностей, снятие металла с которых в наименьшей степени влияет на жесткость заготовки;
- в начале технологического процесса следует проводить операции, на которых можно ожидать появление брака из-за скрытых дефектов металла (трещин, раковин, волосовин и т.д.);
- поверхности, связанные между собой допусками на взаимное расположение, необходимо по возможности обрабатывать за один установ;
- совмещение черновой и чистовой обработки в одной операции нежелательно.

Основная информация о структуре технологического процесса размещена в дереве ТП и дереве КТЭ (конструкторско-технологических элементов – рис. 10).

Дерево КТЭ (см. рис. 10) отображает состав и иерархию элементарных поверхностей, конструкторско-технологических элементов (КТЭ) и групп КТЭ детали. «Корнем» дерева КТЭ всегда является деталь (сборочная единица).

Дерево ТП (рис. 11) отображает состав и иерархию операций, переходов, оснастки и других объектов, составляющих технологический процесс изготовления – ДСЕ (детали и сборочные единицы). «Корнем» дерева ТП (см. рис. 11) всегда является деталь (сборочная единица).

После формирования дерева КТЭ приступаем к формированию и насыщению операций и других составляющих технологического процесса: в открывшемся окне выбираем нужную операцию из списка существующих или создаем новую путем нажатия кнопки «Добавить запись» (рис. 12). Для добавления оборудования к операции необходимо выделить операцию в дереве ТП, вызвать контекстное меню и выбрать пункт «Добавить – Станок» (рис. 13). После нажатия кнопки «Применить» выбранный станок будет отображен в дереве ТП. Как пример, для изготовления деталей рассматриваемого формата могут применяться станки: вертикально фрезерный ФП-17М и многофункциональный 5-координатный центр с ЧПУ [11].

В качестве технологического оборудования в данном технологическом процессе выбран обрабатывающий центр DMU 60 – это универсальный 5-координатный станок для 5-осевой полной обработки, позволяет совершить полную обработку за один установ, а также выполнять 5-стороннюю

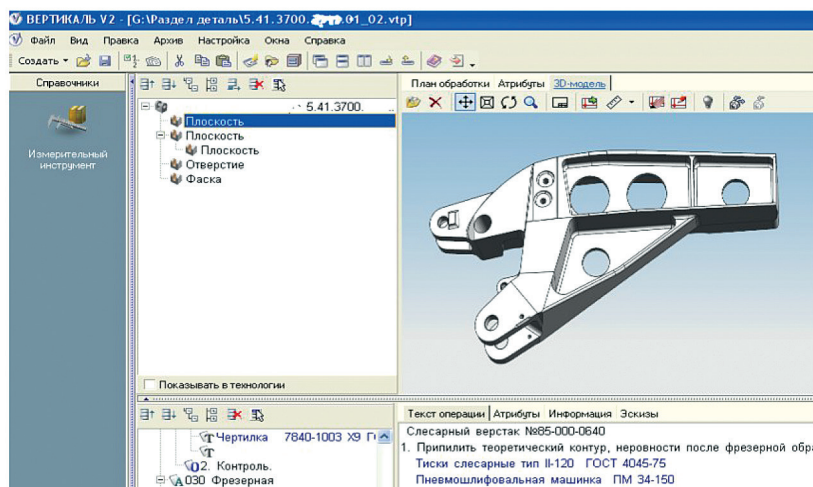


Рисунок 10. Дерево КТЭ

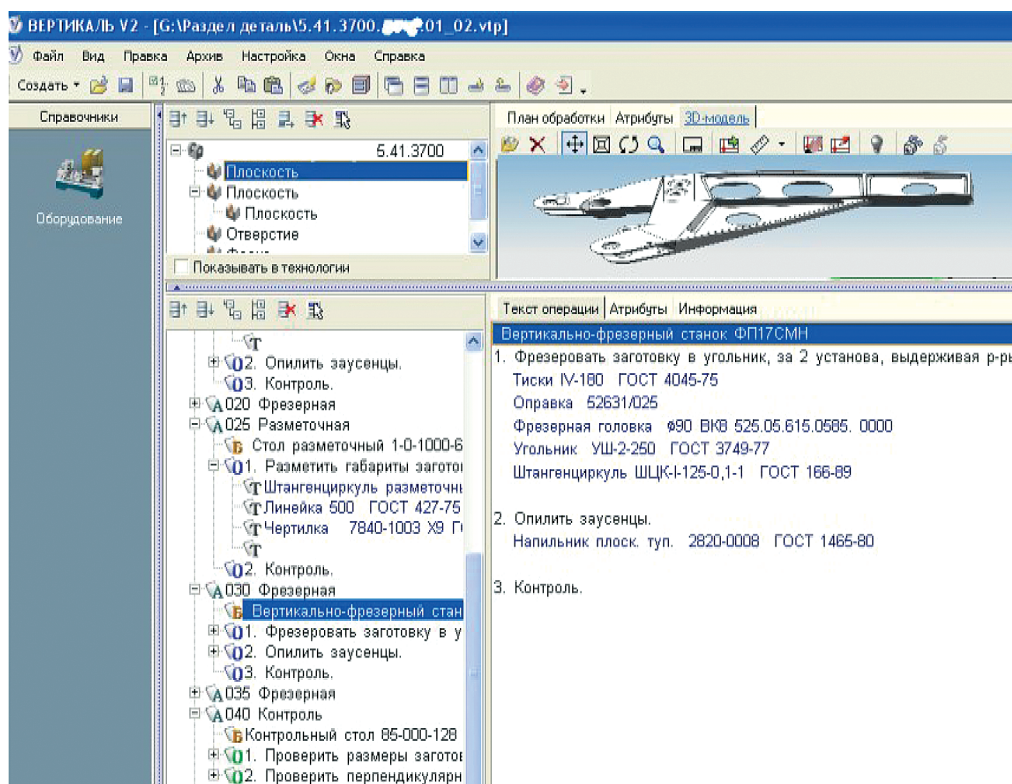


Рисунок 11. Дерево технологического процесса

и 5-осевую одновременную обработку. Станок оснащен поворотным круглым столом в сочетании с универсальной фрезерной головкой. Преимущества станка:

- высокая динамика, новая фрезерная головка с осью для отрицательных углов до 30°, уникальный выбор различных шпинделей и многообразие операций;
- универсальность с тремя осями – стандартно, операции расширения для 5-осевой обработки;
- компактная конструкция и небольшая высота станка при обширной рабочей зоне с большим ходом по оси Z;
- встроенный транспортер для удаления стружки;
- магазин инструмента на 24 места стандартно;

– ось B с поворотом на 150°. Обработка при отрицательных углах до 30°.

Аналогично операции производится и добавление перехода. Для этого устанавливаем курсор на название операции, вызываем контекстное меню и выбираем из него пункт «Добавить – Основной переход» (рис. 14).

Для основного перехода назначаем режущий инструмент: указываем нужный переход, вызываем контекстное меню и выбираем пункт «Добавить – Режущий инструмент» (рис. 15). Далее в окне справочника выбираем нужный инструмент. В процессе выбора можно пользоваться автоподбором и различными режимами поиска,

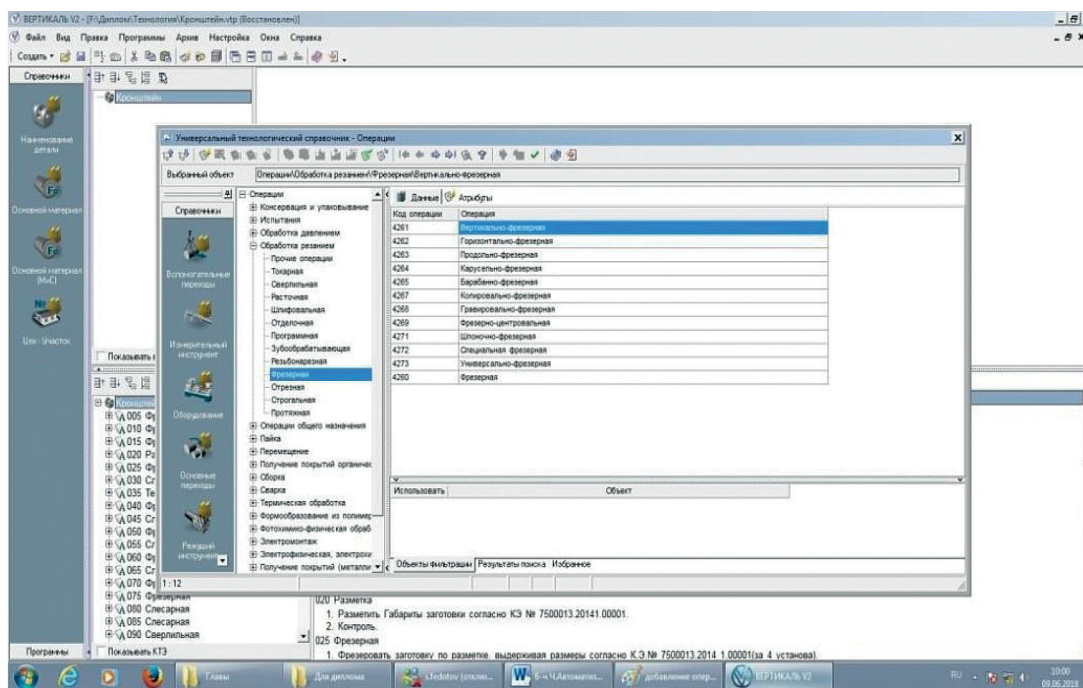


Рисунок 12. Выбор технологических операций

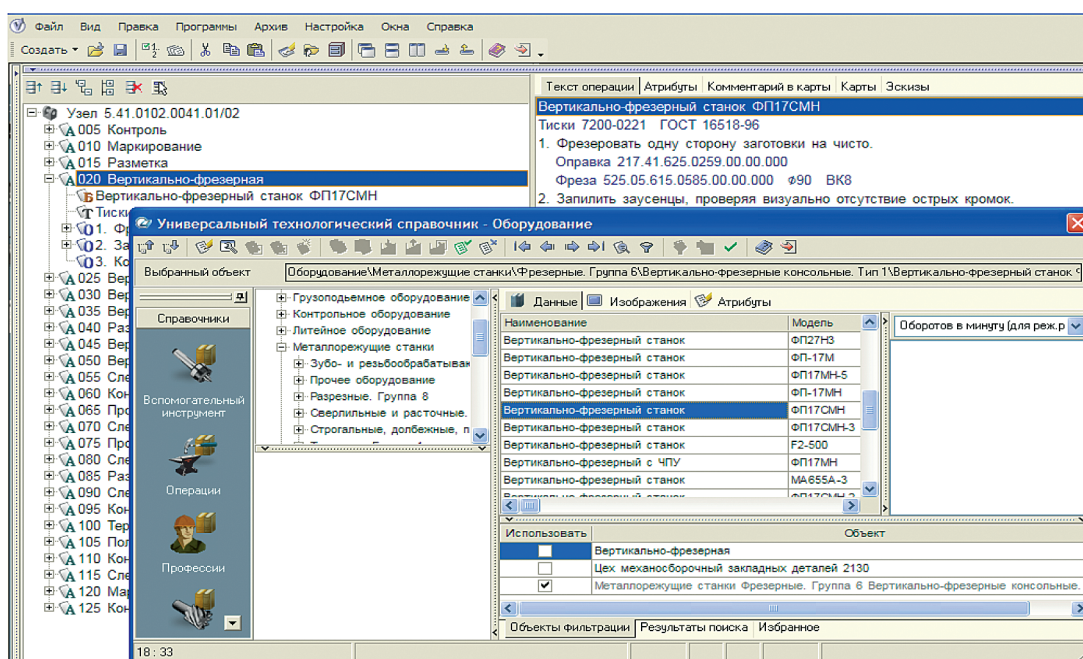


Рисунок 13. Выбор технологического оборудования

а также изображениями (слайдами) инструмента.

Для каждого сочетания обрабатываемого материала и конфигурации детали обычно можно выбрать несколько вариантов инструмента. При выборе фрезы необходимо учитывать следующие факторы:

- размеры и конфигурация поверхностей, подлежащих обработке, и требования к ним;
- жесткость детали и приспособления для ее закрепления;

- необходимый вылет инструмента;
- тип обрабатываемого материала, твердость и состояние;
- наличие предварительной обработки как механической, так и термической.

Характеристики станка, которые следует проанализировать:

- число оборотов шпинделя, величины подачи, крепление инструмента, мощность;
- точность перемещения по осям;

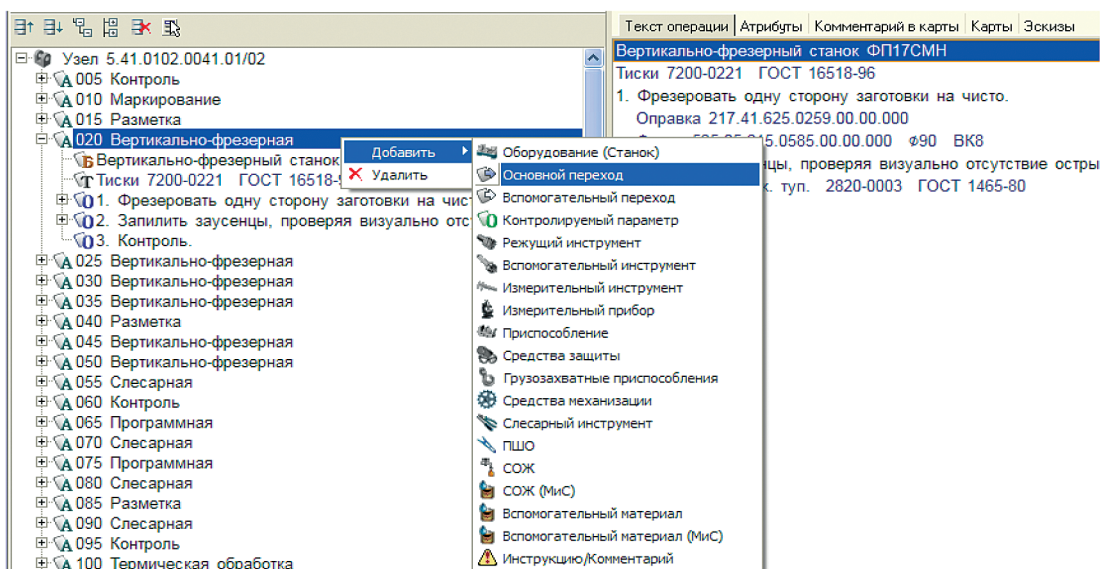


Рисунок 14. Выбор технологических переходов

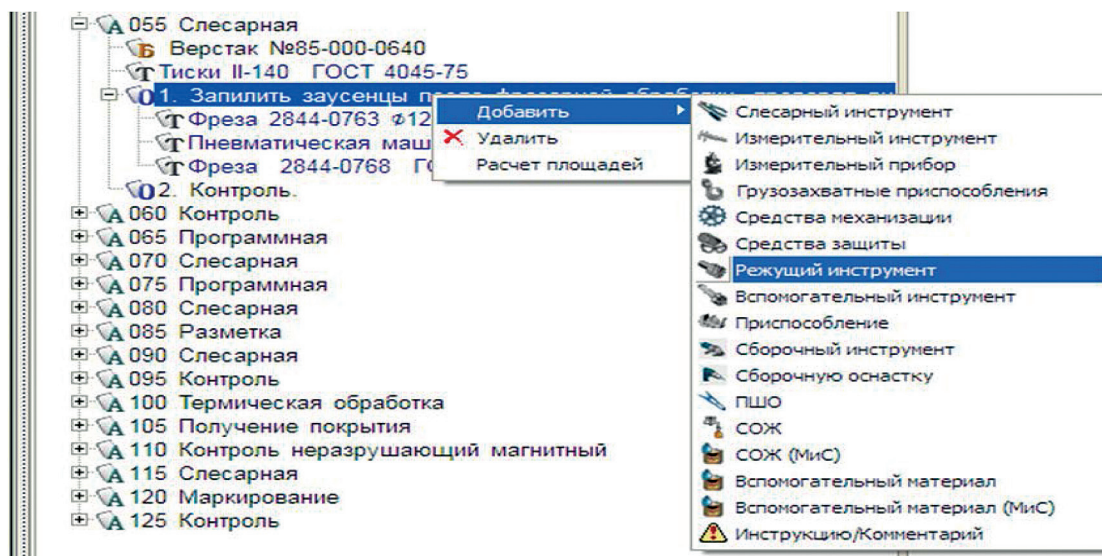


Рисунок 15. Выбор режущего инструмента

– возможные ограничения.

Правильный выбор инструмента обеспечивает высокую производительность и чистоту обрабатываемой поверхности. Выбор режущего инструмента представлен для рассматриваемой здесь конкретной технологии:

- фреза торцевая Ø 50 Z10 ГОСТ 9304-69;
- фрезы концевые Ø20 Z6, Ø16 Z6, Ø12 Z5, Ø8 Z4, Ø5 Z4 ГОСТ 17025-71;
- сверло центровочное Ø3 ГОСТ 14952-75;
- сверла Ø 18,7, Ø 15,7 мм, Ø 12,7 мм, Ø 14,7 мм, Ø 9,7 мм ГОСТ 10903-77;
- развертки Ø 19Н8, Ø 16Н9, Ø 14М7, Ø 12М7, Ø 10Н8 612-03/2333;
- напильник плоский 2820-0008 ГОСТ1465-80;

– зенковка обратная с углом 90°6119/0414;

– зенковки Ø 10, Ø 13, Ø 15, Ø 19 с углом 90° ГОСТ 14953-80.

Технологическая оснастка: вставка данных о технологической оснастке, вспомогательных материалах и инструменте производится аналогично формированию операций и переходов. Вспомогательное оборудование и оснастка:

- патрон Weldon: 185031T013815; патрон гидропластовый 403.65.12;
- пневмомашинка ИП – 2009А ГОСТ 5715-71;
- пневмодрель СМ 21-6-12000;
- оправка 705.05.631.0854;
- патрон сверлильный ВТ40-АРУ16-130.

После формирования дерева технологиче-

ского процесса и подключения к операциям технологического процесса операционных эскизов необходимо сформировать комплект технологической документации для передачи ее на рабочие участки для производства деталей. Для этого подключаем мастер формирования технологических карт и получаем документацию, которую можно сохранить затем в удобном и независимом от

САПР ТП формате, например, в среде Microsoft Excel (рис. 16).

Основными «поставщиками» справочных данных являются корпоративные справочники («Единицы измерения», «Материалы и сортаменты») и универсальный технологический справочник (УТС). Они, как и многие другие справочники, входят в базу данных «ПОЛИНОМ:МДМ», образуя

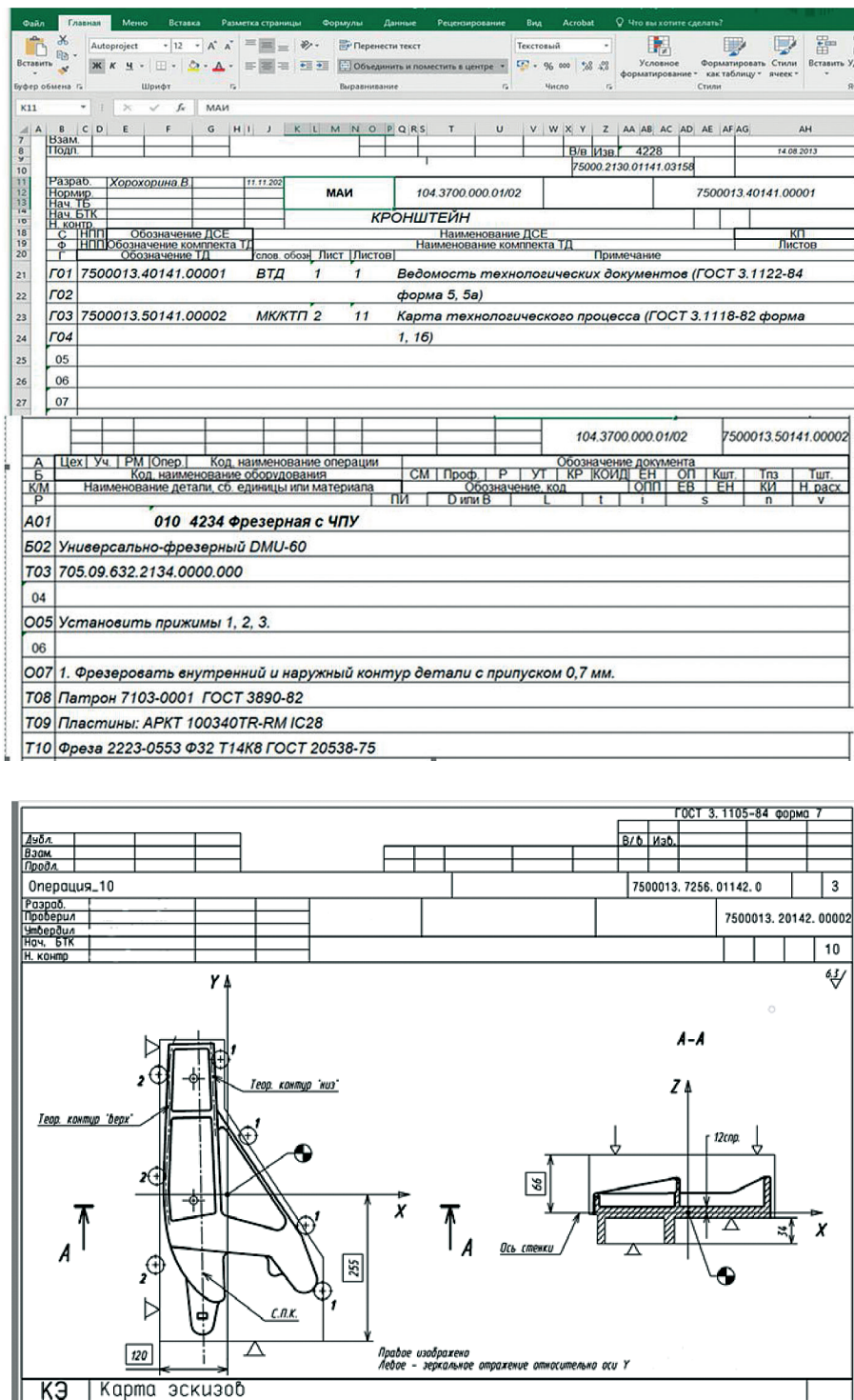


Рисунок 16. Формирование технологической документации и операционных эскизов к операциям технологического процесса



систему управления базами данных (СУБД). В процессе проектирования технологического процесса приходится сталкиваться с отсутствием данных по конкретным элементам технологического процесса: высокопроизводительным станкам, спецприспособлениям, инструменту, схемам и режимам обработки и т.д. В СУБД «ПОЛИНОМ:МДМ» имеется возможность формировать свои справочники, библиотеки, отдельные папки с наполнением и вводом в них нужного содержимого, как, например, показанную введенную в СУБД схему вертикального фрезерования (рис. 17) с наполнением ее расчетными режимами обработки поверхностей деталей (КТЭ).

Для функционирования алгоритмов технологического проектирования в среде САПР ТП «ВЕРТИКАЛЬ» необходимо также связать единицы учета (в редакторе справочников) с объектами технологии, на которые будет распространяться эта логическая связь при обращении из системы «ВЕРТИКАЛЬ» в процессе автоматизированного проектирования технологического процесса (рис. 18).

Таким образом, в результате сформированного и представленного алгоритма применения программного комплекса САПР ТП «ВЕРТИКАЛЬ»

– «ПОЛИНОМ:МДМ» для решения конкретно поставленной задачи получена маршрутно-операционная технология обработки геометрически сложной ответственной детали закрылка маневренного самолета на современном высокопроизводительном оборудовании с ЧПУ, маршрутная составляющая которой представлена в табл. 2.

После проектирования технологических процессов для каждой детали (см. табл. 1) в САПР ТП «ВЕРТИКАЛЬ» осуществляется формирование процесса сборки в этой же среде, используя систему СУБД «ПОЛИНОМ:МДМ» уже для сборочных операций, извлекая и формируя необходимые для проекта базы данных по сборочной оснастке, стационарному оборудованию, ручному механизированному инструменту и другим специфическим для сборки авиационных конструкций данным. Автоматизированное проектирование процесса сборки в среде САПР ТП «ВЕРТИКАЛЬ» производится следующим образом: в окно комплектовки загружаются детали из комплекточной ведомости, на которые имеются технологические процессы (ТП) в базе данных «ВЕРТИКАЛЬ», и далее формируется поэтапно отдельный ТП на сборку (рис. 19) в связке с СУБД «ПОЛИНОМ:МДМ».

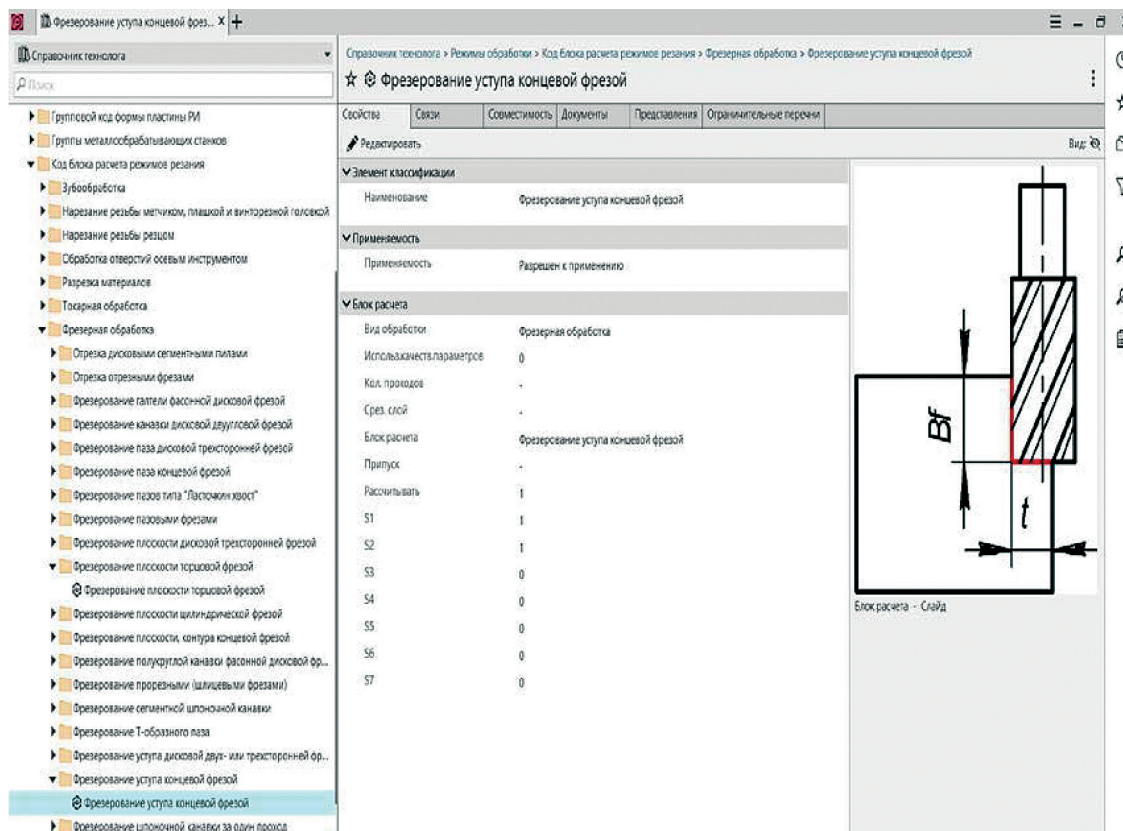


Рисунок 17. СУБД «ПОЛИНОМ:МДМ». Программирование функций по видам и расчету режимов обработки

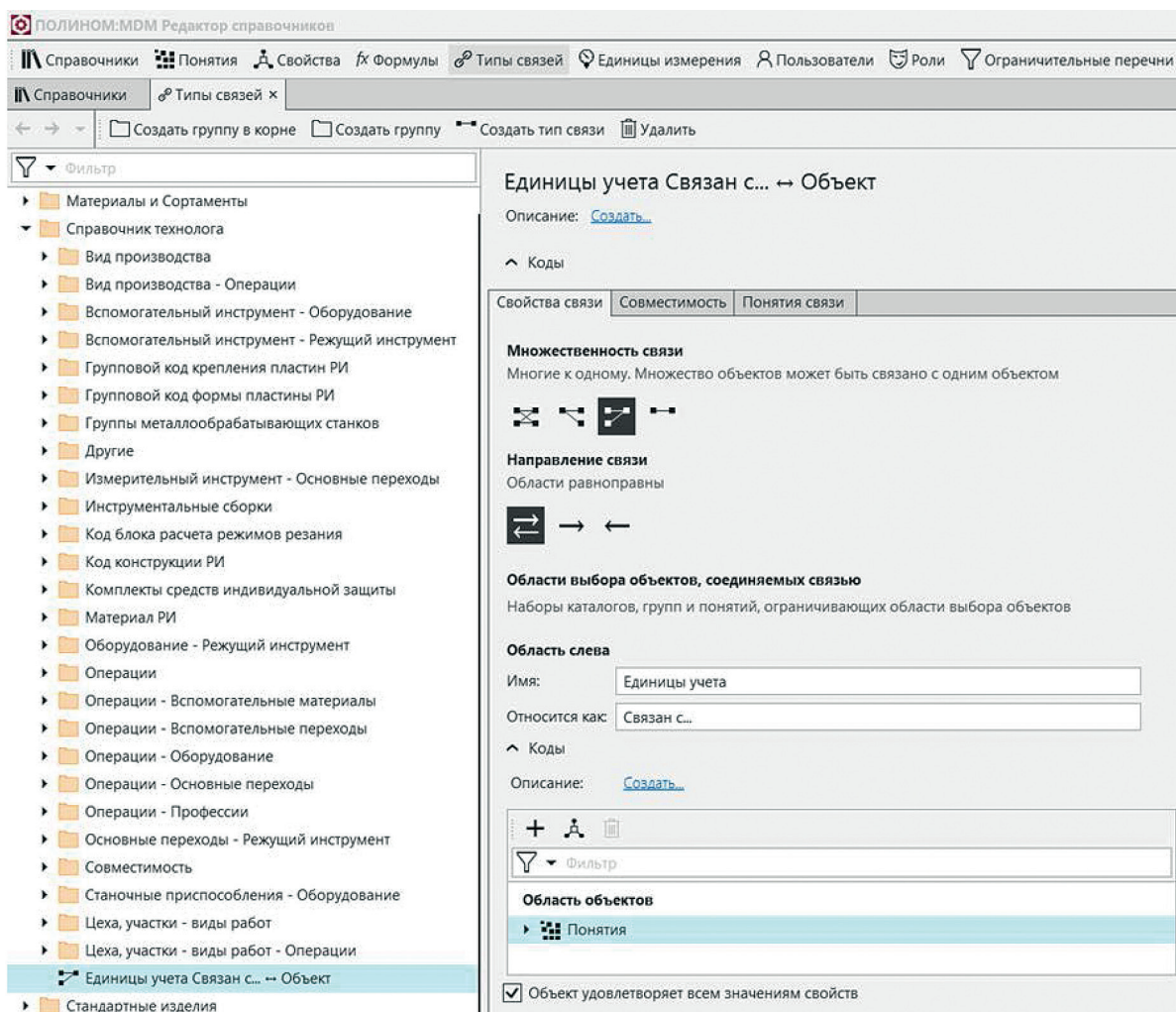


Рисунок 18. СУБД «ПОЛИНОМ:МДМ». Формирование взаимосвязей с объектами технологического процесса

Таблица 2. Маршрутная составляющая маршрутно-операционной технологии обработки закрылка маневренного самолета на современном высокопроизводительном оборудовании с ЧПУ

№ п/п	Наименование операции	Оборудование
005	Контрольная	Контрольный стол № 01-000-008
010	Фрезерная с ЧПУ	Вертикально-фрезерный станок DMU-60 monoBLOCK
015	Слесарная	Слесарный верстак № 01000-40
020	Контрольная	Контрольный стол № 01-000-008
025	Фрезерная с ЧПУ	Вертикально-фрезерный станок DMU-60 monoBLOCK
030	Фрезерная с ЧПУ	Вертикально-фрезерный станок DMU-60 monoBLOCK
035	Слесарная	Слесарный верстак № 01-000-40
040	Контрольная	Контрольный стол № 01-000-28
045	Гальваническая	Специальная операция
050	Малярная	Специальная операция
055	Маркировочная	Слесарный верстак № 01-000-40
060	Контрольная	Контрольный стол № 01-000-008

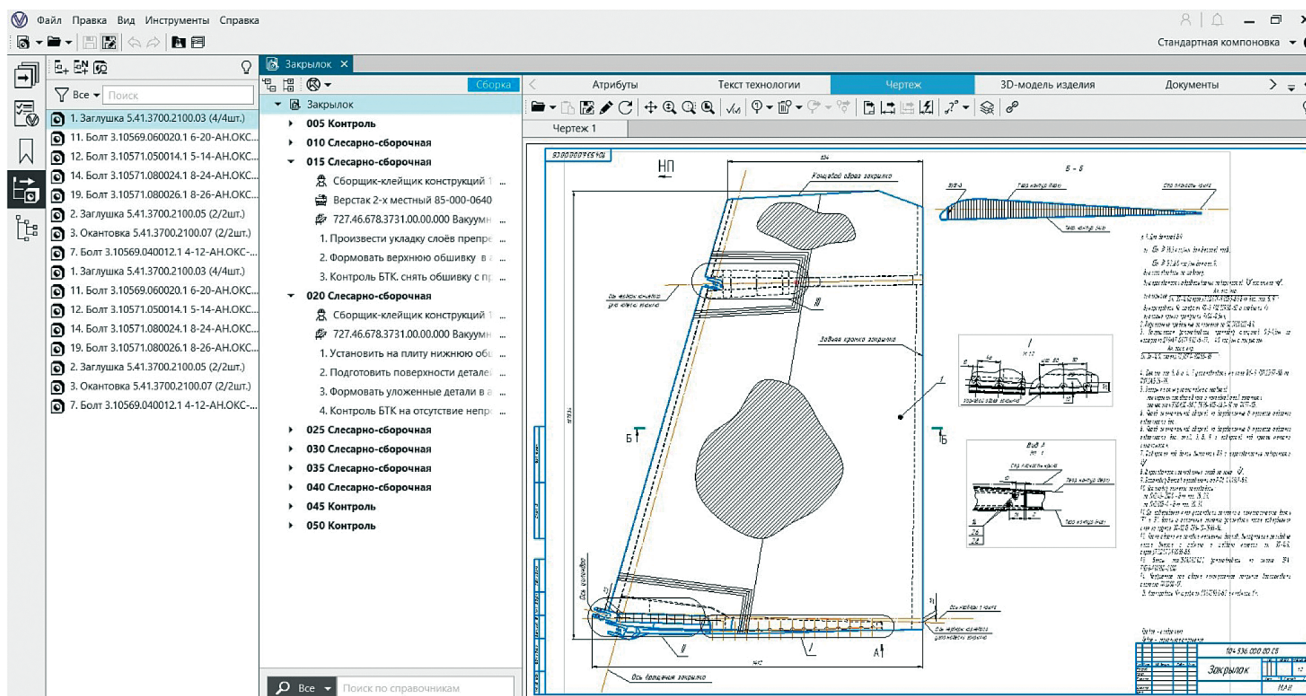


Рисунок 19. Проектирование технологического процесса сборки закрылка в САПР ТП «ВЕРТИКАЛЬ»

Ответственным и завершающим этапом технологического процесса являются операции контроля собранного агрегата. В рассмотренном в данной работе примере конструкция агрегата включает сотоблок из КМ. Образец этого сотоблока представлен на рис. 20.

Данный образец был исследован на томографе ВТ-600ХА (рис. 21) на наличие в своем составе структурных дефектов. Контроль структуры осуществлялся веерно-лучевым методом.

Представленные на рис. 22 томограммы с графиком распределения плотностей КМ по сечению образца показывают сильную и чрезмерную неравномерность распределения применяемого для фик-

сации сот пленочного клея по всем сечениям образца. При этом среднеквадратическое отклонение в распределении плотностей материала по сечению на томограмме СКО = 80,3%.

Представленные на томограмме (см. рис. 22) данные свидетельствуют о сильной нестабильности используемого технологического процесса формирования сотоблока путем автоклавного формирования этой конструкции и требуют либо существенной корректировки, либо полной замены технологического процесса.

Одним из важнейших этапов исследования поведения композиционных материалов являются их испытания при их нагружении реальными уров-



Рисунок 20. Образец сотоблока закрылка

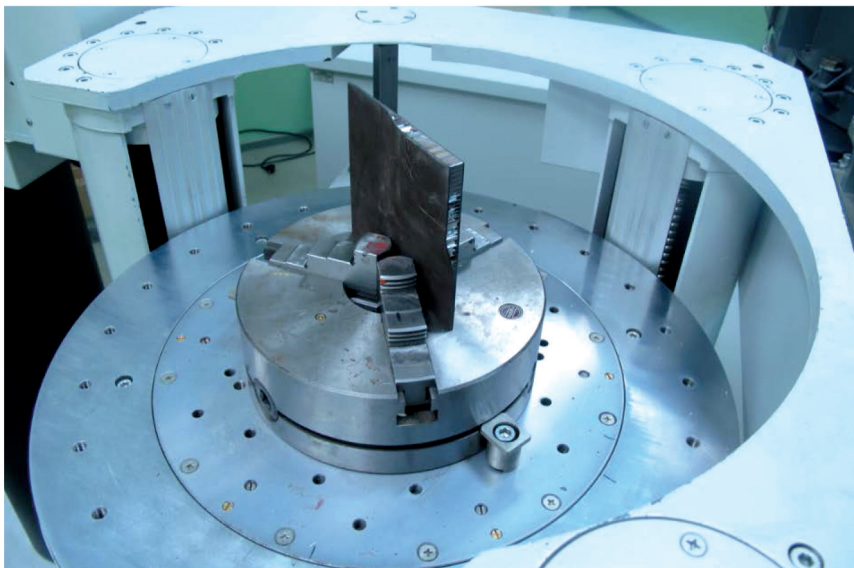


Рисунок 21. Исследуемый образец сотового блока на столе томографа ВТ-600ХА

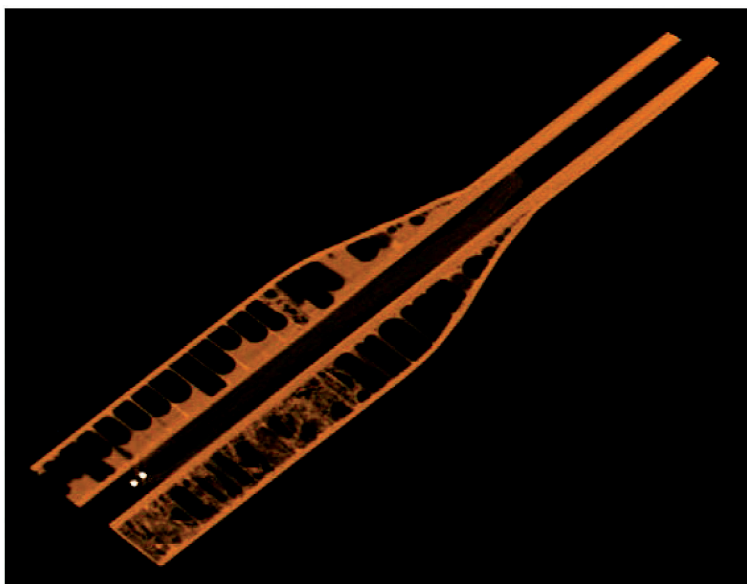
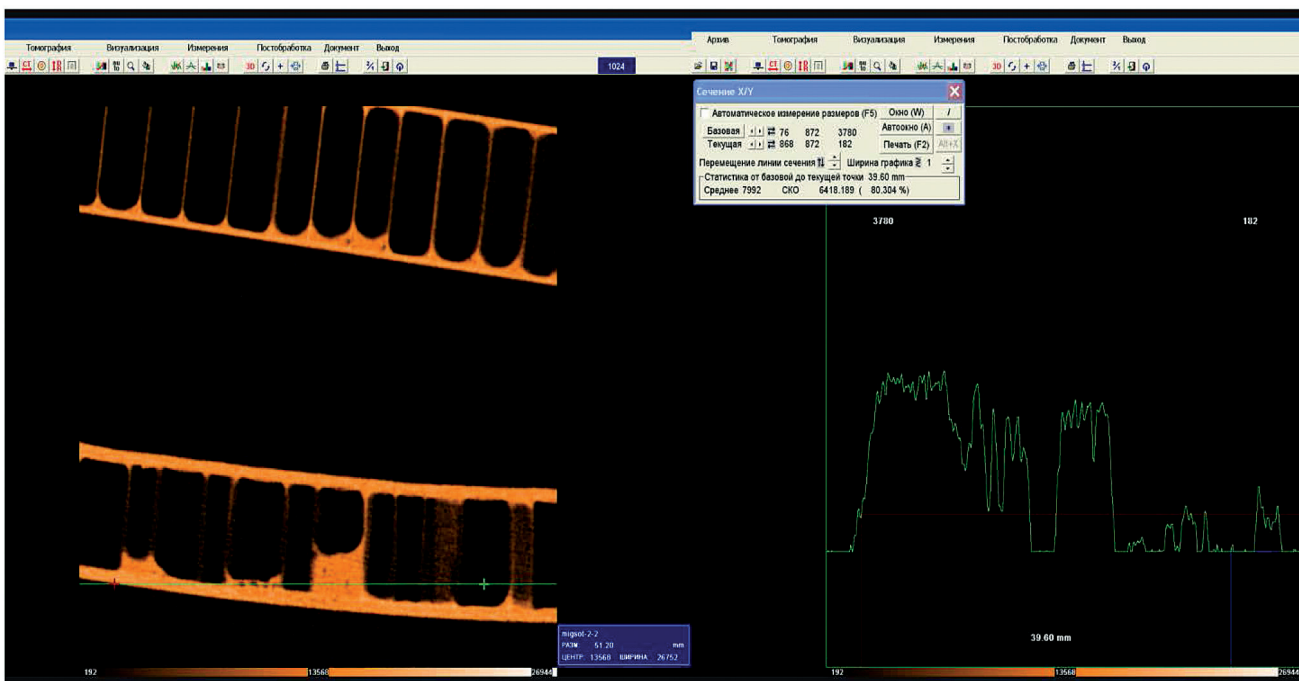


Рисунок 22. Результат томографического контроля образца сотового блока

academquality.ru





нями нагрузки в эксплуатации. Для исследований структуры слоистых полимерных композиционных материалов (ПКМ) при растяжении в настоящей работе были изготовлены плоские образцы на основе следующих материалов (рис. 23):

– углеродная лента ЛУП-0,1Б ГОСТ 28006-98 и связующего ЭДТ-10П ПИ 1.2.029-77 [14]. Для данного ПКМ проведены исследования его поведения при статическом нагружении и сделаны соответствующие выводы.

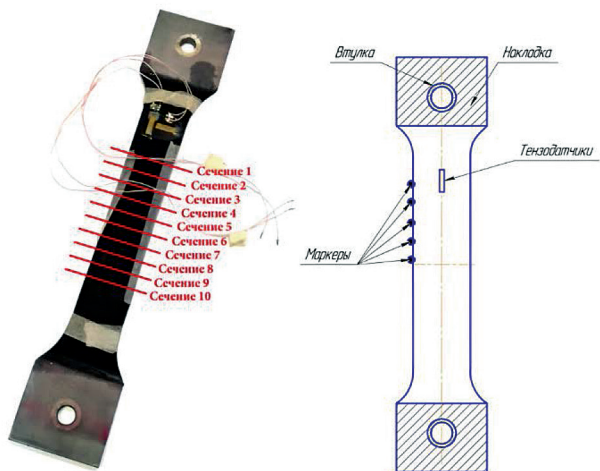


Рисунок 23. Исследуемые «на статику» образцы ПКМ

Для оценки структурных дефектов в ПКМ при силовом воздействии непосредственно под рабочей нагрузкой был спроектирован и изготовлен стенд (рис. 24), позволяющий прилагать к образцам одноосное растяжение непосредственно на платформе рентгеновского томографа [6, 14]. Конструктивно стенд состоит из трех частей – верхняя, средняя и нижняя. Верхняя часть состоит из двух шарнирных механизмов, датчика контроля нагрузки (датчик силы), верхнего захвата для крепления образца и блока передачи данных [14]. Образец нагружался статически согласно программе (рис. 25). Сканирование образцов осуществлялось веерно-лучевым способом [6] на томографе ВТ-600ХА по следующей схеме (рис. 26). Данные томографического контроля принято представлять в виде цифровых массивов, графиков и изображений, характеризующих информацию о пространственной структуре коэффициента ослабления рентгеновского излучения  $\mu(x, y)$  в выбранном сечении объекта контроля (ОК), где  $(x, y)$  – приведенная система координат структурных элементов рассматриваемого проекционного сечения. Распределение коэффициента  $\mu(x, y)$  для одно- и многофазных материалов пропорционально распределению плотности  $\rho(x, y)$  [6, 14, 15].

Таким образом, результаты восстановления томограммы дают картину распределения плотностей ПКМ в общем объеме ОК. Принимая элементный состав неповрежденного материала в качестве исходного, зоны инородных включений (пор, трещин, расслоений и иных дефектов структуры ПКМ) будут отображаться как имеющие характеристики прошедшего через ОК излучения, отличные от фиксированного [14–16]. Это позволяет на реконструкции томографического изображения обнаружить дефекты и повреждения, получить их геометрическое положение в объеме и зафиксировать их линейные размеры.

Однако для практических выводов по устойчивости характеристик материала важно иметь не сами параметры  $\mu(x, y)$ ,  $\rho(x, y)$ ,  $S(x, y)$ , а их изменение.

На рис. 27 представлены графики изменения исследуемых параметров в зависимости от уровня приложенной к образцу нагрузки.

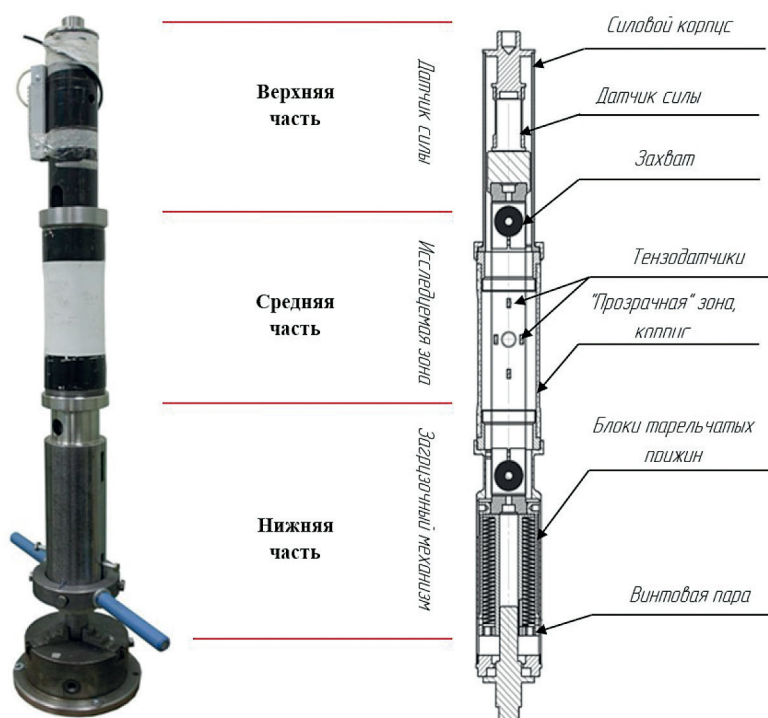


Рисунок 24. Стенд для исследования ПКМ при статическом нагружении



Рисунок 25. Программа нагружения испытываемых образцов

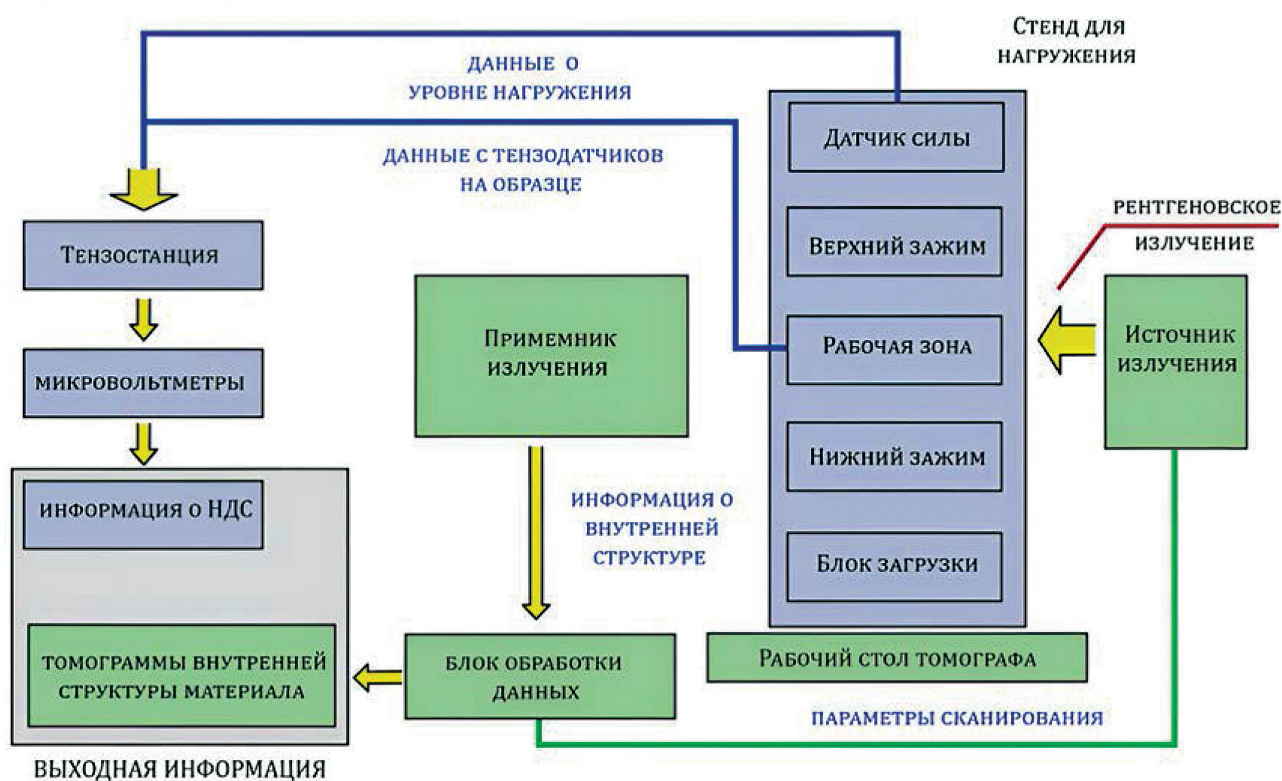


Рисунок 26. Схема сканирования экспериментальных образцов ПКМ

На основе экспериментально полученных графиков распределения контролируемых параметров для представленной технологии получения образцов ПКМ сделаны следующие выводы:

– общее поведение характеризует данный материал как склонный к хрупкому разрушению, без накопления макродефектов в структуре материала. В соответствии с этим наличие в структуре материала технологических микродефектов может не

вызывать разрушение образца при их развитии в процессе нагружения;

– изменение  $\Delta\rho$  указывает на незначительное изменение структурной плотности, что свидетельствует о перераспределении дефектов без их существенного накопления;

– изменение  $\Delta S$  свидетельствует о процессе перераспределения структуры, при этом разница между нагруженным и разгруженным состоянием по

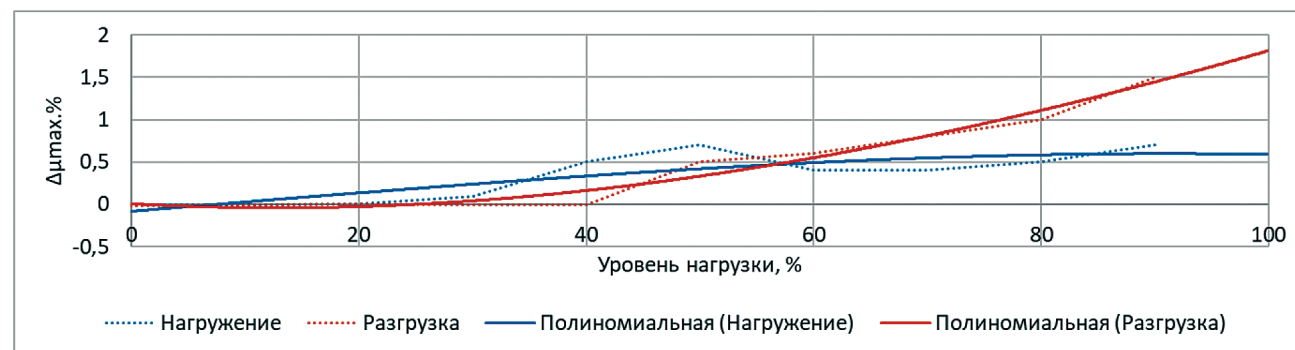
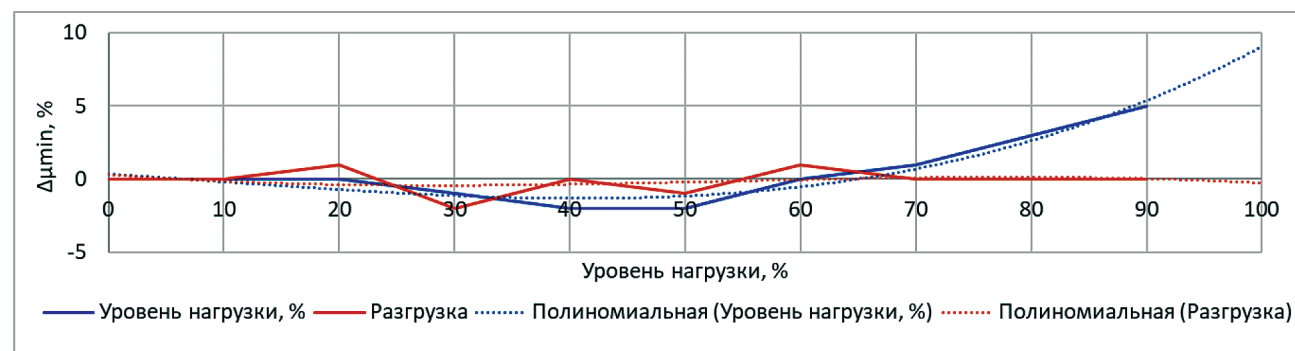
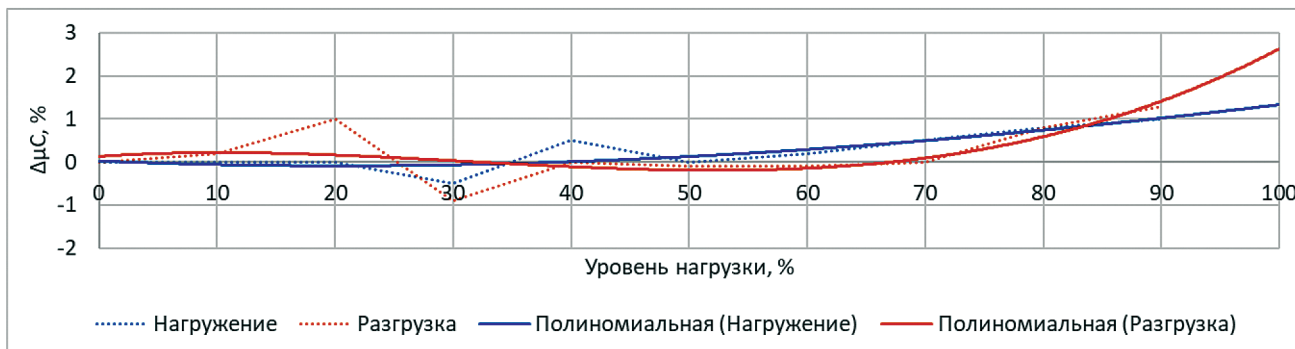
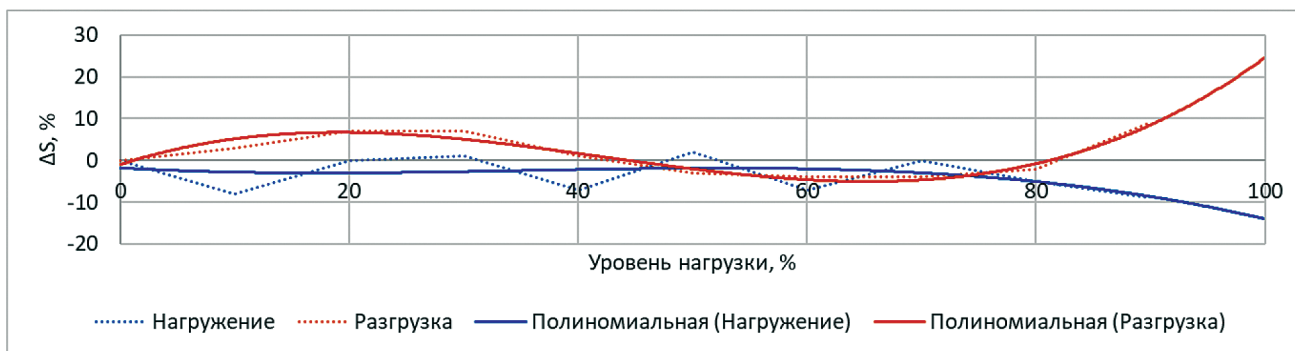


Рисунок 27. Изменения контролируемых параметров образцов ПКМ

данному критерию достаточно большое (до 6% при приложении нагрузки до 10% от разрушающей);

– общее изменение структуры по параметрам  $\Delta\mu_c$ ,  $\Delta\mu_{min}$ ,  $\Delta\mu_{max}$  меняется в незначительных пределах (1–2%), что достаточно близко к стати-

стической погрешности исследования, на основе чего можно сделать вывод об отсутствии процессов накопления повреждений в образце, а  $\Delta S$  может характеризовать только перераспределение отдельных дефектов.

На основе сформированных выводов можно сделать заключение о поведении конструкции с использованием данного конструкционного материала при статическом нагружении. Данное заключение может быть использовано в качестве рекомендации:

– при выборе конструктивно-технологических решений на начальных этапах проектирования, так как выходная информация позволяет оценить напряженное состояние, описать процессы накопления и развития повреждений, которые позволяют более точно планировать процедуру неразрушающего контроля в процессе изготовления и технического обслуживания при эксплуатации.

Таким образом, в настоящей работе рассмотрен ряд наиболее главных сфер применения цифровых (информационных) технологий и вопросы их эффективности, касающиеся многих аспектов жизненного цикла изделия, что показано на конкретных примерах и элементах конструкций самолетов.

#### Источники

1. ГОСТ Р 59853–2021. Автоматизированные системы. Термины и определения. М.: Изд-во Российского института стандартизации, 2021. 12 с.

2. Пекарш А.И., Тарасов Ю.М., Кривов Г.А. и др. Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолетов. М.: Аграф-пресс, 2006. 303 с.

3. Колганов И.М., Дубровский П.В., Архипов А.Н. Технологичность авиационных конструкций, пути повышения. Часть 1: Учеб. пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2003. 148 с.

4. Копылов Ю.Р. Основы компьютерных цифровых технологий машиностроения: Учеб. СПб: Лань, 2019. 496 с.

5. Климов В.Н., Козлов Д.М. Современные авиационные конструкционные сплавы: Учеб. пособие. Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. 40 с.

6. Бехметьев В.И., Бойцов Б.В., Семенченко Д.С. Исследование накопления дефектов в конструкциях из полимерных композиционных материалов при их статическом нагружении методом рентгеновской вычислительной томографии // Качество и жизнь. М.: Академия проблем качества. 2024. № 1-2, С. 100–114.

7. Ведмидь П.А., Сулинов А.В. Программирование обработки в NX CAM. М.: ДМК Пресс, 2014. С. 304. ISBN 978-5-97060-143-3

8. Ведмидь П.А. Основы NX CAM. М.: ДМК Пресс, 2012. 216 с. ISBN 978-5-94074-455-9

9. Данилов Ю., Артамонов И. Практическое использование NX. М.: ДМК Пресс, 2011. 332 с.

10. Bekhmetev V.I., Tereshonkov V.A., Lepeshkin V. VERTICAL CAD in the Design of Efficient Technologies for Making Aircraft Glider. Parts/”Lecture notes in electrical engineering”. Vol. 857. LNEE 2022, P. 290–299.

11. Бехметьев В.И., Бойцов Б.В., Васильев С.Л. Применение отечественного программно-технического комплекса в формировании структуры единого информационного пространства самолетостроительного предприятия // Качество и жизнь. М.: Академии проблем качества. 2023. № 1. С. 44–55.

12. Бехметьев В.И., Бойцов Б.В., Васильев С.Л. Возможности информационных технологий в процессах подготовки производства типовых элементов авиационных конструкций / Качество и жизнь». 2023. № 3. С. 55–64.

13. Бехметьев В.И. Автоматизация технологической подготовки производства авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов // Наука без границ. 2017. № 4(9) С. 10–19.

14. Васильев С.Л., Артемьев А.В., Бакулин В.Н., Юргенсон С.А. Контроль образцов методом вычислительной рентгеновской томографии под нагрузкой // Дефектоскопия. М.: Наука. 2016. № 5. С. 63–73.

15. Бакулин В.Н., Ларин А.А., Резниченко В.И. Методы повышения качества изготовления изделий из полимерных композиционных материалов на основе применения компьютерной томографии как метода неразрушающего контроля // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88. № 2. С. 534–538.

16. Ларин А.А., Бакулин В.Н., Резниченко В.И. Повышение точности определения физико-механических характеристик полимерных композиционных материалов за счет применения компьютерной рентгеновской томографии: Материалы XI Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: Сб. трудов. Казань: Издательство Казанского (Приволжского) федерального университета, 2015. С. 2247–2248.



## Sources

1. GOST R 59853–2021. Automated systems. Terms and definitions. Moscow: Publishing house of the Russian Institute of Standardization, 2021. 12 p.
2. Pekarsh AI, Tarasov Yu.M., Krivov GA, et al. Modern technologies for aggregate assembly production of aircraft. Moscow: Agraf-press, 2006. 303 p.
3. Kolganov IM, Dubrovsky PV, Arkhipov AN. Manufacturability of aircraft structures, ways of improvement. Part 1: Textbook. Ulyanovsk: UISTU, 2003. 148 p.
4. Kopylov Yu.R. Fundamentals of computer digital technologies in mechanical engineering: Textbook. SPb: Lan, 2019. 496 p.
5. Klimov V.N., Kozlov D.M. Modern aircraft structural alloys: Textbook. manual. Samara: Publishing house of Samara University, 2017. 40 p.
6. Bekhmetev V.I., Boytsov B.V., Semenchenko D.S. Study of defect accumulation in structures made of polymer composite materials under their static loading by the method of X-ray computed tomography // Quality and Life. Moscow: Academy of Quality Problems. 2024. No. 1-2, pp. 100–114.
7. Vedmid P.A., Sulinov A.V. Programming processing in NX CAM. Moscow: DMK Press, 2014. p. 304. ISBN 978-5-97060-143-3
8. Vedmid P.A. Basics of NX CAM. M.: DMK Press, 2012. 216 p. ISBN 978-5-94074-455-9
9. Danilov Yu., Artamonov I. Practical use of NX. M.: DMK Press, 2011. 332 p.
10. Bekhmeteyev V.I., Tereshonkov V.A., Lepeshkin V. VERTICAL CAD in the Design of Efficient Technologies for Making Aircraft Glider. Parts/"Lecture notes in electrical engineering". Vol. 857. LNEE 2022, P. 290–299.
11. Bekhmeteyev V.I., Boytsov B.V., Vasiliev S.L. Application of domestic software and hardware complex in forming the structure of a single information space of an aircraft manufacturing enterprise // Quality and Life. M.: Academy of Quality Problems. 2023. No. 1. P. 44–55.
12. Bekhmetev V.I., Boytsov B.V., Vasiliev S.L. Information technology capabilities in the processes of preparation for production of standard elements of aircraft structures / Quality and Life. 2023. No. 3. P. 55–64.
13. Bekhmetev V.I. Automation of technological preparation for the production of aircraft structures from polymer composite materials // Science without Borders. 2017. No. 4(9) P. 10–19.
14. Vasiliev S.L., Artemyev A.V., Bakulin V.N., Yurgenson S.A. Testing samples by the method of computational X-ray tomography under load // Defectoscopy. Moscow: Science. 2016. No. 5. P. 63–73.
15. Bakulin V.N., Larin A.A., Reznichenko V.I. Methods for improving the manufacturing quality of polymer composite products using computed tomography as a non-destructive testing method // Engineering Physics Journal. 2015. Vol. 88. No. 2. Pp. 534–538.
16. Larin A.A., Bakulin V.N., Reznichenko V.I. Improving the accuracy of determining the physical and mechanical characteristics of polymer composite materials through the use of computed X-ray tomography: Proceedings of the XI All-Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics: Collection of Works. Kazan: Publishing House of Kazan (Volga Region) Federal University, 2015. Pp. 2247–2248.

# Повышение качества и эффективности совместного применения вертолетов и беспилотных летательных аппаратов при патрулировании лесных массивов на предмет выявления очагов пожаров и их ликвидации

## Б.В. Бойцов

д-р техн. наук, профессор,  
Заслуженный деятель науки РФ; Москва

## А.И. Ресинец

канд. воен. наук, профессор  
Академии военных наук; Москва  
e-mail: mx5500@mail.ru

## А.А. Ресинец

Начальник отдела  
АО «НЦВ Миль и Камов»; г. Люберцы

## Г.А. Суворов

студент группы М10-605С-20 кафедры  
«Проектирование вертолетов»  
Московского авиационного института  
(НИУ); Москва

**Аннотация.** Статья посвящена повышению качества и эффективности использования беспилотных летательных аппаратов, запускаемых с борта вертолета, для повышения эффективности патрулирования и раннего обнаружения лесных пожаров. Предложена архитектура комплексной системы на базе вертолета, выступающего в роли воздушного носителя, командного пункта и сервисной базы для группы беспилотных летательных аппаратов с тепловизорами. Рассмотрены три сценария применения системы, проанализированы их преимущества, риски и технические ограничения. Описаны ключевые аспекты технической реализации: выбор платформы, модификации конструкции вертолета, состав экипажа и система запуска/посадки дронов.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, БПЛА, вертолет, дрон, тепловизор, лесной пожар, пожар.

**Summary.** The article is devoted to improving the quality and efficiency of using unmanned aerial vehicles (UAVs) launched from a helicopter to increase the effectiveness of patrolling and early detection of forest fires. The architecture of an integrated system based on a helicopter acting as an air carrier, command post and service base for a group of unmanned aerial vehicles with thermal imagers is proposed. Three scenarios of the system application are considered, their advantages, risks and technical limitations are analyzed. The key aspects of the technical implementation are described: the choice of a platform, modifications to the helicopter design, the composition of the crew and the drone launch/landing system.

**Keywords:** UAVs (Unmanned aerial vehicles), helicopter, drone, thermal imaging camera, forest fire, fire.

## Введение

Лесные пожары – это экологическая и социально-экономическая угроза, масштабы которой усугубляются изменением климата. В 2021 г. на территории России зафиксировано 390 411 пожаров, приведших к гибели 8416 человек и травмам 8403 человек [1]. В 2019 г. за май и июнь лесными пожарами уничтожено более 17 млн га сибирских и дальневосточных лесов.

В настоящее время (по состоянию на 28 августа 2025 г.) только на территории Якутии обнаружено 30 очагов пожаров на площади 13,5 тыс. км<sup>2</sup>.

Данные, приведенные на рис. 1, за последние 5 лет показывают, что с 2022 г. сохраняется тенденция к ежегодному увеличению площадей пожаров в РФ,



Рисунок 1. Площади лесных пожаров в РФ, тыс. га

Примечания

\* Данные за 2022 г. отсутствуют в связи с уходом иностранных компаний из РФ.

\*\* Данные за 2025 г. получены на 31 марта.

Источники: 2020 г. – [2], 2021 г. – [3], 2023 г. – [4], 2024 г. – [5], 2025 г. – [6], ЕМИСС – [7]

по данным ЕМИСС [7]. В то же время иностранные источники приводят данные, превосходящие официальную статистику в 1,6 раза в 2021 г. [3] и в 2,8 раза в 2020 г. [2], а по данным 2023 г. превышение официальной статистики увеличено в 5,5 раза [4]. В то же время данные за 2024 г., полученные из иностранных источников [5], датированы июлем 2024 г., когда сезон пожаров в РФ был в самом разгаре, что приводит к тому, что данные за 2024 г. сильно занижены и реальная площадь пожаров может быть больше. Данные, полученные на момент марта 2025 г., показывают, что официальная и иностранная статистики отличаются в 110 раз [6]. Исходя из всех вышеперечисленных факторов можно сделать однозначный вывод о том, что лесные пожары в РФ ежегодно уничтожают колоссальные объемы лесных массивов, что приводит к негативным последствиям для экономики, экологии и несет угрозу жизни и здоровью людей, именно поэтому необходима система раннего обнаружения пожара, что позволит ликвидировать малые очаги горения, не допуская их быстрого распространения и охвата больших площадей лесных массивов.

Наземное патрулирование охватывает лишь 7,69% земель лесного фонда РФ (88,1 млн га) из-за требования 3-часовой доступности для пожарных бригад. На авиатрулирование приходится 52,12% территорий (597 млн га). Оставшиеся 40,18% (460,2 млн га) приходятся на космический мониторинг, не способный обеспечить оперативность и высокую детализацию полученных снимков, что в свою оче-

редь исключает раннее обнаружение очагов пожара [8].

Согласно требованиям инструкции по авиационной охране лесов, патрулирование вертолетом осуществляется на высоте 600–800 м при нормальной видимости [9]. При полете на высоте 600 м зона визуального осмотра составляет 378 км<sup>2</sup>/ч (ширина осматриваемой полосы – 2,1 км, крейсерская скорость вертолета – 180 км/ч).

Современные БПЛА мультикоптерного типа ограничены дальностью полета (5–15 км), наличием вычислительных комплексов, позволяющих проводить автоматическую обработку снимков, что приводит к невозможности оперативно развертывания в удаленных районах. Одним из распространенных БПЛА квадрокоптерного типа для патрулирования лесных массивов является *DJI Matrice 30T* (рис. 2), оснащенный тепловизором, способным с высоты 600 м осматривать площадь в 27,72 км<sup>2</sup> за 42 мин на одном заряде батареи [10]. Разрешение тепловизора составляет 1280 × 1024 пикселя, один пиксель соответствует 0,55 м поверхности, в результате чего на 1 м<sup>2</sup> приходится 3,3 пикселя, что гарантирует обнаружение пожара площадью до 1 м<sup>2</sup>. В то же время малый запас батареи не позволяет использовать дрон на значительном удалении от инфраструктуры, способной проводить автоматический анализ снимков.

Характеристики БПЛА *DJI Matrice 30T* приведены в табл. 1.



Рисунок 2. БПЛА квадрокоптерного типа для патрулирования лесных массивов DJI Matrice 30T

Таблица 1. Характеристики БПЛА DJI Matrice 30T

Характеристика	Значение
Размеры в разложенном виде, без пропеллеров (Д × Ш × В), мм	470 × 585 × 215
Максимальный взлетный вес, кг	4,069
Рабочие частоты, ГГц	2,4000–2,4835; 5,725–5,850
Максимальная горизонтальная скорость, м/с (км/ч)	23 (82,8)
Максимальная высота полета, м	До 5000
Максимальное время полета, мин	До 45
ГНСС	GPS, Galileo, BeiDou, ГЛОНАСС
Максимальный размер фотографий, мм	8000 × 6000
4000 × 3000	
Угол обзора тепловизора, град	61
Погрешность тепловизора, град	±2
Разрешение снимков тепловизора, мм	640 × 512 1280 × 1024
Частота снимков тепловизора, Гц	30 30 снимков в секунду

### Описание системы патрулирования

Размещение дронов на вертолете типа Ка-226 с возможностью воздушного запуска позволяет уве-

личить зону патрулирования при необходимости определения границ пожара и исключает необходимость снижения для вертолета на высоты 100 м для детального осмотра места горения, что повышает безопасность полетов.

### Теоретическая архитектура системы

Система может состоять из:

- вертолета-носителя, одновременно выполняющего роль командного пункта;
- трех и более квадрокоптеров типа *DJI Matrice 30T*, оснащенных тепловизорами и системой ГЛОНАСС (далее – БПЛА);
- системы запуска/посадки для БПЛА, позволяющей обеспечить безопасный воздушный старт на заданной высоте полета, избегая негативного эффекта от несущих винтов вертолета-носителя;
- системы связи, обеспечивающей многоканальное управление БПЛА, способной безотказно работать на протяжении всего полета БПЛА, вне зависимости от дальности и количества БПЛА [11]. Система связи и управления должна предусматривать возможность использования директивного управления оператором каждого БПЛА для недопущения потери БПЛА из-за столкновения с землей или объектами;
- бортового вычислительного комплекса (БВК), способного в режиме реального времени обрабатывать полученные снимки с тепловизоров БПЛА, выявляя очаги и границы пожара при помощи искусственного интеллекта (ИИ) [12];
- систем технического обслуживания БПЛА, обеспечивающей зарядку и замену батарей для более оперативного развертывания БПЛА;
- единой командной системы управления, содержащей данные об обнаруженных и ликвидированных возгораниях, количестве и местоположении задействованной в разведке и ликвидации очагов техники и людей [13].



## Варианты применения БПЛА

*Применение БПЛА, исключающее необходимость его снижения (рис. 3).*

Вертолет производит патрулирование заданного района, а при обнаружении очага возгорания или задымления выпускаются от 1 до 3 БПЛА с заранее заданной программой полета для анализа ситуации с использованием тепловизоров на предельно малой высоте 50 м [14], обеспечивающей детализацию снимков тепловизора до 10 см, с одновременной привязкой координат при помощи системы ГЛОНАСС и передачи их на вертолет-носитель, который дежурит на безопасном расстоянии и высоте от источника горения, позволяющего поддерживать радио- и визуальный контакт с БПЛА. После детальной съемки очага возгорания БПЛА возвращаются на вертолет-носитель для подзарядки батарей, вертолет, приняв на борт все БПЛА, продолжает облет территории, при необходимости, производя остановки для выпуска БПЛА и обследования других очагов горения.

При данном сценарии вертолет выступает в качестве ангара для БПЛА, обеспечивающего их функционирование (замена батарей, зарядка, при необходимости – модульный ремонт), в качестве поста управления БПЛА, обеспечивая стабильную визуальную и радиотехническую связь оператора с БПЛА, а также в качестве ретранслятора информации для передачи информации, полученной от

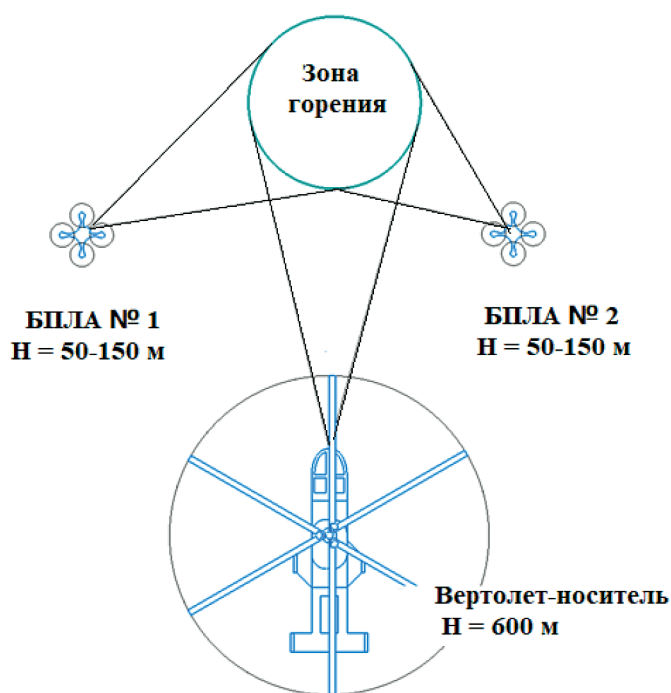


Рисунок 3. Применение БПЛА, исключающее необходимость его снижения

БПЛА в общую систему при помощи дальней радиосвязи. Все вышеперечисленное приводит к необходимости внесения существенных изменений в конструкцию вертолета-носителя.

Преимущества данного сценария:

- исключение необходимости снижения, что обеспечивает безопасность полета для экипажа и вертолета-носителя;

- использование сразу нескольких дронов для осмотра территории с заранее заданной программой полета позволяет быстро осмотреть и зафиксировать область горения. Мгновенная привязка точек горения к координатам позволяет быстрее наносить границы горения на карты;

- возможность осмотра сразу нескольких недалеко расположенных очагов горения с использованием всего одного вертолета-носителя.

Недостатки данного сценария:

- высокий риск потери визуальной связи с БПЛА из-за задымления и, в связи с этим, невозможности контролирования его работы;

- опасность возвращения БПЛА на борт вертолета-носителя из-за нисходящего потока от несущего винта, восходящего потока от горящего леса и их взаимодействия с учетом ветра;

- необходимость частого старта/посадки БПЛА требует одновременного использования нескольких лебедок с магнитными фиксаторами и возможностью зарядки;

- необходимость обеспечения электроэнергией всех БПЛА, что приводит к увеличению количества и (или) массы электрогенераторов, установленных на борту вертолета, и к увеличению отбора мощности от двигателя и увеличению общей массы вертолета [15].

*Использование БПЛА для патрулирования местности (рис. 4).*

Вертолет, оснащенный только бортовым вычислительным комплексом и оборудованием для подъема/спуска БПЛА, может комплектоваться набором из 10 БПЛА для патрулирования местности и обнаружения источников горения.

При использовании БПЛА типа DJI Matrice 30T, на высоте 600 м, за один проход гарантированно осматривается при помощи тепловизора полоса шириной 700 м, при использовании сразу 10 БПЛА с заданной программой полета за один проход (40 мин) покрывается территория в 396 км<sup>2</sup>, что сопоставимо с территорией, осматриваемой одним вертолетом за 1 ч полета. При таком

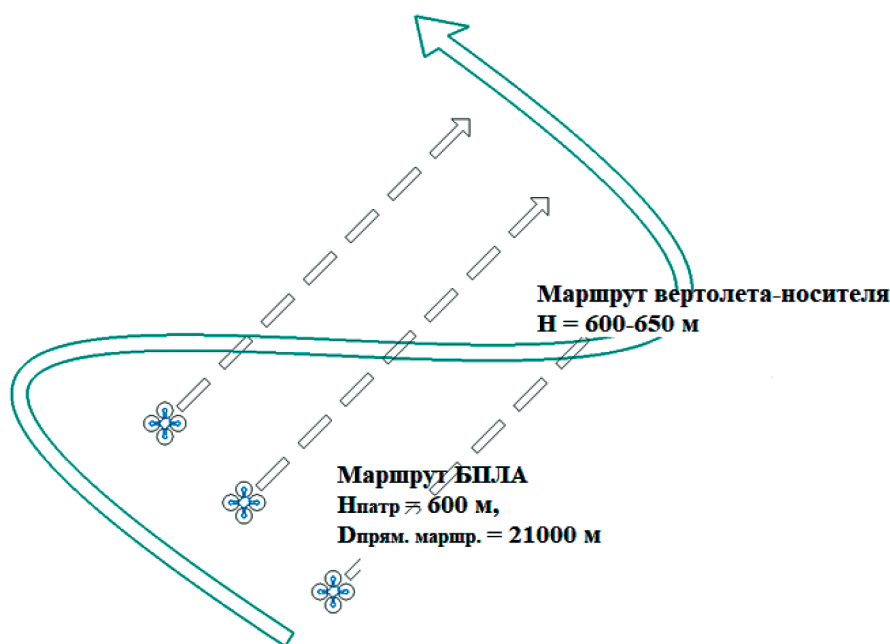


Рисунок 4. Использование БПЛА для патрулирования местности

маршруте на карту с помощью БПЛА наносятся координаты всех обнаруженных очагов возгорания. Вертолет-носитель, выполняя полет с постоянной скоростью и курсом, выпускает БПЛА, которые летят прямолинейно, каждый по своему полетному заданию. После выпуска последнего БПЛА вертолет разворачивается и пересекает исследуемую зону по диагонали, к месту окончания маршрута первого выпущенного БПЛА, попутно визуально контролируя наличие очагов возгорания. Из-за того, что БПЛА поднимаются на вертолет-носитель последовательно, по мере выработки заряда, это позволяет использовать только одну лебедку на вертолете-носителе.

Преимущества данного сценария:

- охват территории с использованием тепловизоров сопоставим с визуальным осмотром территории. Тепловизоры с высоты 600 м способны гарантированно распознавать очаги горения площадью от 1 м<sup>2</sup>;

- при необходимости система легко масштабируется. При этом зона покрытия территории возрастает линейно;

- при стоимости одного БПЛА типа *DJI Matrice 30T* 0,5 млн руб., комплект из 10 дронов будет иметь приблизительную стоимость в 5 млн руб., что даже при цене бортового вычислительного комплекса и системы подъема/спуска БПЛА несопоставимо с ценой вертолета, способного выполнять схожий объем работ, в связи с чем использование вертолета-носителя и 10 дронов оказывается более выгодным, чем одновременное использование двух вертолетов.

- при использовании более тяжелого вертолета-носителя (тип Ми-8 или Ка-32) есть возможность использования двух лебедок одновременно, что позволит одновременно поднимать на борт БПЛА для замены батареи и выпускать следующий, что существенно повысит площадь осмотра и сканирования территории.

Недостатки данного сценария:

- высокий риск потери визуальной связи с БПЛА из-за задымления и в связи с этим невозможности контроля его работы;

- опасность возвращения БПЛА на борт вертолета-носителя из-за нисходящего потока от несущего винта;

- сложность коммуникации и одновременной работы 10 каналов связи, передающих информацию, что приводит к необходимости использования более сложных и многоканальных систем радиосвязи;

- скорость патрулирования очень сильно зависит от погодных условий;

- использование вертолета-носителя как передвижного командно-логистического центра (рис. 5).

Вертолет-носитель, оснащенный многоканальной системой связи и всем необходимым оборудованием для запуска и приема БПЛА, находится на земле, в то время как БПЛА выполняют разведку или корректировку работы пожарных команд. Вертолет может использоваться как оперативный штаб.

Преимущества данного сценария:

- возможность использования БПЛА в любом месте, без подготовки необходимой инфраструктуры;

- при необходимости вертолет может быть легко перебазирован в регион, где необходим мониторинг пожаров при помощи БПЛА, но удаленность от населенных пунктов не позволяет одновременно развернуть необходимую группировку БПЛА;

- при использовании более тяжелого вертолета-носителя типа Ми-8 или Ка-32 есть возможность переброски не только БПЛА, но и пожарных расчетов в заданный район, а при использовании в качестве вертолета-носителя Ми-26Т, также есть возможность переброски техники или запасов огнетушащей жидкости.



Рисунок 5. Использование вертолета-носителя в качестве передвижного командно-логистического центра

Недостатки данного сценария:

- высокий риск потери визуальной связи с БПЛА из-за задымления или потеря радиосвязи из-за густоты лесных насаждений и, как следствие, необходимость использования дополнительной антенны;

- необходимость подготовки площадки для посадки вертолета-носителя;

- риск потери вертолета-носителя из-за быстрого распространения пожара в сторону стоянки вертолета.

Исходя из вышеперечисленных вариантов работы наиболее эффективным является сценарий № 1 (БПЛА для исключения необходимости снижения), при котором БПЛА используется для обеспечения безопасности вертолета-носителя. Данные сравнительного анализа вариантов применения приведены в табл. 2.

Таблица 2. Данные сравнительного анализа вариантов применения БПЛА

Параметр	Сценарий № 1 <sup>1</sup>	Сценарий № 2 <sup>2</sup>	Сценарий № 3
Количество БПЛА на борту, шт.	До 5	10/20	10/20
Количество БПЛА, одновременно находящихся в воздухе, шт.	1–3	10/20	До 10/ до 20

Параметр	Сценарий № 1 <sup>1</sup>	Сценарий № 2 <sup>2</sup>	Сценарий № 3
Количество операторов БПЛА на борту	1	1/2–3	– <sup>3</sup>
Отношение количества операторов к количеству одновременно используемых БПЛА	0,33–1	0,1/0,1–0,15	0,1–1
Необходимое количество для БПЛА типа DJI Matrice 30T <sup>4</sup> , шт. зарядных станций: комплектов батарей:	3 6 <sup>5</sup>	10/20 20/40	До 10/20 До 20/40
Количество техников на борту	1	1/2–3	1/2–3
Отношение количества техников к количеству БПЛА	0,33–1	0,1/0,1–0,15	0,1/0,1–0,15
Необходимое количество лебедок для подъема/спуска дронов, шт.	1–2–3	1–2/2–4	0/0

<sup>1</sup> Для вертолета Ка-226Т («Ансат»).

<sup>2</sup> Для сценария № 2 и № 3 рассмотрены варианты для двух типов вертолетов, с различной взлетной массой: Ка-226Т («Ансат») / Ми-8 (Ка-32).

<sup>3</sup> При использовании вертолета на земле в качестве передвижного командного пункта есть возможность использования наземных групп операторов для БПЛА, что ограничивает количество операторов только количеством БПЛА, поднятых в воздух.

<sup>4</sup> Из расчета, что одного комплекта батарей хватает на 42 мин полета, зарядка комплекта батарей происходит в течение 90 мин.

<sup>5</sup> При условии непрерывного использования всех трех БПЛА.

## Технические аспекты реализации

### Выбор платформы

Исходя из требований экономичности целесообразно в качестве вертолета-носителя выбирать серийный вертолет с взлетной массой не более 5 т.

В авиапарке РФ есть два типа современных вертолетов взлетной массой до 5 т: Ка-226Т и «Ансат» [16], сравнение ЛТХ приведено в табл. 3, для сопоставления данных в таблице приведены характеристики вертолетов Ка-32 и Ми-8 (рис. 6).

Таблица 3. Сравнение летно-технических характеристик

Параметр	Ка-226Т	«Ансат»	Ка-32	Ми-8
Взлетная масса, кг	3600	3600	12 700	6990
Крейсерская скорость, км/ч	250	275	240	225
Грузоподъемность, кг	До 1350	1300	До 5000	До 4000
Схема НВ	Соосная	Классическая	Соосная	Классическая

Анализ табл. 3 показывает, что оба вертолета (Ка-226т и «Ансат») обладают практически одинаковыми характеристиками по скорости и грузоподъемности. Наиболее предпочтительным в данном случае является вертолет соосной схемы из-за

аэродинамической симметрии и отсутствия рулевого винта. Модульная конструкция Ка-226 позволяет вносить изменения исключительно в модуль (рис. 7), кардинально не меня основную конструкцию вертолета.

Также есть возможность использовать люк внешней подвески, задние створки для запуска БПЛА или специальную платформу. Данная схема позволяет использовать корпус вертолета в качестве защиты от нисходящего потока НВ, это позволит разместить 2 БПЛА на внешней подвеске, а остальные разместить в корпусе, что упростит их обслуживание и транспортировку.

### Изменение количества членов экипажа

Для реализации первого варианта использования БПЛА в составе экипажа должны находиться:

- пилот – обеспечивает управление вертолетом-носителем и визуальное обнаружение очагов возгорания;
- оператор БПЛА – отвечает за полет, маршрут и зоны облета БПЛА, помогает пилоту в обнаружении очагов возгорания, управляет БПЛА в нестандартных ситуациях;

техник – обеспечивает бесперебойную работу системы связи с БПЛА, запуск и поднятие на борт БПЛА, их зарядку и замену батарей.

В связи с большим объемом оборудования и необходимого пространства для работы целесообразно разместить оператора в кабине вертолета, рядом с пилотом, что позволит освободить место для аппаратуры в съемном модуле.

При использовании вертолетов типа Ми-8 или Ка-32 количество техников и операторов может быть увеличено кратно увеличению количества БПЛА, перевозимых вертолетом.

Реализация системы подъема и запуска БПЛА

При размещении двух кабелей-тросов на внешней подвеске вертолета с магнитными захватами для БПЛА упрощается система запуска, представляющая собой лебедку, подтягивающую трос вместе с БПЛА под фюзеляж вертолета, одновременно обеспечивающую его зарядку. Спуск происходит в обратном порядке: лебедка опускает БПЛА на безопасное расстояние и отцепляет его только при работающих винтах БПЛА, обеспечивающих его висение. Тем не менее существует опасность раскачивания и перехлестывания двух тросов, в связи с чем подъем на борт одновременно трех БПЛА невозможен и опасен. При использовании от трех и более БПЛА сначала на лебедках поднимаются БПЛА, размещенные на внешней подвеске, а после их фиксации начинается подъем БПЛА, размещенных в



Ка-226



«Ансат»



Ка-32



Ми-8

Рисунок 6. Вертолеты взлетной массой до 5 т

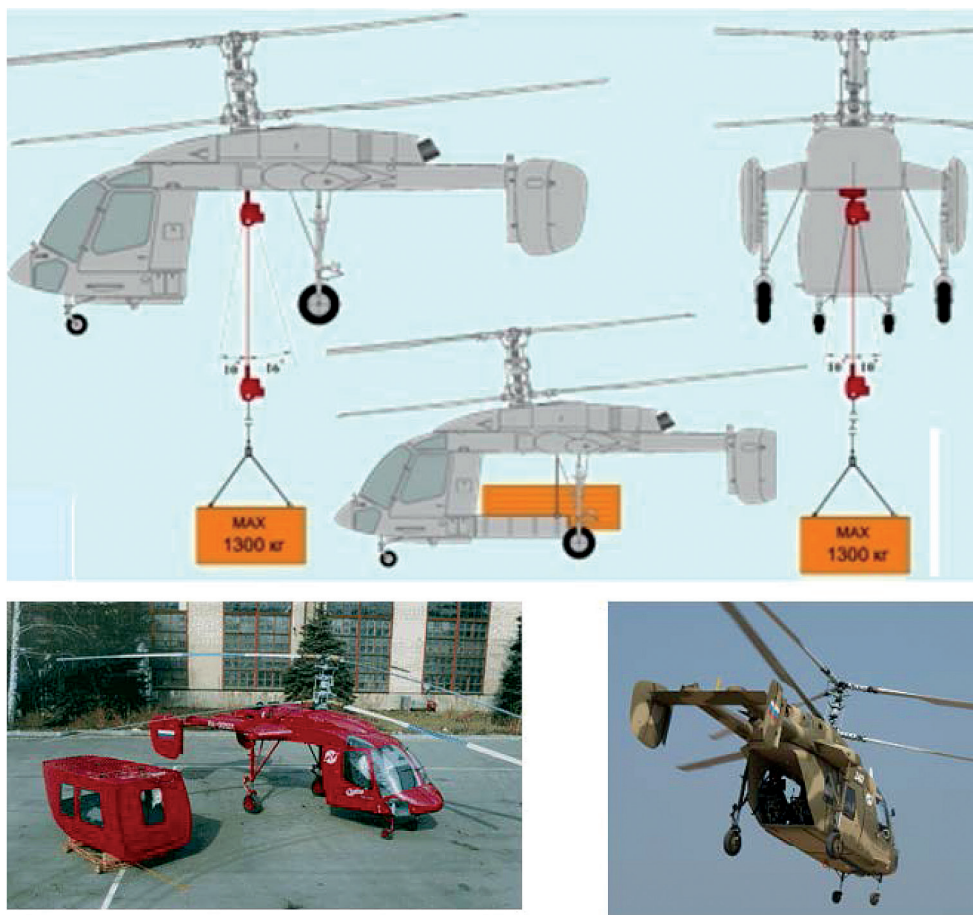


Рисунок 7. Модульная конструкция Ка-226

корпусе. Исходя из скорости зарядки БПЛА система должна включать обязательную ротацию, когда находившиеся ранее на внешней подвеске БПЛА после очередного вылета будут направлены на основную лебедку для замены батареи на полностью заряженную, а на внешнюю подвеску будет отведен БПЛА, имеющий наибольший заряд батареи.

Изменения, вносимые в конструкцию вертолета-носителя

Для обеспечения безопасности полета вертолет-носитель должен комплектоваться:

- системой фильтрации воздуха для экипажа или иметь на борту запас кислорода на случай падения в зоны задымления;
- системой герметизации кабины и салона с размещением дронов и технического персонала;
- огнетушителями, предназначенными для тушения пожара категории Е, для предотвращения возгорания оборудования, обеспечивающего работу БПЛА;
- улучшенной системой охлаждения отсека, в котором будет располагаться бортовой вычислительный комплекс;
- улучшенной системой связи, позволяющей поддерживать связь со всеми БПЛА, находящимися в воздухе или на внешней подвеске.

### Источники

1. Волкова К. Беспилотники приходят на помощь пожарным и спасателям [Электронный ресурс]. Skymec. 2022. 11 июля. URL: <https://skymec.ru/blog/drone-use-cases/bezopasnost/bespilotniki-pomoshch-pozharnym-spatatelyam/>
2. Данные Greenpeace за апрель 2021 г.
3. Siberia's wildfires are bigger than all the world's other blazes combined // The Washington post. 2021. August 8.
4. In Photos: Russia's Western Siberian, Urals Regions Gripped by Wildfires [Электронный ресурс]. Moscow Times. URL: [www.themoscowtimes.com](http://www.themoscowtimes.com)
5. Отчет Earth Touches Everyone от 18 июля 2024.
6. Площади лесных пожаров в России оказались в 2,5 раза выше показателей 2024 г. // Forbes. 2025. May 15.
7. Площадь лесных пожаров на землях лесного фонда [Электронный ресурс]. ЕМИСС. URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/38496>
8. Приказ от 6 марта 2025 г. № 127 «Об установлении лесопожарного зонирования земель лесного фонда» [Электронный ресурс]. Гарант. URL: <https://base.garant.ru/412110168/>
9. Инструкция по авиационной охране лесов (п. 4.1.19) [Электронный ресурс]. Гарант. URL: <https://base.garant.ru/2156231/>

10. Квадрокоптер DJI Matrice 30T [Электронный ресурс]. DJI-MARKET.RU. URL: <https://dji-market.ru/dji-matrice/tproduct/650517834-959751537491-kvadrokopter-dji-matrice-30t> ;

11. Нестеренко А.Г. Анализ условий функционирования сетей многоканальной радиосвязи и проблемы оптимизации их функциональных характеристик» [Электронный ресурс]. Cyberleninka. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-usloviy-funktsionirovaniya-setey-mnogokanalnoy-radiosvyazi-i-problemy-optimizatsii-funktsionalnyh-harakteristik/viewer>

12. Дамдынчап Ч.А., Шарапов А.А. Применение нейронных сетей для распознавания дыма и пожара на изображениях [Электронный ресурс]. Cyberleninka. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-neyronnyh-setey-dlya-raspoznavaniya-dyma-i-pozhara-na-izobrazheniyah/viewer>

13. Разработка методики оперативного мониторинга природных ЧС с использованием беспилотных авиационных систем в целях информационной

поддержки оперативных штабов по тушению крупных лесных пожаров: Отчет о НИР (заключительный) [Электронный ресурс]. Рук. М.О. Баканов; исполн. О.Н. Белорожев [и др.]. Иваново: ФГБОУ ВО ИПСА ГПС МЧС России, 2020. 90 с. URL: <https://bibliomchs37.ru/book/5644>

14. Методические рекомендации по применению вертолетов при тушении пожаров (утверждены статс-секретарем – заместителем министра МЧС России В.А. Пучковым от 16 сентября 2011 г.) [Электронный ресурс]. FIREman. URL: [https://fireman.club/literature/metodicheskie-rekomendacii-po-primeniyu-vertoletov-pri-tushenii-pozharov-utverzhdenny-stats-sekretarem-zamestitelem-ministra-rossijskoj-federacii-po-delam-grazhdanskoj-oborony-chrezvychajnym-si/](https://fireman.club/literature/metodicheskie-rekomendacii-po-primeniyu-vertoletov-pri-tushenii-pozharov-utverzhdenny-stats-sekretarem-zamestitelem-ministra-mchs-rossijskoj-federacii-po-delam-grazhdanskoj-oborony-chrezvychajnym-si/)

15. Писаренко В.Н. «Электрооборудование вертолета МИ-8, МИ-8Т, МИ-8МТВ, МИ-8АМТ»: Конспект лекций.

16. Руководство по эксплуатации вертолетов Ка-226Т и «Ансат».

## References

1. Volkova K. «Drones come to the aid of firefighters and rescuers» (<https://skymec.ru/blog/drone-use-cases/bezopasnost/bespilotniki-pomoshch-pozharnym-spasatelyam/>);
2. Greenpeace data for April 2021;
3. Siberia's wildfires are bigger than all the world's other blazes combined The Washington post 7.08.2021;
4. «In Photos: Russia's Western Siberian, Urals Regions Gripped by Wildfires». [www.themoscowtimes.com](http://www.themoscowtimes.com). Moscow Times;
5. Earth Touches Everyone report dated July 18, 2024;
6. «The area of forest fires in Russia turned out to be 2.5 times higher than in 2024,» Forbes 05/15/2025;
7. <https://www.fedstat.ru/indicator/38496>
8. Order No. 127 dated March 6, 2025 «On the Establishment of forest Fire Zoning of Forest Fund lands.
9. Instructions on aviation protection of forests. Paragraph 4.1.19;
10. <https://dji-market.ru/dji-matrice/tproduct/650517834-959751537491-kvadrokopter-dji-matrice-30t> ;
11. A.G. Nesterenko. «Analysis of the conditions of the networks of multi-channel radio and the problems of optimization of their functional characteristics»
12. Cheinesh A. Damdynchap, Artyom A. Sharapov «Application of neural networks to recognize smoke and fire in images»
13. Development of a methodology for operational monitoring of natural disasters using unmanned aircraft systems for information support of operational headquarters for extinguishing large forest fires: research report M.O. Bakanov; performed by O.N. Belorozhev. Ivanovo: IPISA State Budgetary Educational Institution of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2020
14. Methodological recommendations on the use of helicopters in firefighting (approved by State Secretary – Deputy Minister of the Ministry of Emergency Situations of Russia V.A. Puchkov on September 16, 2011);
15. Pisarenko V.N. «Electrical equipment of the MI-8, MI-8T, MI-8MTV, MI-8AMT helicopters». Lecture notes;
16. The manual for flight operation of Ka-226T and Ansat helicopters;



# Оптимальный выбор конструкции панелей планера вертолета на основе анализа их массовых характеристик

## Б.В. Бойцов

д-р техн. наук, профессор,  
Заслуженный деятель науки РФ; Москва

## А.И. Ресинец

канд. воен. наук, профессор  
Академии военных наук; Москва  
e-mail: mx5500@mail.ru

## А.А. Ресинец

Начальник отдела  
АО «НЦВ Миль и Камов»; г. Люберцы

## М.И. Тилинин,

инженер-конструктор 2 категории,  
АО «НЦВ Миль и Камов»; г. Люберцы

**Аннотация.** В статье основное внимание уделено оптимальному выбору конструкции панелей на основе анализа их массовых характеристик, приведен пример расчета.

**Ключевые слова:** вертолет, компоновка, лонжерон, обшивка, конфигурация, потеря устойчивости, панель.

**Summary.** The article focuses on the optimal choice of panel design based on an analysis of their mass characteristics, and provides an example calculation.

**Keywords:** helicopter, layout, spar, skin, configuration, loss of stability, panel.

Оптимальный выбор конструкции панелей планера вертолета основывается на анализе их массовых характеристик, включая вес и прочность, и выборе материалов, обеспечивающих заданные аэродинамические свойства при минимальной массе. При этом необходимо сравнивать различные варианты конструкций, такие как традиционные и композитные панели, оценивая их вес, стоимость, технологичность производства и долговечность,

чтобы определить наиболее эффективное решение с точки зрения аэродинамики и общей эффективности летательного аппарата [1, 2].

В процессе разработки объемной и весовой компоновки вертолета определяются конфигурации фюзеляжа и его геометрические параметры, координаты, величина и характер нагрузок, которые должны восприниматься силовыми элементами. Выбор конструктивно-силовой схемы (КСС) фюзеляжа является начальным этапом конструирования [3].

Основными требованиями, предъявляемыми к КСС фюзеляжа, являются надежность конструкции в период эксплуатации вертолета и высокая эксплуатационная эффективность.

Среди сформированных решений, касающихся конструкции фюзеляжа, можно выделить несколько основных типов конструкций: монокок, полумонокок [4], фюзеляж из композиционных материалов. Каждый тип конструкций обладает своими преимуществами и недостатками.

Конструкция типа монокок представляет собой толстостенную оболочку, подкрепленную редкими шпангоутами. Преимуществом такой конструкции является легкость в изготовлении. Явный недостаток этого типа конструкций заключается в неэффективном использовании металла (в слабо нагруженных зонах используется та же толщина, что и для сильно нагруженных).

Фюзеляжи, выполненные из композиционных материалов, являются самыми гибкими с точки зрения технологии производства и могут обеспечить очень широкий спектр возможных конструктивных решений. В рамках композитной конструкции можно обеспечить перепад толщин и жесткости фюзеляжа в зависимости от предполагаемых нагрузок таким образом, чтобы добиться максимальной эффективности использования материала. Однако основным недостатком данной конструкции является недостаточный опыт эксплуатации композитных решений для критически важных узлов (например, хвостовая балка). Это за собой несет отсутствие статистических данных с точки зрения ресурса и ремонтпригодности.

Конструкция типа полумонок представляет собой тонкостенную сборную конструкцию, в которой тонкая обшивка поддерживается «часто» расположенными стрингерами и шпангоутами (рис. 1).

Данный тип конструкции считается одним из наиболее эффективных по соотношению вес/прочность и находится в эксплуатации достаточно длительное время. Для такого типа конструкций статистических данных достаточно для точного прогнозирования ресурса летательного аппарата.

Фюзеляж самолета (вертолета) типа монок состоит из работающей обшивки, подкрепленной шпангоутами, и полумонок – тип фюзеляжа, состоящий из работающей обшивки, подкрепленной каркасом [4, 5].

Современные технологии позволяют выполнять расчеты больших объемов, а использование программного обеспечения на примере системы NX [6], разработанной компанией *Siemens PLM Software*, позволяет моделировать так называемые глобальные модели вертолетов с учетом жесткости реальной или предполагаемой конструкции. Благодаря использованию глобальных моделей можно симулировать различные условия эксплуатации и предполагаемые миссии. В результатах расчетов должны присутствовать потоки усилий. В рамках проектирования наиболее эффективным способом анализа является анализ по огибающей по всем расчетным случаям (рис. 2).

Именно разработка методов оптимального выбора конструкции панелей на основе массовых характеристик позволяет проводить качественные и эффективные по времени расчеты и выдавать различные конструктивные исполнения одной и той же зоны фюзеляжа. На рис. 3 показан пример развертки с указанием выбранных толщин левого борта вертолета полумонокковой конструкции.

Для того чтобы выполнить расчеты верно необходимо выполнить требования, предъявляемые к входным данным для расчета.

Для расчета тонкостенных обшивок, подкрепленных стрингерами и шпангоутами, необходимо использовать результаты расчета глобальной модели с учетом возможных условий эксплуатации и предполагаемых миссий.

#### *Требования к глобальной модели*

Глобальная модель должна быть построена с учетом предполагаемой жесткости конечного конструктива. Ориентация оболочечных элементов должна быть такой, чтобы направление X соответствовало направлению стрингеров.

#### *Требования к результатам расчетов*

В результатах расчетов должны присутствовать потоки усилий по обшивке и стрингерам. В рамках проектирования наиболее эффективным способом анализа является анализ по огибающей по всем расчетным случаям. Более точным, но кратно бо-



Рисунок 1. Стрингерная панель

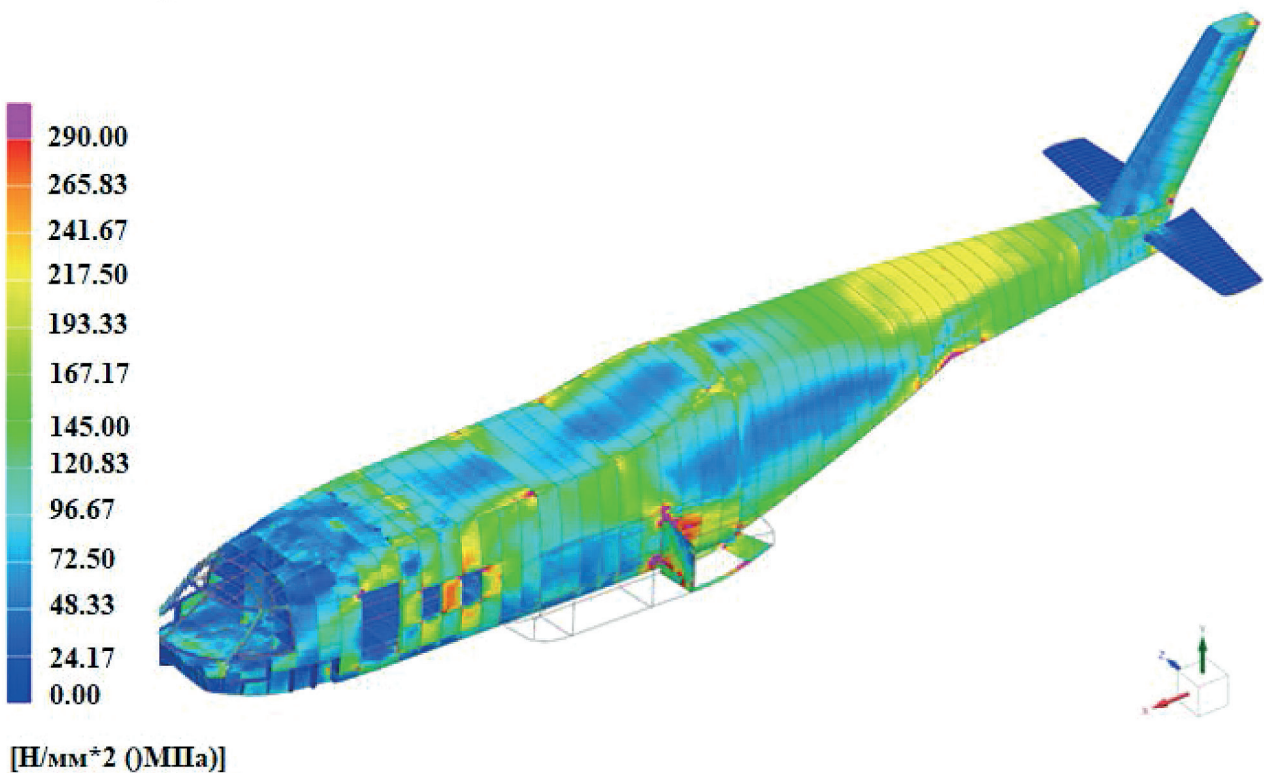


Рисунок 2. Огибающая напряжённо-деформированного состояния фюзеляжа

		Нумерация зон между шпангоутами																				
		шп.1-2	шп.2-3	шп.3-4	шп.4-5	шп.5-6	шп.6-7	шп.7-8	шп.8-9	шп.9-10	шп.10-11	шп.11-12	шп.12-13	шп.13-14	шп.14-15	шп.15-16	шп.16-17	шп.17-18	шп.18-19	шп.19-20	шп.20-21	
№ стрингера	11																					
	12																					
	13																					
	14																					
	15																					
	16																					
	17																					
	18																					
	19																					
	20		1														1,2	1,2	1	1	1	1
	21		1	1								1	1	1	1	1	1,2	1,2	1	1	1	1
	22		1	1	1		0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1	1,2	1,2	1	1	1	1
	23		1	1	1	1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1	1,2	1,2	1	1	1	1
	24		1	1	1	1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1	1,2	1,2	1	1	1	1
	25		1	1	1	1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1	1,2	1,2	1	1	1	1
	26		1	1	1	1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1	1,2	1,2	1	1	1	1
	27		1	1	1	1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1	1,2	1,2	1	1	1	1
	28		1	1	1	1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1	1,2	1,2	1	1	1	1
	29		1	1	1	1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1	1,2	1,2	1	1	1	1
	30					0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1	1,2	1,2	1	1	1	1
	31					0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1	1,2	1,2	1	1	1	1
	32					0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1	1,2	1,2	1	1	1	1
	33					0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1	1,2	1,2	1	1	1	1
	34		0,8			0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1	1,2	1,2	1	1	1	1
	35		0,8			0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1	1,2	1,2	1	1	1	1
	36		0,8			0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1	1,5	1,5	1,5	1,2	1,2	1,2
	37		0,8			0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1	1,5	1,5	3	1,2	1,2	1,2
	38		0,8			0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1	1,5	1,5	1,5	1,2	1,2	1,2
	39		0,8			0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1	1,5	1,5	1,5	1,2	1,2	1,2
	40		0,8			0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1	1,5	1,5	1,5	1,2	1,2	1,2
	41		0,8			0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1	1,5	1,5	1,5	1,2	1,2	1,2
	42		0,8			0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	43		0,8			0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	44		0,8			0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	45		0,8			0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1	1,5	1,5	5,7	1,5	1,5	1,5
	46		0,8			0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1	1,5	1,5	5,7	1,5	1,5	1,5
	47		0,8			0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1	1,5	1,5	5,7	1,5	1,5	1,5

← НП (Ось X)      Толщина обшивок, мм: 0,8 1 1,2-1,5 2,5-3 5,7

Рисунок 3. Развертка с указанием выбранных толщин левого борта вертолета

лее трудоемким является рассмотрение каждого отдельного случая и консолидация решений, принятых в рамках этих случаев.

Методика проведения расчета прочности и устойчивости панели

Методика содержит допущения, основанные на опыте расчета силовых панелей фюзеляжей вертолетов, учитывающие ряд их особенностей – относи-

тельно невысокая нагруженность, малые толщины обшивок, использование прессованных профилей для стрингеров и их монолитное соединение с обшивкой, относительно большая конструктивная жесткость шпангоутов, большой процент панелей малой кривизны.

Рассматривается конструкция, в которой обшивка опирается на шпангоуты и подкреплена

стрингерами. На такую конструкцию действуют силовые факторы, показанные на рис. 4.

Проведенный анализ и опыт эксплуатации зарубежных вертолетов подтверждают, что местная потеря устойчивости тонкостенной обшивки не приводит к критическим последствиям.

На рис. 5 изображен вертолет СН-47 с грузом на внешней подвеске. На внешней обшивке видны местные потери устойчивости. Предполагаемый маневр – отрыв груза на внешней подвеске от земли [7].

На рис. 6 изображен вертолет СН-53, на внешней обшивке которого также видны местные потери устойчивости. Предполагаемый маневр – горизонтальный полет, однако местные потери устойчивости, изображенные на рис. 6, не являются результатом нагруженности вертолета при этом маневре и являются накопленной деформацией за период эксплуатации [8].

Для обшивок приняты универсальные минимально потребные запасы устойчивости относительно расчетной нагрузки (табл. 1).

**Таблица 1. Запасы устойчивости относительно расчетной нагрузки**

Толщина обшивок, мм	Запас устойчивости относительно расчетных нагрузок
0.8	0.4
1.0	0.45
1,2	0.5
1,5	0.55
1,8	0,6
2.0	0,9

Толщина обшивок, мм	Запас устойчивости относительно расчетных нагрузок
2.2 и более	1.0 и более

В табл. 2 представлен пример проверки условия устойчивости клеток (обшивка, ограниченная шпангоутами и стрингерами) для регулярной зоны – места конструкции с определенной, постоянной жесткостью (число указывает фактический запас устойчивости клетки).

**Таблица 2. Пример проверки условия устойчивости клеток для регулярной зоны**

**Допустимое условие устойчивости**

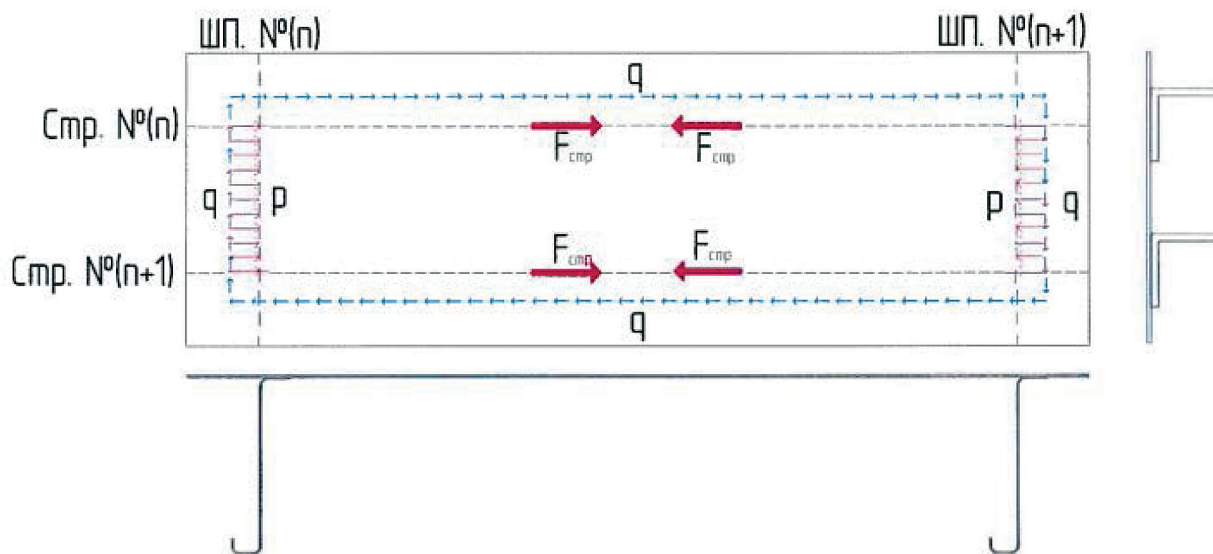
0,56	0,61	0,59	1,13
0,58	0,64	0,54	1,18
0,57	0,61	0,23	1,20
0,58	0,26	0,53	1,26
0,61	0,61	0,56	1,30
0,66	0,59	0,54	1,36

**Не допустимое условие устойчивости**

1,13	0,65	0,72	0,75	0,67
1,08	0,65	0,66	0,69	0,71
1,11	0,68	0,68	0,30	0,76
1,17	0,70	0,30	0,77	0,79
1,26	0,29	0,72	0,82	0,84
1,36	0,74	0,74	0,88	0,92
1,39	0,66	0,78	0,90	1,01

**Не допустимое условие устойчивости**

0,71	0,90	0,87	0,95	1,11	0,79
0,73	0,92	0,87	0,95	1,09	0,73
0,77	0,95	0,89	0,94	0,24	0,73
0,80	0,96	0,90	0,94	1,07	0,76
0,82	0,98	0,20	0,94	1,04	0,71
0,84	0,22	0,94	0,94	1,02	0,62
0,87	0,98	0,94	0,94	0,96	0,60
0,90	0,97	0,91	0,93	0,94	0,50
0,92	0,96	0,88	0,89	0,87	0,85



**Рисунок 4. Схема действующих силовых факторов на стрингерную панель**



Рисунок 5. Наблюдаемые местные потери устойчивости на вертолете СН-47



Рисунок 6. Местные потери устойчивости обшивки на вертолете СН-53

Пример. Рассчитаем устойчивость обшивки толщиной 0,8 мм с присоединенным стрингером (20 × 20 × 2) мм при действии на нее сжимающего усилия 20 Н/мм и сдвигающего усилия 30 Н/мм. Расстояние между осями стрингеров примем 100 мм, ширину клеевого шва – 20 мм, расстояние между шпангоутами – 525 мм, панели опираются на шпангоуты шарнирно. Материал: алюминий [9–15].

1) Расчетная ширина клетки пластины равна:  
 $b = 100 - 20 = 80$  (мм).

2) Коэффициент защемления горизонтальных краев стенки панели составляет:

$$\frac{\delta_c}{\delta} = 2,5; \quad \rho_\tau \approx 1,27.$$

3) Критические касательные напряжения потери устойчивости обшивки равны:

$$\tau_0 = 1,27 \cdot \left[ 4,85 + 3,6 \left( \frac{80}{525} \right)^2 \right] \cdot 72000 \cdot \left( \frac{0,8}{80} \right)^2 = 45 \text{ МПа}.$$

4) Критические нормальные напряжения потери устойчивости обшивки равны:

$$\sigma_0 = 1,27 \cdot 3,6 \cdot 72000 \cdot \left( \frac{0,8}{80} \right)^2 = 32 \text{ МПа}.$$

5) Действующие касательные и нормальные напряжения равны:

$$\tau = \frac{q}{\delta} = \frac{20}{0,8} = 25 \text{ МПа};$$

$$\sigma = \frac{p}{\sigma} = \frac{30}{0,8} = 37,5 \text{ МПа}.$$

6) Из уравнения:

$$\left(\frac{\eta_0 \cdot \sigma}{\sigma_0}\right) + \left(\frac{\eta_0 \cdot \tau}{\tau_0}\right)^2 = 1$$

вычисляем  $\eta_0$ , принимая  
 $\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) = b, \left(\frac{\tau}{\tau_0}\right)^2 = a, \eta_0 = x.$  После замены переменных получим:

$$ax^2 + bx - 1 = 0.$$

Решив квадратное уравнение, получаем  
 $\eta_0 = 0,42.$

7) Сравнив значение  $\eta_0$  для обшивки толщиной 0,8 мм, убеждаемся, что данная толщина удовлетворяет условиям устойчивости.

Оптимальный выбор конструкции панелей на основе массовых характеристик играет важную роль при проектировании вертолетной техники. Современные технологии позволяют выполнять расчеты больших объемов, что комплексно дает понимание о напряженно-деформированном состоянии конструктивно-силовой схемы вертолета. В дальнейшем использование методов оптимального выбора конструкции панелей на основе массовых характеристик позволит достичь снижения массы конструкции панелей, повышения прочности и долговечности панелей и сокращения времени и затрат на проектирование.

### Источники

1. Башаров Е.А., Вагин Ю.А. Анализ применения композиционных материалов в конструкции планеров вертолетов [Электронный ресурс]. Труды МАИ. Вып. 92. URL: <https://mai.ru/science/publications/publish/>

2. Башаров Е.А. Расчет оптимальных конструктивных параметров и применение в аэрокосмических конструкциях трехслойных сотовых панелей из полимерных композиционных материалов / МГТУ им. Н.Э. Баумана // Инженерный журнал: наука и инновации. 2024. № 10.

3. Далин В.Н., Михеев С.В. Конструкция вертолетов: Учеб. М.: Изд-во МАИ, 2001. 352 с.: ил.

4. ГОСТ 21890-76. Фюзеляж, крылья и оперение самолетов и вертолетов. Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР. М., 1977. 10 с.

5. Богданов Ю.С., Михеев Р.А., Скулков Д.Д. Конструкция вертолетов: Учеб. для авиационных техникумов. М.: Машиностроение, 1990. 272 с.: ил.

6. Бельский А.Б., Ресинец А.А. Основы твердотельного моделирования деталей авиационной техники: Учеб. пособие. М.: Изд-во МАИ, 2023. 228 с.: ил.

7. Boeing CH-47 Chinook [Электронный ресурс]. Wikipedia. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Boeing\\_CH-47\\_Chinook/](https://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_CH-47_Chinook/)

8. Sikorsky CH-53 Sea Stallion [Электронный ресурс]. Wikipedia. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Sikorsky\\_CH-53\\_Sea\\_Stallion/](https://en.wikipedia.org/wiki/Sikorsky_CH-53_Sea_Stallion/)

9. Астахов М.Ф. и др. Справочная книга по расчету самолета на прочность. М.: ГИОП, 1954. 648 с.

10. Хертель Г. Тонкостенные конструкции (в авиастроении). М.: Машиностроение, 1965. 528 с.

11. Кун П. Расчет на прочность оболочек в самолетостроении. М.: Оборонгиз, 1961. 308 с.

12. Михеев Р.А. Прочность вертолетов: Учеб. для авиационных специальностей втузов. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.: ил.

13. Тарасов Ю.Л., Лавров Б.А. Расчет на прочность элементов конструкции самолета: Учеб. пособие. 3-е изд., перераб. Самара: Самар. гос. аэрокосмич. ун-т, 2000. 112 с.

14. Чепурных И.В. Прочность конструкций летательных аппаратов: Учеб. пособие. Комсомольск-на Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2013. 137 с.

15. Фомичев П.А., Заруцкий А.В., Мандзюк С.Ф. Расчет на прочность самолета [Электронный ресурс]: Консп. лекций. Харьков: Нац. аэрокосмич. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьков. авиац. ин-т», 2017. Ч. 1. 165 с.

### References

1. Basharov E.A., Vagin Yu.A. Analysis of the use of composite materials in the design of helicopter airframes. The works of MAI. Issue No. 92. <https://mai.ru/science/publications/publish/>

2. Basharov E.A. Calculation of optimal design parameters and application of three-layer honeycomb panels made of polymer composite materials in aerospace structures. Bauman Moscow State Technical University. Engineering Journal: Sciences and Innovations No. 10, 2024.

3. Dalin V.N., Mikheev S.V. Helicopter design: Textbook. Moscow: MAI Publishing House, 2001. 352 p.: ill.

4. GOST 21890-76. Fuselage, wings, and empennage of aircraft and helicopters. State Committee of Standards of the Council of Ministers of the USSR. Moscow, 1977. 10 p.



5. Bogdanov Yu.S. et al. Helicopter design: A textbook for aviation technical schools / Y.S. Bogdanov, R.A. Mikheev, D.D. Skulkov. – M.: Mashinostroenie, 1990. – 272 p.: ill.

6. Belsky A.B., Resinets A.A. Fundamentals of solid-state modeling of aircraft parts: A textbook. Moscow: Publishing House of MAI, 2023. 228 p.: ill.

7. Boeing CH-47 Chinook. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Boeing\\_CH-47\\_Chinook/](https://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_CH-47_Chinook/)

8. Sikorsky CH-53 Sea Stallion. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Sikorsky\\_CH-53\\_Sea\\_Stallion/](https://en.wikipedia.org/wiki/Sikorsky_CH-53_Sea_Stallion/)

9. Reference book on the calculation of aircraft strength. M.F. Astakhov et al., GIOP, M., 1954.

10. Hertel, G. Thin-walled structures (in aircraft construction), Moscow: Mashinostroenie Publ., 1965, 528 p.

11. Kuhn P. Calculation of shell strength in aircraft construction, Oborongiz, 1961. – 308 p.

12. Mikheev R.A. The strength of helicopters: A textbook for aviation specialties of higher education institutions. Moscow: Mashinostroenie, 1984. 280 p., ill.

13. Calculation of the strength of aircraft structural elements: Textbook. Manual. Ed. The third. Revised / Y. L. Tarasov, B. A. Lavrov; Samara State University. Aerospace. un-T. Samara. 2000. 112 p.

14. Chepurnykh I.V. Structural strength of aircraft: textbook. The manual / I. V. Chepurnykh. Komsomolsk-on-Amur: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “KnAGTU”, 2013. 137 p.

15. Fomichev P.A., Fomichev P.A., Zarutsky A.V., Mandzyuk S.F. Calculation of the strength of an aircraft [Electronic resource]: conspiracy of lectures. Kharkiv: National Library. Aerospace. N.E. Zhukovsky University of Kharkov, aviation center. in-t, 2017. Part 1. 165 p.

УДК 621.865

Шифр научной специальности: 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы

# Исследование характеристик нелинейной упругости звеньев роботов-манипуляторов

**Е.В. Поезжаева**

канд. техн. наук, профессор,  
ФГАОУ ВО «Пермский национальный  
исследовательский политехнический  
университет» (ФГАОУ ВО ПНИПУ);  
г. Пермь

**М.К. Старцев**

студент ФГАОУ ВО ПНИПУ; г. Пермь

**Е.С. Тряцын**

студент ФГАОУ ВО ПНИПУ; г. Пермь

**В.А. Реутов**

студент ФГАОУ ВО ПНИПУ; г. Пермь

**Н.Н. Кучев**

студент ФГАОУ ВО ПНИПУ; г. Пермь  
e-mail: tmm010203@yandex.ru

**Аннотация.** Целью исследования является разработка нелинейной модели пространственного манипулятора с учетом упругости звеньев для повышения точности прогнозирования его динамики. Гипотеза заключается в том, что учет упругих деформаций позволяет существенно повысить точность расчета траекторий движения. Задачи включают формализацию геометрических и динамических параметров, вывод уравнений движения с учетом упругости и реализацию численного решения. Методы: теория упругости, уравнения Ньютона, преобразования координат, метод конечных элементов и метод Галеркина. В результате получена обобщенная модель, учитывающая влияние гибкости звеньев на движение манипулятора в пространстве, пригодная для использования при проектировании и управлении робототехническими системами.

**Ключевые слова:** робот-манипулятор, упругость звеньев, управление роботом, деформация звеньев.

**Abstract.** The aim of the study is to develop a nonlinear model of a spatial manipulator taking into account the elasticity of the links to improve the accuracy of predicting its dynamics. The hypothesis is that taking into account elastic deformations can significantly improve the accuracy of calculating motion trajectories. The tasks include formalizing geometric and dynamic parameters, deriving equations of motion taking into account elasticity and implementing a numerical solution. Methods: elasticity theory, Newton's equations, coordinate transformations, finite element method and Galerkin method. As a result, a generalized model was obtained that takes into account the influence of link flexibility on the manipulator's motion in space, suitable for use in designing and controlling robotic systems.

**Keywords:** robot manipulator, link elasticity, robot control, link deformation.

Современные манипуляционные роботы требуют высокой точности и скорости, однако упругость звеньев снижает эффективность их работы [1, 2]. Для достоверного моделирования поведения таких систем необходим учет деформаций конструкции [3, 4]. В данной работе предлагается модель, учитывающая упругие свойства звеньев, с целью повышения точности динамического анализа и управления. В настоящее время основным требованием, предъявляемым к промышленным роботам, является повышение скорости и точности их движений [5, 7]. Однако гибкость звеньев и упругость сочленений препятствуют повышению мобильности манипуляторов. Для того чтобы иметь возможность прогнозировать влияние гибкости манипулятора на его движение, необходимо располагать точной моделью манипулятора. В этой модели должны быть учтены не только его кинематические и динамические характеристики, но также характеристики его упругих элементов. В настоящей работе строится простая и эффективная модель манипулятора, движущегося в трехмерном пространстве, которая описывает его динамику с учетом эффектов его упругости (рис. 1).

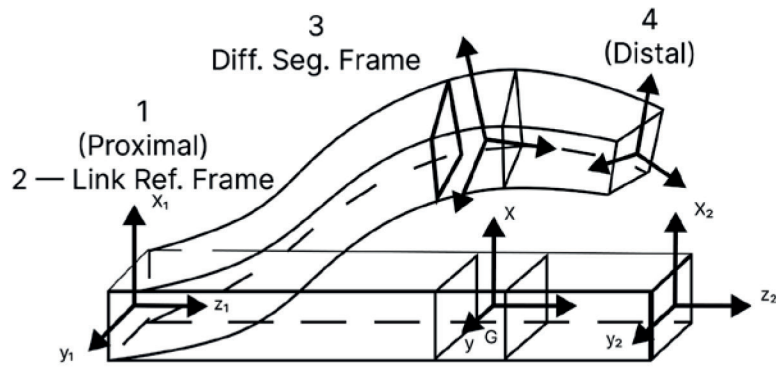


Рисунок 1. Модель звена манипулятора: 1 — ближний; 2 — система, связанная со звеном; 3 — система, связанная с дифференциальным сегментом; 4 — дальний

Предполагается, что моделью  $i$ -того звена манипулятора может служить брус с однородными поперечными сечениями, изображенный на рис. 1. Сочленение в конце звена, находящееся ближе к основанию, имеет номер  $i$  и называется ближним, а сочленение в другом конце звена имеет номер  $i + 1$  и называется дальним. С ближним концом звена связана система координат  $X_1Y_1Z_1$ , с дальним концом — система координат  $X_2Y_2Z_2$ . Оси  $Z_1$  и  $Z_2$  направлены параллельно средней линии звена. На звене рассматривается произвольный дифференциальный сегмент с центром масс  $G$ . С дифференциальным сегментом связана система координат  $x, y, z$ .

Пусть преобразование  $[A_i]$  определяет заданное движение в сочленении  $i$  без учета гибкости звеньев манипулятора. И пусть преобразование  $[E_i]$  описывает перемещение звена, возникающее за счет его упругой деформации. Это преобразование задает изменение положения системы координат  $X_2Y_2Z_2$  относительно системы  $X_1Y_1Z_1$ . Для этого вводятся углы  $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ , определяющие поворот осей  $X_2Y_2Z_2$  относительно осей  $X_1Y_1Z_1$  соответственно, а также величины  $d_x, d_y, d_z$ , которые задают смещение системы  $X_2Y_2Z_2$  относительно системы  $X_1Y_1Z_1$ , возникающее за счет деформации звена.

Используя преобразования  $[A_i]$  и  $[E_i]$ , можно определить преобразование  $[T_i]$ , описывающее положение и ориентацию  $i$ -того звена манипулятора. Оно имеет вид:

$$[T_i] = \varepsilon_0 \cdot A_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot \varepsilon_{i-1} \cdot A_i, \quad (1)$$

Здесь  $\varepsilon_0$  — единичная матрица. На основе преобразования  $[T_i]$  можно получить выражения для кинематических характеристик  $i$ -того звена. Так, вектор абсолютных угловых скоростей  $\bar{\omega}_b$  и вектор абсолютных угловых ускорений  $\bar{a}_b$  системы координат  $X_1Y_1Z_1$   $i$ -того звена определяются формулами:

$$[\bar{\omega}_b] = [c_i]^T [\dot{c}_i] [c_i]^T, \quad (2)$$

$$[\bar{a}_b] = [c_i]^T \left[ [\ddot{c}_i] [c_i]^T - [\bar{\omega}_b] [\bar{\omega}_b] \right] \quad (3)$$

где  $[c_i], [\dot{c}_i], [\ddot{c}_i]$  — подматрицы размера  $3 \times 3$

матриц  $[T_i], [\dot{T}_i]$  и  $[\ddot{T}_i]$  соответственно. Абсолютные скорость и ускорение дифференциального сегмента выражаются в виде:

$$\bar{\omega}_s = \bar{\omega}_b + \bar{\omega}_d, \quad (4)$$

$$\bar{a}_s = \bar{a}_b + \bar{a}_d + \bar{\omega}_b \times \bar{\omega}_d, \quad (5)$$

где  $\bar{\omega}_d$  и  $\bar{a}_d$  — относительные угловые скорость и ускорение в системе координат  $X_1Y_1Z_1$ . Ускорение произвольной точки на звене, находящейся на расстоянии  $s$  от его ближнего конца, вычисляется по формуле:

$$\bar{a}_G = \bar{a}_b + \bar{\omega}_b \times (\bar{\omega}_b \times \bar{r}) + \bar{a}_b \times \bar{r} + 2\bar{\omega}_b \times \bar{v}_{rel} + \bar{a}_{rel} \quad (6)$$

$$\text{где } \bar{r} = u_x \bar{k}_{x_b} + u_y \bar{k}_{y_b} + (s + u_z) \bar{k}_{z_b},$$

$$\bar{v}_{rel} = \dot{u}_x \bar{k}_{x_b} + \dot{u}_y \bar{k}_{y_b} + \dot{u}_z \bar{k}_{z_b},$$

$$\bar{a}_{rel} = \ddot{u}_x \bar{k}_{x_b} + \ddot{u}_y \bar{k}_{y_b} + \ddot{u}_z \bar{k}_{z_b}, \quad (7)$$

Здесь  $\bar{k}_{x_b}, \bar{k}_{y_b}, \bar{k}_{z_b}$  — единичные векторы, направленные вдоль осей  $X_1Y_1Z_1$  звена  $i$ ;  $u_x, u_y, u_z$  — смещения дифференциального сегмента по осям  $X_1Y_1Z_1$ , возникающие за счет деформации звена  $i$ .

С помощью уравнений Ньютона можно записать выражения для результирующего вектора сил  $\bar{F}$ , приложенного к дифференциальному сегменту, и результирующего вектора моментов  $\bar{M}_G$ , взятого относительно центра масс  $G$  дифференциального сегмента. Эти выражения имеют вид:

$$\bar{F} = \rho A \bar{a}_G ds,$$

$$\bar{M}_G = \bar{H}_G = \rho \left[ I \cdot \bar{a}_G + \bar{\omega}_G \times (I \cdot \bar{\omega}_G) \right] ds = M_G \bar{k}_{x_b} + M_G \bar{k}_{y_b} + M_G \bar{k}_{z_b} \quad (8)$$

где  $\rho$  — плотность,  $A$  — площадь поперечного сечения звена.

Распределение сил и моментов, действующих на дифференциальный сегмент, представлено на рис. 2. Здесь через  $\theta_x, \theta_y, \theta_z$  обозначены угловые сме-

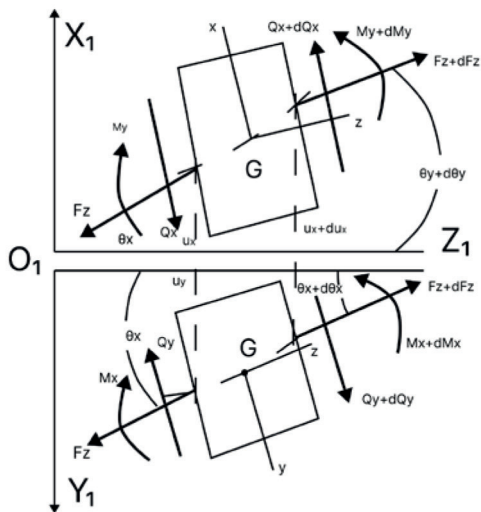


Рисунок 2. Распределение сил и моментов, действующих на дифференциальный сегмент, где  $M_z$  — модуль упругости,  $I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}$  — моменты инерции сечения,  $\gamma$  — модуль сдвига

щения дифференциального сегмента относительно осей  $X_1 Y_1 Z_1$ , вызванные деформацией звена. Сила  $\theta_x$  пропорциональна величине  $A(\partial u_x / \partial s - \theta_y)$ , а сила  $Q_y$  пропорциональна величине  $A(\partial u_y / \partial s - \theta_x)$ .

Для составляющих  $M_x, M_y, M_z$  момента существует зависимость от кривизны звена:

$$\begin{aligned} M_x &= EI_{xx} \partial \theta_x / \partial s; \\ M_y &= EI_{yy} \partial \theta_y / \partial s; \\ M_z &= EI_{zz} \partial \theta_z / \partial s, \end{aligned} \quad (9)$$

На основании рис. 2 можно записать следующие уравнения для дифференциального сегмента:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_x}{\partial s} + f_x &= \rho A a_x; & \frac{\partial Q_y}{\partial s} + f_y &= \rho A a_y; & AE \frac{\partial^2 u_z}{\partial s^2} + f_z &= \rho A a_z \\ \frac{\partial M_x}{\partial s} - Q_y &= M_{G_x}; & \frac{\partial M_y}{\partial s} + Q_x &= M_{G_y}; & \frac{\partial M_z}{\partial s} &= M_{G_z} \end{aligned} \quad (10)$$

Решение этих уравнений будет получено с помощью метода конечных элементов. Для того чтобы воспользоваться этим методом, уравнения (10) следует перевести в интегральную форму, что можно сделать, если применить метод Галеркина.

В заключение, разработана нелинейная динамическая модель пространственного манипулятора, учитывающая упругие деформации звеньев. Модель основана на представлении звеньев как упругих тел с распределенной массой, описываемых с использованием преобразований координат, уравнений Ньютона и теории упругости. Для получения численного решения применены метод конечных элементов и метод Галеркина, что позволило перевести систему в вычислимую форму. Полученные результаты подтверждают, что учет гибкости конструкции значительно повышает точность моделирования и

может быть эффективно использован при проектировании, симуляции и управлении робототехническими системами, работающими в условиях высоких нагрузок и скоростей.

### Источники

1. Кулаков Ф.М., Алферов Г.В., Малафеев О.А. Кинематический анализ исполнительной системы манипуляционных роботов // Проблемы механики и управления: Нелинейные динамические системы. 2014. № 46. С. 31–38.
2. Гурский Н.Н., Скудняков Ю.А., Артюшик В.С., Безручко А.Н. Управление мехатронной системой на базе многосвязных роботов-манипуляторов // Наука и техника. 2019. Т. 18. № 4. С. 350–354. DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-4-350-354.
3. Кулаков Ф.М., Алферов Г.В., Шарлай А.С. Кинематические модели манипуляционных роботов // Потенциал современной науки. 2014. № 2. С. 37–41.
4. Сухоруков С.И., Черный С.П., Мешков А.С., Киба Д.А. Концепция формирования управляющей программы для роботизированного комплекса лазерной сварки // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2020. № 7(47). С. 26–33.
5. Поезжаева Е.В., Тонков Е.Ю., Кучев Д.Н. Исследование кинематики инновационной конструкции робота-манипулятора для высокоточного позиционирования // Строительные и дорожные машины. 2022. № 11. С. 38–41.
6. Поезжаева Е.В., Тонков Е.Ю., Кучев Д.Н., Гумаров Э.Х. Разработка инновационной конструкции робота-манипулятора для высокоточного позиционирования // Строительные и дорожные машины. 2022. № 11. С. 42–46.
7. Белов М.П., Чан Д.Х. Интеллектуальный контроллер на основе нелинейного оптимального управления роботами-манипуляторами // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2018. № 9. С. 76–86.

### References

1. Kulakov, F. M. Kinematic analysis of the actuator system of manipulation robots / F. M. Kulakov, G. V. Alferov, O. A. Malafeev // Problems of Mechanics and Control: Nonlinear Dynamic Systems. 2014. No. 46. P. 31–38.
2. Control of a mechatronic system based on multi-link robotic manipulators / N. N. Gursky, Yu. A. Skudnyakov, V. S. Artyushchik, A. N. Bezruchko // Science and Technology. 2019. Vol. 18, No. 4. P. 350–354. DOI 10.21122/2227-1031-2019-18-4-350-354.
3. Kulakov, F. M. Kinematic models of manipulation robots / F. M. Kulakov, G. V. Alferov, A. S. Sharlai // Potential of modern science. 2014. No. 2. P. 37–41.
4. The concept of forming a control program for a robotic laser welding complex / S. I. Sukhorukov, S. P. Cherny, A. S. Meshkov, D. A. Kiba // Scientific notes of Komsomolsk-on-Amur State Technical University. 2020. No. 7 (47). P. 26–33.
5. Poezhaeva, E. V. Study of the kinematics of an innovative design of a robotic manipulator for high-precision positioning / E. V. Poezhaeva, E. Yu. Tonkov, D. N. Kuchev // Construction and road machines. 2022. No. 11. P. 38–41.
6. Development of an innovative design of a robotic manipulator for high-precision positioning / E. V. Poezhaeva, E. Yu. Tonkov, D. N. Kuchev, E. Kh. Gumarov // Construction and road machines. 2022. No. 11. P. 42–46.
7. Belov, M. P. Intelligent controller based on nonlinear optimal control of robotic manipulators / M. P. Belov, D. Kh. Chan // Bulletin of ETU LETI. 2018. No. 9. P. 76–86.



# Программа управления принтером этикеток по интерфейсу USB на языке Python

## В.Е. Белай

инженер, ООО «Научно-производственная фирма «Полисервис»; Санкт-Петербург  
e-mail: belvasevg@yandex.ru

## А.А. Приходский

аспирант, ассистент кафедры электромеханики и робототехники, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»; Санкт-Петербург  
e-mail: prihodskiy@guap.ru

**Аннотация.** В статье представлена разработка программы управления принтером этикеток TSC TE310 с использованием языка программирования Python и интерфейса USB. Рассмотрены основные этапы настройки связи между компьютером и принтером с применением утилиты INF-WIZARD для определения идентификаторов устройства и библиотеки pyusb для реализации передачи данных. Описан процесс создания класса для управления USB-устройством, включающего методы инициализации, проверки подключения и получения источника данных. Разработана функция печати этикеток с поддержкой QR-кодов и текстовой информации на основе языка ZPL (*Zebra Programming Language*). Приведены примеры применения программы для маркировки изделий, а также возможности ее адаптации под различные форматы этикеток. Статья демонстрирует практическое решение производственных задач, выходящих за рамки стандартных программных сред, таких как BarTender.

**Ключевые слова:** Python, TSC, печать этикеток.

**Summary.** This article presents the development of a control program for the TSC TE310 label printer using the Python programming language and the USB interface. The main stages of setting up communication between the computer and the printer using the INF-WIZARD utility to determine device identifiers and the pyusb library to implement data transmission are

considered. The process of creating a class for managing the USB device, including methods for initialization, connection checking, and data source retrieval, is described. A function for printing labels with support for QR codes and text information based on the ZPL (*Zebra Programming Language*) language has been developed. Examples of the program's application for product labeling and its adaptability to various label formats are provided. The article demonstrates a practical solution to production tasks that go beyond standard software tools such as BarTender.

**Keywords:** python, TSC, label printing.

## Введение

Для маркировки изделий используются различные средства, к которым можно отнести принтеры печати этикеток. С помощью данных принтеров можно создавать различные этикетки, на которые могут быть нанесены штрихкоды, QR-коды, текстовая информация и прочие атрибуты маркировки. Принтеры по печати этикеток можно классифицировать по способу нанесения изображения на этикетку, принтеры прямой термопечати, термотрансферные принтеры и принтеры с флексопечатью [1]. Наиболее популярными торговыми марками в технологии печати этикеток являются Godex, ZEBRA [1].

Принтеры компании TSC серии TE310 (рис. 1) [2] выполняют печать на базе технологии ZPL – *Zebra Programming Language*.

Для принтеров печати этикеток существуют готовые решения в виде программного обеспечения, к которому можно отнести среду BarTender. В BarTender можно выбрать интерфейс передачи информации, задать размеры этикеток и информацию, размещаемую на самой этикетке с визуальным отображением в среде.

Для передачи информации на принтер используются интерфейсы USB, RS-232C, UART и Ethernet.

Помимо использования готовых сред по разработке макета этикеток довольно часто возникают производственные задачи, которые невозможно решить с использованием стандартных сред по работе с принтерами печати этикеток.

При разработке производственных решений могут использоваться различные технологии и



Рисунок 1. Принтер TSC TE310 [2]

языки программирования, например информационная система для печати на этикетках с использованием *Microsoft Visual Basic 6.0* [3].

В данной статье рассмотрен пример разработки программы управления на языке Python для управления принтером TSC TE310 по интерфейсу USB.

### Настройка связи с принтером TSC TE310

Для настройки связи компьютера и принтера следует выполнить следующие операции:

- 1) с помощью утилиты INF-WIZARD (*libusb-win32*) [4];
- 2) на базе библиотеки *pyusb* разработать скрипт по инициализации дескриптора для отправки данных по USB [5].

Утилита INF-WIZARD позволяет узнать ID устройств, подключенных по интерфейсу USB. Результат определения ID представлен на *рис. 2*.

После определения ID принтера необходимо приступить к разработке программы управления для работы с USB-устройством. В качестве языка разработки программы выбран Python версии 3.12.4. Основной библиотекой для организации работы USB-устройства используется библиотека *pyusb* версии 1.0 [5].

При разработке программы следует:

- 1) импортировать модули библиотеки *pyusb* – *core* и *util*;
- 2) Разработать шаблон класса с методами:
  - конструктором класса;

- методом проверки наличия устройства при создании объекта с передаваемыми параметрами Vendor ID и Product ID;

- методом получения экземпляра источника.

В конструктор класса передаются параметры Vendor ID и Product ID, определяемые в утилите INF-WIZARD (см. *рис. 2*). В теле конструктора класса создается атрибут класса *dev*, в который записывается результат выполнения функции поиска USB-устройства с заданными параметрами, после чего выполняется проверка найденного устройства в блоке *try-except*, где при удачной попытке осуществляется инициализация активной конфигурации устройства, а при неудачной попытке обрабатывается исключение *ValueError* с выводом информационного сообщения в консоли.

Метод проверки наличия устройства выполняет проверку наличия устройства. Метод является необязательным и разработан исключительно для удобства работы с классом. Метод возвращает *None*.

В методе получения экземпляра источника выполняются по порядку перечисления операции получения активной конфигурации устройства, получение первого интерфейса в активной конфигурации, поиск первого источника данных с направлением конечной выходной точки, а в том случае, если источник не найден, выбрасывается исключение *ValueError*, при котором выводится сообщение «Источник данных не найден». Метод возвращает генератор с параметрами экземпляра источника.

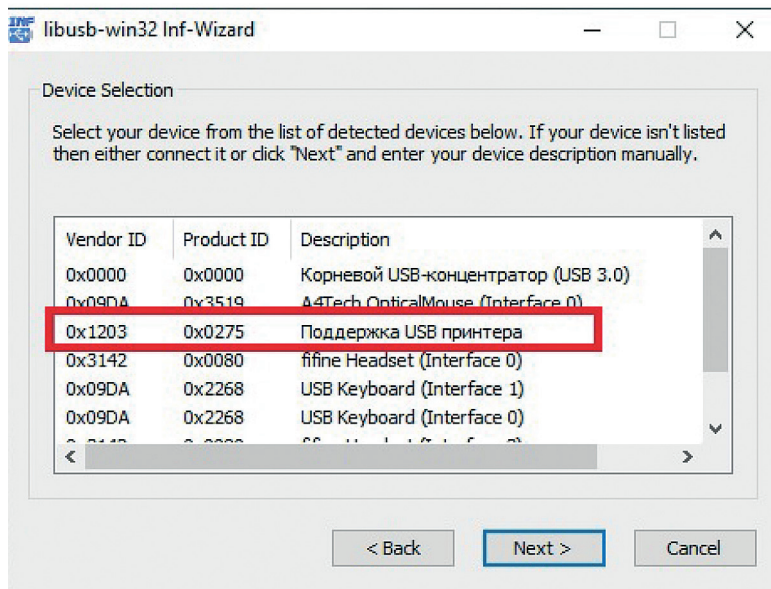


Рисунок 2. Определение ID принтера в утилите INF-WIZARD



### Функция печати этикеток

Функция печати этикеток `label_print` описывается в отдельном файле. На этикетке должен располагаться QR-код модели 1 [6] с номером серии продукта и тот же номер серии под QR-кодом. Параметры функции `label_print` приведены в таблице в порядке их передачи при вызове функции.

В начале тела функции выполняется проверка наличия конечной точки, где том в случае, если нет конечной точки, то есть значение переменной `ep` равно `None`, функция завершает свою работу.

Также в теле функции задается константное значение отношения дюйма к миллиметру, который равен 25.4, для вычисления значения количества точек на миллиметр.

Порядок печати регламентируется командами языка ZPL [7].

Перед началом цикла печати этикеток на принтер необходимо отправить команду `~TA040` для установки параметров печати [8].

Далее описывается процесс печати, который имеет внешний цикл `for` для обработки общего количества этикеток и вложенный цикл `for` для одинаковых этикеток.

Порядок передачи команд для печати одной этикетки:

- 1) начало форматирования этикетки – `^XA`;
- 2) установка ширины и длины этикетки в точках – `^PW` и `^LL`;
- 3) установка шага бумаги – `^PR2`;
- 4) установка начальной позиции для печати QR-кода – `^FOX,Y`;
- 5) печать QR-кода – `^BQN,2,5`;
- 6) данные для QR-кода – `^FDQA,SOME_DATA^FS`;
- 7) установка начальной позиции для печати текста – `^FOX,Y`;

8) установка параметров шрифта для текста – `^AON,30,30`;

9) печать текстового сообщения – `^FDSOME_DATA^FS`;

10) печать графического элемента (рамки) – `^GBSIZE,1,1,B,0^FS`;

11) завершение форматирования и печать этикетки – `^XZ`.

В основном исполняемом файле необходимо импортировать модули `core` и `util` библиотеки `pyusb` и файл с классом USB-дескриптора и импортированные функции для печати.

Далее необходимо создать экземпляры USB-устройства и источника данных и вызвать функцию для печати этикеток.

### Заключение

Разработанный в рамках статьи алгоритм управления принтером этикеток TSC TE310 по интерфейсу USB на языке Python успешно применен для маркировки серии выпускаемых плат. Использование библиотеки `pyusb` и утилиты `INF-WIZARD` позволило обеспечить стабильную связь между компьютером и принтером, а применение команд ZPL – точную печать QR-кодов и текстовой информации на этикетках. Предложенное решение отличается гибкостью: при необходимости алгоритм может быть адаптирован для формирования этикеток нового формата путем внесения минимальных изменений в код. Таким образом, разработанная программа представляет собой эффективный инструмент для автоматизации процессов маркировки в производственных условиях, дополняя или заменяя стандартные программные среды.

Рассмотренный алгоритм для отправки команд принтеру по печати этикеток по интерфейсу USB удалось применить для маркировки серии выпускаемых плат (рис. 3).

Параметры функции `label_print`

№ п/п	Имя параметра	Тип	Описание
1	<code>ep</code>	–	Объект конечной точки для записи данных
2	<code>start_num</code>	int	Стартовый номер серии продукта
3	<code>identical_label_quantity</code>	int	Количество одинаковых этикеток. По умолчанию равно 1
4	<code>total_label_quantity</code>	int	Общее количество обрабатываемых номеров продукта с увеличением номера на 1. По умолчанию равно 1
5	<code>qr_value</code>	int	Значение, располагаемое на QR-коде, по умолчанию принимает значение <code>None</code>
6	<code>dpi</code>	int	Качество печати. Количество точек на дюйм. Ввиду разработки программы для принтера TE310 значение равно 300
7	<code>side_length</code>	int	Размер стороны этикетки. Функция разрабатывается для этикетки квадратной формы

При необходимости в данный алгоритм можно внести небольшие изменения для формирования этикеток нового формата.



Рисунок 3. Нанесенная этикетка на маркируемое изделие

### Источники

1. Батыршим А.М., Целищев Д.В. Анализ технологий печати этикеток для складских систем штрихового кодирования // Актуальные вопросы современной науки: Сб. статей по материалам X Международной научно-практической конференции: В 4 ч. Часть 1. ООО «Дендра», 2018. С. 109–112.
2. Официальный сайт компании TSC [Сайт]. URL: <https://emea.tscprinters.com/ru>
3. Nurasiah N.N., Winanti W., Ya.P., Ja.S Analisa dan perancangan sistem informasi terintegrasi untuk percetakan data label menggunakan microsoft visual basic 6.0 untuk mendukung zebra thermal printing programming language pada pt. Kodashindo tatarasana tbk. Cikupa – Tangerang // Insan Pembangunan Sistem Informasi Dan Komputer (IPSIKOM). Universitas Insan Pembangunan Indonesia, 2023. P. 28.
3. Fluffy [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/fourminute/Fluffy/tree/master/windows>
4. PyUSB – Easy USB access for Python [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/pyusb/pyusb/tree/master>
5. Белай В.Е., Белай В.Ю., Мастеров А.П., Приходский А.А. Приложение генерации QR-кодов для первичного приема пациентов с применением библиотеки Tkinter // Modern Science. 2024. № 12-1. Научно-информационный издательский центр «Институт стратегических исследований». С. 132–136.

6. Как приготовить зебру (Мой опыт в ZPL) [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/articles/681758/>

7. Руководство по программированию на ZPL [Электронный ресурс]. URL: <https://www.brandselect.ru/upload/iblock/947/d8xohc04hrkv1yi708li9t0dmdo0pb8r/Rukovodstvo-po-programmirovaniyu-na-ZPL-dlya-ATOL-TT621.pdf>

### References

1. Batyrshim A.M., Tselishchev D.V. Analysis of label printing technologies for barcode warehouse systems // Current Issues of Modern Science. Collection of articles based on the materials of the X International Scientific-Practical Conference. In 4 parts. Vol. Part 1. Limited Liability Company Dendra, 2018. – P. 109-112.
2. Official website of TSC // URL: <https://emea.tscprinters.com/ru> (accessed: 20.02.2025)
3. Nurasiah N.N., Winanti W., Ya.P., Ja.S. Analysis and design of an integrated information system for data label printing using Microsoft Visual Basic 6.0 to support Zebra thermal printing programming language at PT. Kodashindo Tatarasana Tbk. Cikupa – Tangerang // Human Development Information Systems and Computers (IPSIKOM). University of Human Development Indonesia, 2023. – P. 28.
4. Fluffy // URL: <https://github.com/fourminute/Fluffy/tree/master/windows> (accessed: 20.02.2025)
5. PyUSB – Easy USB access for Python // URL: <https://github.com/pyusb/pyusb/tree/master> (accessed: 20.02.25)
6. Belaev V.E., Belaev V.Yu., Masterov A.P., Prikhodsky A.A. QR code generation application for primary patient admission using the Tkinter library // Modern Science. No. 12-1. Scientific Information Publishing Center «Institute of Strategic Studies», 2024. – P. 132-136.
7. How to cook a zebra (My experience with ZPL) // URL: <https://habr.com/ru/articles/681758/> (accessed: 20.02.25)
8. ZPL Programming Guide // URL: <https://www.brandselect.ru/upload/iblock/947/d8xohc04hrkv1yi708li9t0dmdo0pb8r/Rukovodstvo-po-programmirovaniyu-na-ZPL-dlya-ATOL-TT621.pdf> (accessed: 20.02.25)



# Системно-динамическая модель управления качеством в текстильном кластере

**М.О. Беклямишев**

Санкт-Петербургский государственный  
экономический университет, аналитик  
Центра «Открытое образование»;  
Санкт-Петербург  
e-mail: beklyamishev.m@unecop.ru

**Аннотация.** Исследуются возможности применения системно-динамического моделирования для управления качеством продукции и оптимизации производственных процессов в текстильном кластере. Разработана математическая модель, интегрирующая динамику производства, качества, кооперации и логистики. Результаты могут использоваться для обоснования решений по управлению качеством и стандартизации процессов в промышленных кластерах.

**Ключевые слова:** промышленный текстильный кластер, производственная кооперация, качество продукции, стандартизация, имитационное моделирование.

**Summary.** This study explores system dynamics modeling applications for product quality management and production process optimization in textile clusters. A mathematical model integrating production, quality, cooperation, and logistics dynamics is developed. The results support quality management and process standardization in industrial clusters.

**Keywords:** Textile Manufacturing Clusters, Quality Management Systems, Industrial Collaboration, Process Standardization, System Dynamics Modeling.

В современном мире отечественные производители текстильной отрасли, критически зависящие от иностранных поставок сырья, столкнулись с системными рисками развития, обеспечения качества продукции и производственной устойчивости по причинам нарастания технологической фрагментации, ресурсных ограничений и необходимо-

сти оперативного замещения импортного сырья и материалов отечественными аналогами. Первыми шагами стали переориентация на внутренний рынок и импортозамещение с реконfigurацией глобальных цепочек на принципах френдшоринга [1]. Это повысило согласованность действий и устойчивость российских кластеров к ресурсным шокам, вызванных внешними геостратегическими причинами, но количество поставщиков снизилось и, как следствие, выросли издержки и производственные риски при усилении санкционного давления [2]. Ключевыми проблемами стали снижение качества полуфабрикатов и готовой продукции в текстильных кластерах по причине несоответствия технических параметров сырья (качество пряжи, красителей и пр.) и дисбаланс загруженности производственных мощностей по причине рассогласованности действий акторов кластеров. По данным Ассоциации в 2023 г. на 48% к уровню 2022 г. произошло сокращение российского экспорта текстиля, доля импорта текстильных изделий за тот же период выросла на 55% [3].

Указанные проблемы снижают эффективность деятельности кластеров и негативно влияют на качество продукции. Поэтому государство, активно поддерживая импортозамещение, в то же время смещает приоритеты на обеспечение технологического суверенитета, что требует от кластеров локализации производства и развития собственных производственных инновационных технологий. Однако российские инновационные разработки, как правило, останавливаются на уровне лабораторных испытаний и опытных образцов и не поступают в производство.

Поэтому при переходе к следующему этапу крайне важно выстраивать сетевые научно-технологические промышленные экосистемы, учитывающие нелинейные процессы взаимодействия акторов в кластерах, и стандартизировать процессы кооперации для повышения качества продукции всех участников кластера при условии ресурсных ограничений [4]. Это позволит унифицировать подходы к логистике и менеджменту качества, стимулировать инновации и сформировать проектно-инвестиционную среду кластера, что позволит

управлять качеством продукции, повысить конкурентоспособность и развивать инфраструктуру промышленных кластеров с помощью мер государственной поддержки. Предлагается рассматривать стандартизацию как механизм преодоления технологической фрагментации и обеспечения качества продукции при устранении технологических несовместимостей через гармонизацию технических регламентов и переориентацию инвестиционных потоков на сквозные технологии (IoT), способные снизить ресурсные потери.

Исследователи при оценке кластеров опираются на различные методы, например, измерение отдельных эффектов (синергия, транзакционные издержки, диффузия инноваций, чистая текущая стоимость) [5, 6] и экспертные оценки проектов [7], анализируют влияние платформенных решений цифровой трансформации на устойчивость производственных цепочек в кластерах [8], разрабатывают технологические параметры системы для отдельных производственных процессов [9]. Вместе с тем ни один из предложенных подходов не учитывает роль стандартизации подходов к оценке эффективности и устойчивости, системные взаимосвязи кооперации акторов, логистического взаимодействия и качества продукции.

Поэтому цель исследования заключается в разработке системно-динамической модели управления качеством продукции в текстильных промышленных кластерах, интегрирующей динамику ключевых факторов производственной мощности, качества продукции, логистики, ресурсного обеспечения и кооперации участников. На рисунке представлена диаграмма причинно-следственных связей модели.

Красными стрелками обозначены связи, усиливающие рост связанных факторов, синими стрелками – связи, вызывающие снижение значений факторов при взаимодействии. Усиливающая петля R1 «Инвестиционный рост»  $(I(t) - P(t) - K(t) - Q(t) - P(t))$  показывает, что рост инвестиций положительно влияет на расширение или модернизацию производства, что в свою очередь стимулирует кооперацию акторов, повышает качество продукции и в совокупности увеличивает объемы производства в кластере. Усиливающая петля R2 «Логистическая синергия»  $(K(t) - L(t) - E(t))$  показывает положительную связь кооперации и логистики, что повышает общую эффективность кластера. Балансирующая петля B1 «Ресурсное ограничение»  $(P(t) - R(t) - K(t) - P(t))$  устанавливает связи, при которых рост производства истощает ресурсы, снижает кооперацию акторов и ограничивает рост производства. Вторая балансирующая петля B2 «Износ оборудования»  $(\beta - Q(t) - P(t))$  показывает, как увеличение износа оборудования снижает качество, что уменьшает объемы производства продукции.

Рост производства за счет инвестиций под влиянием роста качества и кооперации, ограничением которого выступает дефицит ресурсов в том случае, если  $R(t) < 1$ , описывается формулой:

$$\frac{dP}{dt} = \gamma * I(t) * (1 - \beta) + P(t) * (\alpha * Q(t) + \delta * K(t)) - P(t) * (1 - R(t)) \quad (1)$$

где  $P(t)$  – объем производства (ед/год);  $Q(t)$  – интегральный показатель качества продукции (0–1);  $K(t)$  – уровень кооперации в кластере: доля совместных проектов (0–1);  $R(t)$  – доступность ресурсов: сырье, энергия (0–1);  $\alpha$  – коэффициент влияния качества на спрос;  $\beta$  – коэффициент износа оборудования;  $\gamma$  – эффективность инвестиций;  $\delta$  – скорость роста кооперации акторов.

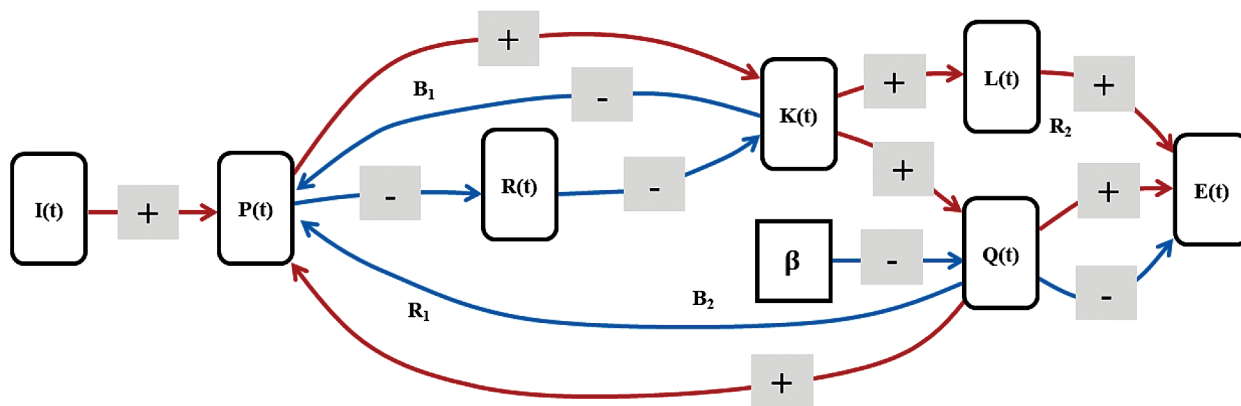


Диаграмма причинно-следственных связей эффективности текстильного производственного кластера: модель системной динамики:  $P(t)$  – объем производства,  $Q(t)$  – качество продукции,  $K(t)$  – уровень кооперации,  $L(t)$  – эффективность логистики,  $R(t)$  – доступность ресурсов,  $I(t)$  – инвестиции в модернизацию,  $\beta$  – коэффициент износа оборудования,  $E(t)$  – интегральная эффективность



Зависимость качества продукции от роста инвестиций в технологическую модернизацию и совместных проектов в кооперации определяется по формуле:

$$\frac{dQ}{dt} = \gamma * \frac{I(t)}{P(t)+1} + K(t) * Q(t) * (1-Q(t)) - \beta * (1-Q(t)), \quad (2)$$

где Q(t) – интегральный показатель качества продукции (0–1); K(t) – уровень кооперации в кластере: доля совместных проектов (0–1); γ – эффективность инвестиций; β – коэффициент износа оборудования.

В уравнении (2) учитывается возможность снижения качества продукции по причине износа оборудования. Уравнение кооперации описывает зависимость уровня кооперации в кластере от наличия ресурсов:

$$\frac{dK}{dt} = \sigma * \left( \frac{P(t)}{P_{max}} \right) * (1 - K(t)) - 0,1 * (1 - (t)), \quad (3)$$

где K(t) – уровень кооперации в кластере: доля совместных проектов (0–1); P(t) – объем производства (ед/год); R(t) – доступность ресурсов: сырье, энергия (0–1); δ – скорость роста кооперации. Кооперация акторов усиливается при росте производства и ослабевает, когда возникает дефицит ресурсов. Уравнение логистики описано формулой:

$$L(t) = L_0 + 0,3 * \ln \left( 1 + \frac{I(t)}{I_0} \right) * K(t), \quad (4)$$

где L(t) – эффективность логистики (0–1); K(t) – уровень кооперации в кластере: доля совместных проектов (0–1); I(t) – инвестиции в модернизацию (руб/год).

Эффективность логистики находится в зависимости от инвестиций в модернизацию и уровня развития кооперации. Обозначим условия, ограничивающие рост, следующими формулами.

1. Ресурсные ограничения.

$$R(t) = \min \left( 1, \frac{A(t)}{D(t)} \right), \quad (5)$$

где A(t) – доступные ресурсы (сырье, энергия) в момент t; D(t)=P(t)\*(1+β) – потребность в ресурсах.

Если доступных ресурсов больше потребности A(t)>D(t), рост производства не ограничен R(t)=1. Если ресурсов не хватает A(t)<D(t), производство масштабируется пропорционально росту доступности ресурсов:  $R(t) = \frac{A(t)}{D(t)} < 1$ .

2. Инвестиционный порог – точка бифуркации, представлен формулой:

$$I(t) \geq I_{min}, \quad (6)$$

где I<sub>min</sub> – минимальные затраты на поддержание производственных мощностей.

Если I(t) < I<sub>min</sub>, это означает, что оборудование в момент t не ремонтируется, а следовательно, растет коэффициент износа оборудования β, снижается качество Q(t) и объем выпуска P(t), потребуются дополнительные затраты из-за неэффективности.

3. Баланс качества и затрат, влияющий на экспоненциальный предел качества через ограниченные S-образной кривой роста, обозначен формулой:

$$Q(t) \leq Q_{max} = 1 - e^{-k * I(t)}, \quad (7)$$

где Q<sub>max</sub> – технологический предел качества при данных инвестициях; k – коэффициент эффективности вложений.

При I(t) = 0 : Q<sub>max</sub> = 1 - e<sup>0</sup> = 0; при I(t) → ∞ : Q<sub>max</sub> → 1. Все три условия отражают нелинейность производственных процессов. Интегральный показатель эффективности будет определяться формулой:

$$E(t) = \sqrt{P(t) * Q(t) * K(t) * L(t) * R(t)}, \quad (8)$$

где E(t) – интегральный показатель эффективности; P(t) – объем производства (ед/год); Q(t) – интегральный показатель качества продукции; K(t) – уровень кооперации в кластере; L(t) – эффективность логистики; R(t) – доступность ресурсов.

Декомпозиция системно-динамической модели управления качеством в текстильном кластере представлена в таблице.

Таблица систематизирует математический аппарат, обеспечивает комплексную декомпозицию системно-динамической модели. Четкое определение категорий (состояние, вспомогательные, вход, параметры) и диапазонов значений переменных существенно облегчает анализ динамики системы, выявление точек бифуркации (например, при I(t) < I<sub>min</sub>) и оценку чувствительности E(t) к изменениям ключевых факторов.

Таким образом, по условиям данной системно-динамической модели максимизация E(t) требует роста всех компонент эффективности промышленного кластера (формулы 1–4) при управлении качеством продукции в условиях ограничений (формулы 5–7). Разработанная системно-динамическая модель предоставляет инструментарий для комплексного анализа и управления эффективностью текстильного промышленного кластера и наглядно демонстрирует нелинейную зависимость качества продукции от инвестиций в модернизацию и кооперацию, наличие технологического предела качества и влияние износа оборудования, требующего стандартизации процедур обслуживания.

Параметры и переменные системно-динамической модели управления качеством в текстильном кластере

Обозначение	Наименование параметра	Единица/диапазон измерения	Описание и формула связи
<i>Категория 1. Переменные состояния</i>			
$P(t)$	Объем производства	Ед/год	Динамический объем выпуска продукции; (1)
$Q(t)$	Интегральный показатель качества продукции	0–1	Обобщенная оценка качества; (2)
$K(t)$	Уровень кооперации в кластере	0–1 (доля совместных проектов)	Степень взаимодействия участников; (3)
<i>Категория 2. Вспомогательные переменные</i>			
$L(t)$	Эффективность логистики	0–1	Зависит от инвестиций и кооперации; (4)
$R(t)$	Доступность ресурсов	0–1	Отражает ограниченность сырья/энергии; (5)
$E(t)$	Интегральный показатель эффективности	–	Обобщающий показатель эффективности кластера; (8)
<i>Категория 3: Потoki/входные воздействия</i>			
$I(t)$	Инвестиции в модернизацию	руб./год	Основной управляющий вход, влияющий на $P(t)$ , $Q(t)$ , $L(t)$ . Подвержен ограничению по (6)
<i>Категория 4. Параметры</i>			
$\alpha$	Коэффициент влияния качества на спрос	–	Параметр чувствительности спроса к качеству в (1)
$\beta$	Коэффициент износа оборудования	–	Параметр, снижающий качество и объем производства. Учитывается в (1), (2), (5)
$\gamma$	Эффективность инвестиций	–	Параметр, определяющий отдачу от инвестиций в (1), (2)
$\delta$	Скорость роста кооперации акторов	–	Параметр скорости усиления кооперации в (1)
$\sigma$	Скорость роста кооперации	–	Параметр скорости изменения кооперации в (3)
$k$	Коэффициент эффективности вложений в качество	–	Параметр, определяющий технологический предел качества в ограничении (7)
$I_{min}$	Минимальные инвестиции на поддержание мощностей	руб.год	Пороговое значение инвестиций; ограничение (6). При $I(t) < I_{min}$ растет износ ( $\beta$ )
$P_{max}$	Максимальный объем производства	Ед/год	Значение для расчета кооперации в (3)
$L_0$	Базовый уровень эффективности логистики	0–1	Начальное/минимальное значение $L(t)$ в (4)
$I_0$	Базовый уровень инвестиций в логистику	Руб/год	Параметр масштаба в (4)

Практическая ценность модели заключается в возможности прогнозирования развития текстильных кластеров на основе сбалансированного роста качества, кооперации, логистики и ресурсной эффективности. Дальнейшие исследования будут направлены на верификацию модели с учетом факторов кадрового потенциала и экологических стандартов.

Источники

- Смородинская Н.В., Катуков Д.Д. Курс на технологический суверенитет: новый глобальный тренд и российская специфика // Балтийский регион. 2024. Т. 16. № 3. С. 108–135.
- Волкова О. Торговля по дружбе: издержки френдшоринга [Электронный ресурс]. ECONS.ONLINE. 2023. 9 января. URL:<https://econs.online/>



articles/ekonomika/torgovlya-po-druzhbe-izderzhkifrendshoringa/?ysclid=mdobk8ngza768699796

3. Российский рынок легпрома: итоги 2023 года [Электронный ресурс]. Агентство РСТ. 2024. 28 мая. URL: <https://www.rctest.ru/news/rossijskij-rynok-legproma-itogi-2023-goda.html?ysclid=mdobo53zmm829235278>

4. Пудовкина О.Е., Иваев М.И., Сафронов Е.Г., Нарыжная Н.Ю. Кластеризация в промышленности как потенциал для развития технологичной экономики // Креативная экономика. 2024. Т. 18. № 2. С. 323–336.

5. Костенко О.В., Оленин О. А Оценка развития кластеров: цели, объекты и критерии // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15. № 6. URL: <https://esj.today/PDF/94ECVN623.pdf>

6. Короткевич А.И., Цяо Т. Современные подходы к оценке эффективности деятельности инно-

вационно-промышленных кластеров // Экономическая наука сегодня: Сб. науч. ст. / БНТУ. Минск, 2023. Вып. 18. С. 88–96.

7. Савельев И.И., Оборин М.С. Инструменты проектного сотрудничества кластеров текстильной промышленности на региональных рынках // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2023. № 6. С. 26–36.

8. Донцова О.И. Цифровая трансформация системы управления промышленными кластерами // Вопросы инновационной экономики. 2022. Т. 12. № 2. С. 897–910.

9. Палуанов Б.А., Пирматов А.П., Толыбаев А.Р., Абатов М.А. Анализ характеристик технологических процессов хлопко-текстильного кластера // Universum: технические науки. 2024. № 3(120). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17070>

## References

1. Smorodinskaya N.V., Katukov D.D. Moving towards technological sovereignty: a new global trend and the russian specifics. // Baltic Region. 2024, vol. 16. no. 3. Pp. 108-135.
2. Volkova, O. Friendly Trade: The Costs of Friendshoring, ECONS.ONLINE. January 9, 2023. URL: <https://econs.online/articles/ekonomika/torgovlya-po-druzhbe-izderzhkifrendshoringa/?ysclid=mdobk8ngza768699796>
3. Russian Light Industry Market: 2023 Results. // Russian Textile Association (RSTA), May 28, 2024. URL: <https://www.rctest.ru/news/rossijskij-rynok-legproma-itogi-2023-goda.html?ysclid=mdobo53zmm829235278>
4. Pudovkina, O.E., Ivaev, M.I., Safronov, E.G., Naryzhnaya, N.Y. Industrial clustering as a potential for the development of the technological economy // Creative Economy. 2024. vol. 18 no. 2. Pp. 323-336.
5. Kostenko O.V., Olenin O.A. Assessment of cluster development: goals, objects and criteria, The Eurasian Scientific Journal. 2023, vol. 15 no. 6. URL: <https://esj.today/PDF/94ECVN623.pdf>.
6. Korotkevich F.I., Qiao T. Modern approaches to assessing the efficiency of innovation-industrial clusters // Economic science today. 2023, no. 15. Pp. 88-96.
7. Savelev I.I., Oborin M.S. Project Collaboration Tools for Textile Industry Clusters in Regional Markets // Bulletin of Higher Educational Institutions. Textile Industry Technology. 2023. no. 6. Pp. 26-36.
8. Dontsova O.I. Digital transformation of the industrial cluster management system // Russian journal of innovation economics. 2022. vol. 12 no. 2. Pp. 897-910.
9. Paluanov B.A., Pirmatov A.P., Tolibaev A.R., Abatov M.A. Analysis of characteristics of technological processes of the cotton-textile cluster. // Universum: technical sciences, 2024. 3(120). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17070>.

# Применение методов и инструментов управления качеством для обоснования выбора методик измерений (на примере количественного химического анализа)

## Л.Н. Третьяк

ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», заведующий кафедрой метрологии, стандартизации и сертификации, д-р техн. наук, доцент;  
г. Оренбург  
e-mail: tretyak\_ln@mail.ru

## А.С. Вольнов

ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», доцент кафедры метрологии, стандартизации и сертификации, канд. техн. наук;  
г. Оренбург  
e-mail: Volnov\_AS@mail.ru

## Д.А. Косых

ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», доцент кафедры метрологии, стандартизации и сертификации, канд. экон. наук, доцент;  
г. Оренбург  
e-mail: kosich1975@rambler.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются ключевые аспекты обоснования выбора методик измерений с использованием методов и инструментов управления качеством. Обоснованы достоинства применения методов и инструментов управления качеством, позволяющие провести объективный выбор методик измерений в аккредитованных испытательных лабораториях. Среди критериев выбора методов и инструментов управления качеством особое внимание уделяется анализу, решению проблем, управлению временем, планированию, повышению эффективности, совершенствованию процессов. Авторами разработан алгоритм выбора методики измерений с использованием методов и инструментов управления качеством. Приведены примеры использования методов и инструментов

управления качеством при выборе методик измерений количественного содержания металлов в сточных водах. Результаты исследования могут быть полезны специалистам в области управления качеством, метрологии и производственного менеджмента для повышения точности и минимизации рисков измерительных процессов.

**Ключевые слова:** алгоритм, испытательная лаборатория, количественный химический анализ, критерии выбора, методика измерений, метод и инструмент, управление качеством.

**Summary.** The article discusses key aspects of substantiating the choice of measurement methods using quality management methods and tools. The advantages of using quality management methods and tools are substantiated, allowing for an objective choice of measurement methods in accredited testing laboratories. Among the criteria for choosing quality management methods and tools, special attention is paid to: analysis, problem solving, time management, planning, increasing efficiency, and improvement. The authors have developed an algorithm for choosing a measurement technique using quality management methods and tools. Examples of using quality management methods and tools when choosing methods for measuring the quantitative content of metals in wastewater are given. The results of the study can be useful to specialists in the field of quality management, metrology and production management to improve accuracy and minimize the risks of measurement processes.

**Keywords:** algorithm, testing laboratory, quantitative chemical analysis, selection criteria, measurement technique, method and tool, quality management.

## Введение

Методики измерений (испытаний, контроля, анализа) разрабатываются и применяются для обеспечения достоверных, воспроизводимых резуль-



татов измерений с заранее заданной точностью (погрешностью, неопределенностью) измерений. Следует подчеркнуть, что в отношении методик измерений (МИ) находит равнозначное применение как термин «методики выполнения измерений» (ГОСТ 8.010-2013 «ГСИ. Методики выполнения измерений»), так и более конкретный термин «методики (метод) измерений» (стандартизован на национальном уровне в ГОСТ Р 8.563-2009 «Методики (метод) измерений»). Получение результатов измерений с нормированной погрешностью или с погрешностью, не превышающей допустимых пределов, в метрологической практике принято одним из важнейших условий обеспечения качества измерений. Этот факт предопределяет рассматривать МИ как основной элемент метрологического обеспечения измерений, применение которого вызвано объективными причинами. Для обеспечения единства измерений недостаточно знать только погрешность средств измерений, необходимо также учитывать в качестве составляющих погрешности (неопределенности) МИ, погрешности (ошибки), вносимые оператором, а также обусловленные внешними условиями (факторами). Требования к МИ как к объектам стандартизации в области государственной системы обеспечения единства измерений регламентированы в Российской Федерации различными документами, которые принято рассматривать как иерархическую систему. Среди подобных нормативных документов выделяют межгосударственные (ГОСТ) и национальные стандарты (ГОСТ Р) на типовые методики (методы) измерений; методики измерений (МИ); методические указания (МУ, МУК); методические рекомендации (МР); природоохранные нормативные документы федерального уровня (ПНД Ф); другие нормативные акты, обязательные и (или) рекомендуемые к исполнению.

Выбор оптимальных по требованиям МИ – критически важный этап, поскольку от него зависят достоверность полученных результатов измерений и соответствие произведенной продукции или оказанных услуг установленным требованиям. Методы и инструменты управления качеством (УК) позволяют обоснованно подходить к выбору МИ, минимизируя погрешности (неопределенности) и повышая достоверность полученных результатов измерений. Потребность заказчика в МИ может быть также связана с необходимостью выбора аккредитованной лаборатории, в которой он планирует проведение исследований. Причем лаборатория также может выступать в качестве заказчика, например, при расширении области аккредитации. Следует подчеркнуть, что под инструментами УК принято понимать «методы и (или) средства, пред-

назначенные для сбора, представления, обработки, оценки состояния, анализа данных, применяемых в управлении качеством» [1].

Согласно ГОСТ Р 56407-2015 «Бережливое производство. Основные методы и инструменты», термин «инструмент» трактуется как «средство осуществления действий, направленных на решение определенных задач или достижение определенной цели», а термин «метод» – как «систематизированная совокупность шагов, действий, которые необходимо предпринять, чтобы решить определенную задачу или достичь определенной цели». Многие из методов и инструментов УК относят к статистическим методам, которые ГОСТ Р ИСО 3534-2-2019 «Статистические методы. Словарь и условные обозначения. Часть 2. Прикладная статистика» определяет как «методы сбора, анализа и интерпретации данных под воздействием случайности». По мнению авторов статьи, неоднозначность трактования этих терминов в нормативных документах, учебных пособиях и научной литературе создает информационную неопределенность, что в свою очередь затрудняет отличие методов от инструментов УК при их классификации.

Цель исследования – обосновать возможность и предложить практические рекомендации по применению методов и инструментов УК для выбора МИ.

Объект исследования – МИ и инструменты их оптимизации, направленные на повышение точности и эффективности контроля качества в лабораторных и производственных условиях.

Предмет исследования – требования к методикам количественного химического анализа, применяемым в лабораторной практике.

Материалы и методы исследования

Для достижения поставленной цели использованы общенаучные методы исследования, процессный и системный подходы, положения современного состояния теории и практики управления качеством, функционального моделирования, принципы Всеобщего управления качеством (TQM).

*Результаты и их обсуждение*

В практике аккредитованных испытательных лабораторий особую значимость приобретает научно обоснованный подход к выбору МИ. Применение методов и инструментов УК при выборе МИ, на наш взгляд, позволит не только реализовать системный подход, но и обеспечить объективность выбора, а также повысить степень удовлетворения потребностей заинтересованных сторон: заказчика и испытательной лаборатории (рис. 1).

На основе анализа ГОСТ Р ИСО 13053-1-2015, ГОСТ Р ИСО 13053-2-2015, а также литературных

источников [2–5] нами систематизированы основные методы и инструменты УК (табл. 1), которые предлагаются для выбора МИ. Характеристика возможностей применения рекомендуемых нами критериев приведена далее:

– «анализ» позволяет оценить способность той или иной МИ обеспечивать достоверные данные

для статистической обработки и принятия обоснованных решений;

– «решение проблем» позволяет оценить возможность МИ минимизировать погрешности и неопределенности результатов измерений;

– «управление временем» позволяет оценить эффективность МИ с точки зрения скорости выполнения измерений без потери точности;

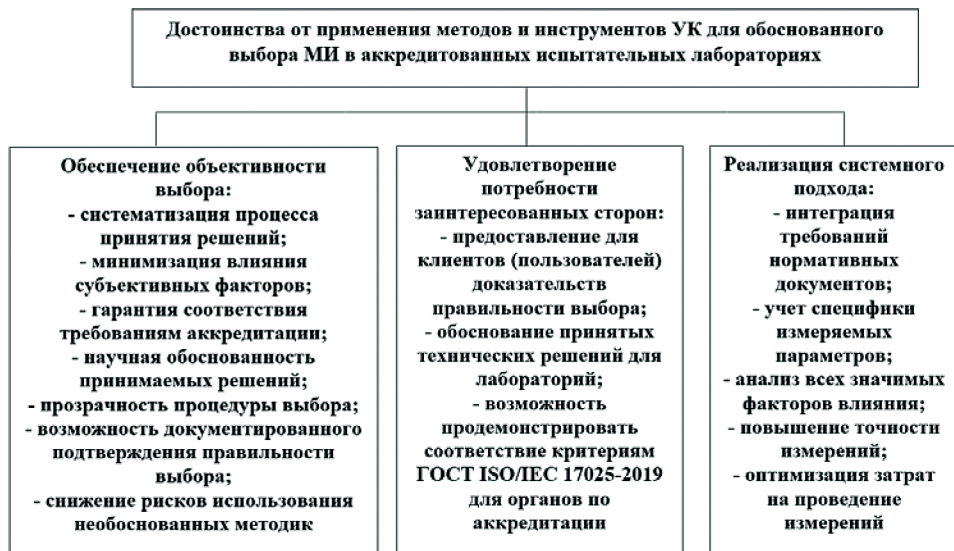


Рисунок 1. Основные достоинства применения методов и инструментов УК для выбора МИ в аккредитованных испытательных лабораториях

Источник: разработано авторами статьи

Таблица 1. Фрагмент матрицы возможностей методов и инструментов УК для выбора МИ

Метод и инструмент УК	Возможности метода и инструмента УК для выбора МИ	Критерии выбора методов и инструментов УК					
		Анализ	Решение проблем	Управление временем	Планирование	Повышение эффективности	Совершенствование
Анализ поля сил	Выявление преимуществ и недостатков каждой из рассматриваемых МИ. Оценка влияния внешних и внутренних факторов на внедрение, определение оптимального варианта, минимизирующего риски	+			+	+	+
Анализ безубыточности	Сравнение экономической эффективности различных МИ. Определение оптимального объема измерений. Обоснование инвестиций в оборудование. Минимизация затрат без потери качества контроля	+			+	+	
Анализ взаимных влияний	Оценка того, как различные факторы влияют друг на друга при выборе оптимальной МИ	+				+	+
Анализ Парето	Выделение ключевых параметров, требующих контроля, определения приоритетных МИ для наиболее важных измерений, а также оптимизация ресурсов	+					
Анализ преобразований «входов» в «выходы»	Определение требований к измерениям. Оптимизация процесса контроля качества. Выбор МИ, наиболее соответствующие целям исследования	+				+	
Анализ видов и последствий отказов (метод FMEA)	Позволяет выявить критические параметры, требующие контроля. Оценить риски некорректных измерений. Выбор оптимальных МИ с учетом возможных отказов. Разработка превентивных мер для минимизации несоответствий	+	+			+	



Метод и инструмент УК	Возможности метода и инструмента УК для выбора МИ	Критерии выбора методов и инструментов УК					
		Анализ	Решение проблем	Управление временем	Планирование	Повышение эффективности	Совершенствование
Диаграмма Ганта	Выбор оптимальной МИ через анализ временных и ресурсных затрат				+		
Причинно-следственная диаграмма	Систематизирует факторы, влияющие на выбор оптимальной МИ	+	+			+	
Диаграммы влияния	Визуализирует ключевые факторы и их взаимосвязи при выборе МИ	+	+				
Древо-видная диаграмма (FTA)	Помогает выбрать оптимальную МИ через системную оценку возможных отказов и их причин	+	+				
Жизненный цикл продукции	Обеспечивает системный подход к выбору оптимальных МИ на каждом этапе существования продукта (услуги)	+			+		
Изучение опасности и работоспособности (HAZOP)	Выявление потенциальных рисков и проблем эксплуатации при использовании МИ в производственных процессах	+	+				
Карта времени процесса (ТВРМ)	Визуализирует временные затраты, которые помогают оптимизировать процесс измерения, выбирая МИ с наилучшим соотношением точности и скорости			+		+	+
Матрица альтернативных решений	Выбор оптимальной МИ на основе взвешенной оценки ключевых критериев					+	
Матрица приоритетов (анализ матричных данных)	Позволяет системно оценивать альтернативные МИ по комплексу значимых параметров	+	+				
Мозговой штурм	Позволяет коллективно находить оптимальные решения при выборе МИ	+	+				+
Метод расстановки приоритетов (МРП)	Выбор оптимальной МИ на основе количественной оценки значимых критериев	+	+		+	+	
Производственный бенчмаркинг	Сравнения измерительных практик с лучшими отраслевыми аналогами, позволяющий выбрать оптимальные МИ	+				+	+
Пять «почему»	Поиск первопричин проблем, который помогает выбрать оптимальную МИ через анализ потребностей и ограничений	+	+				
SWOT-анализ	Позволяет системно оценить сильные и слабые стороны МИ, а также внешние возможности и угрозы	+					+

Метод и инструмент УК	Возможности метода и инструмента УК для выбора МИ	Критерии выбора методов и инструментов УК					
		Анализ	Решение проблем	Управление временем	Планирование	Повышение эффективности	Совершенствование
Контрольные карты	Помогает выбрать оптимальную МИ через анализ стабильности их результатов	+			+		
Диаграмма сродства (KJ-метод)	Помогает выявить скрытые взаимосвязи между требованиями к измерениям и доступными МИ	+			+		
Стрелочная диаграмма	Позволяет системно оценить процесс внедрения различных МИ, учитывая временные, ресурсные и технологические взаимосвязи	+		+	+		

– «планирование» позволяет оценить соответствие МИ стратегическим задачам контроля качества, включая этапность и ресурсное обеспечение;

– «повышение эффективности» позволяет выбрать МИ для оптимизации затрат (трудовых, материальных, временных) при сохранении требуемой точности;

– «совершенствование» позволяет выбрать МИ в соответствии с развитием технологий и нормативных требований.

Таким образом, выбор МИ должен основываться не только на их возможности обеспечения точности получаемых результатов, но и на других показателях, что позволит обеспечить стабильность, воспроизводимость и непрерывное улучшение процессов измерений. Как видно из табл. 1, не все методы (инструменты) УК охватывают весь перечень этих критериев, что не свидетельствует об ограниченности их применения при выборе МИ.

Для обоснованного выбора МИ с использованием предлагаемых нами методов и инструментов УК разработан алгоритм (рис. 2).

Далее приведем краткое описание этапов предлагаемого нами алгоритма.

1. На предварительном этапе определяют цели и задачи измерений. Проводят анализ нормативных документов

(ГОСТ, ТУ), а также анализ характеристик измеряемого объекта и условий проведения измерений. Выбирают конкретные параметры (величины), которые необходимо измерить.

2. Определяют подходящие методы (например, оптические, акустические, электрические, разрушающие, неразрушающие, контактные и бесконтактные) и конкретные МИ. На этом этапе проводится

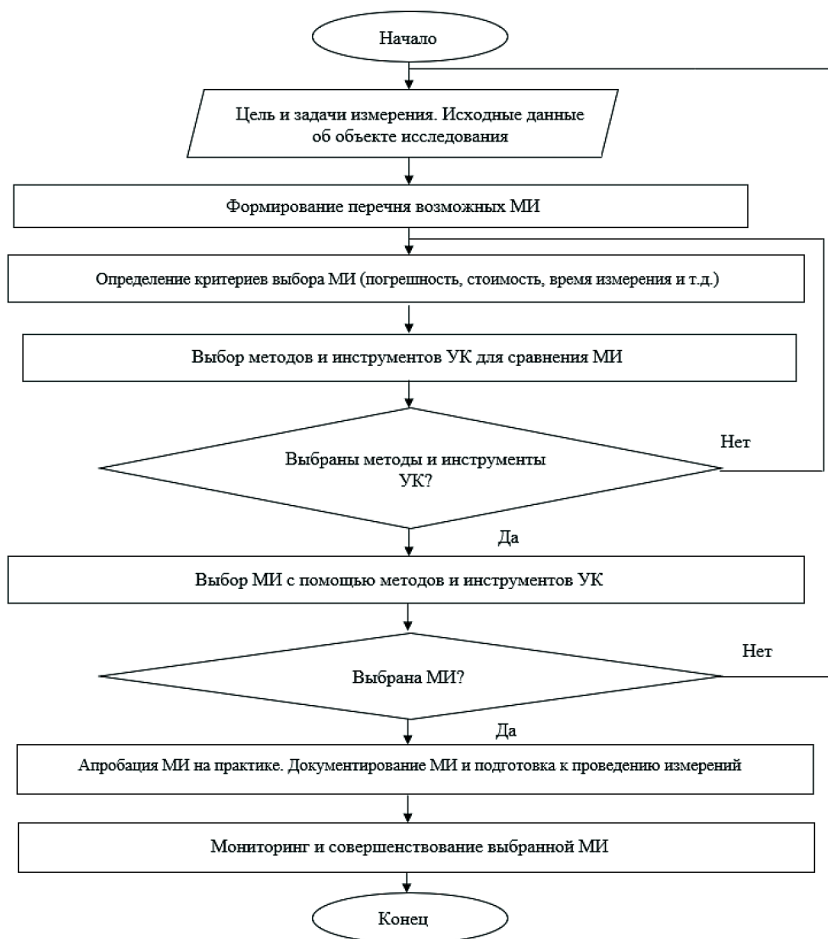


Рисунок 2. Алгоритм выбора МИ с использованием методов и инструментов управления качеством

Источник: разработано авторами статьи



анализ технико-экономических показателей измерений, а также анализ этапов, условий и времени измерений, возможных источников погрешностей. Подбирают конкретные средства измерительной техники, соответствующие поставленным задачам.

3. Выбирают методы и инструменты УК, позволяющие провести объективное сравнение с альтернативными методиками, минимизировать риски погрешностей, обеспечить соответствие стандартам, оптимизировать затраты на измерения и др. Для конкретных задач набор методов УК может адаптироваться с учетом отраслевых особенностей и доступных ресурсов. В итоге составляется матрица альтернатив.

4. Устанавливают оптимальные МИ с помощью выбранных методов и инструментов УК. Следует отметить, что методы УК должны способствовать объективному выбору альтернативных методов по критериям, к которым относятся метрологические характеристики (диапазон измерений, погрешность/неопределенность измерений, чувствительность и селективность); экономические факторы (стоимость оборудования, эксплуатационные расходы, трудоемкость); практическая реализуемость (доступность оборудования, квалификация персонала, время выполнения измерений) и др.

5. Апробация и внедрение МИ на практике. На данном этапе проводится обучение персонала, подготовка к проведению измерений, пробные измерительные эксперименты, уточнение и корректировка МИ, при необходимости калибровка (юстировка) средств измерений (СИ), валидация выбранной методики. Параллельно осуществляется документирование МИ путем составления последовательных инструкций и стандартных операционных процедур. Дополнительно могут проводиться межлабораторные сравнительные испытания.

6. На заключительном этапе необходимо осуществлять:

- мониторинг и совершенствование МИ на основе анализа накопленных результатов наблюдений;
- корректирующие и предупреждающие действия;
- адаптацию к изменяющимся условиям;
- периодический контроль качества измерений с использованием контрольных карт;
- подтверждение метрологической пригодности СИ и аудит измерительных процессов.

Реализация этапов алгоритма позволит обеспечить выбор необходимой МИ под потребности заинтересованных сторон.

### Пример реализации

Апробация разработанных предложений проведена нами в процессе исследований по оценке экологической безопасности придорожной территории автомобильных дорог, которая определялась по фактическому содержанию металлов. Объектом исследования принят снежный покров, отобранный в непосредственной близости от автомобильных дорог. На ранних этапах исследования [6] авторами статьи был обоснован системный подход к рассматриваемой проблеме, концентрации металлов приняты как индикаторы загрязнений от источников выбросов автотранспортных средств при их эксплуатации. Для анализа пробы талого снега применялись методики сточных вод. Следует учесть, что выбор МИ зависит от ее доступности для испытательной лаборатории, а также от степени доверия заказчика к предлагаемой лабораторией МИ. Нами проведен анализ актуальных стандартизованных МИ определения количественного содержания металлов в сточных водах, наиболее часто применяемых в лабораторной практике (табл. 2), а именно:

– МИ массовых концентраций кобальта, никеля, меди, цинка, хрома, марганца, железа, серебра, кадмия и свинца в пробах питьевых, природных и сточных вод методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ПНД Ф 14.1:2:4.139-98);

– МИ массовых концентраций бериллия, ванадия, висмута, кадмия, кобальта, меди, молибдена, мышьяка, никеля, олова, свинца, селена, серебра, сурьмы и хрома в пробах питьевых, природных и сточных вод методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией (ПНД Ф 14.1:2:4.140-98);

– МВИ массовых концентраций ионов хрома, железа, висмута, марганца, кобальта, никеля, меди, свинца, цинка, ртути в водных средах с использованием преобразователя ИП-ТМ-Д рентгенофлуоресцентным методом (ПНД Ф 14.1:2:4.133-98).

Перечисленные выше МИ позволяют выявить и оценить состав и концентрации групп металлов, причем общей для анализируемых методик является возможность определения содержания кобальта, никеля, свинца, меди и хрома. Методами УК, позволяющими сравнить и выбрать удовлетворяющую требованиям к методике для экологической оценки придорожной территории, нами приняты Матрица приоритетов (анализ матричных данных) и Метод расстановки приоритетов. Их применение рекомендуется для проведения предварительного анализа МИ по качественным и количественным характеристикам. Все предлагаемые нами методы УК подразумевают, что ими будут пользоваться высококвалифицированные эксперты, обладающие

знаниями как в области менеджмента качества, так и владеющие особенностями применения МИ.

**Таблица 2. Характеристики методик количественного определения металлов в сточных водах**

Методика	Диапазон измерений, мг/дм <sup>3</sup>	Объем пробы, дм <sup>3</sup>	Погрешность (неопределенность) метода, %
ПНД Ф 14.1:2.4.139-98	От 0,005 до 10	0,25	17–42
ПНД Ф 14.1:2.4.140-98	От 0,00002 до 100	От 0,5 до 1,0	15–60
ПНД Ф 14.1:2.4.133-98	От 0,005 до 0,1	1,0	25–50

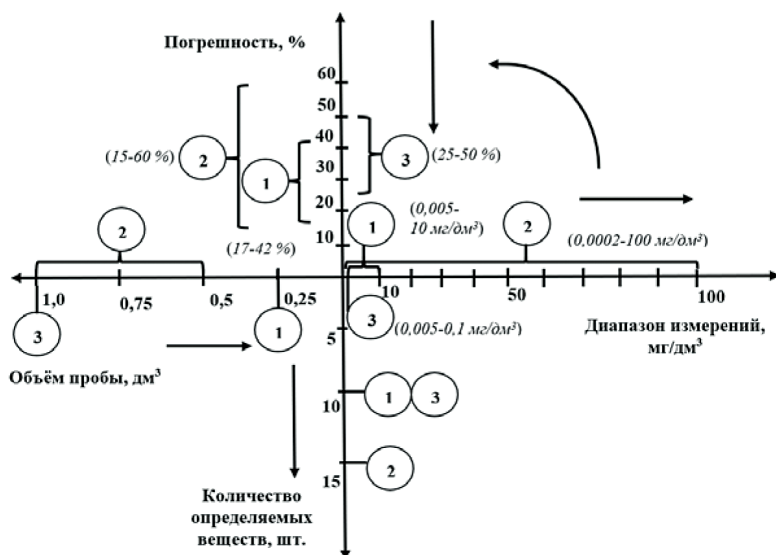
Предварительный (первичный) анализ МИ проведен нами с применением матрицы приоритетов (анализ матричных данных). В качестве критериев для сравнения могут быть выбраны различные характеристики сравниваемых МИ: количество определяемых (измеряемых) веществ; диапазон измерений концентраций веществ; стоимость средств измерений, вспомогательного оборудования, реактивов и материалов; условия измерений; время, условия отбора и хранения проб; особенности приготовления растворов и подготовки проб к анализу; сложность выполнения измерений; наличие проце-

дур оперативного контроля точности результатов измерений и др. (рис. 3).

С учетом требуемого диапазона измерений, количества определяемых веществ, минимальной погрешности и объема отбираемой пробы применение матрицы приоритетов позволило нам для дальнейших исследований выбрать МИ массовых концентраций железа, кадмия, кобальта, марганца, никеля, меди, цинка, хрома и свинца в питьевых поверхностных и сточных водах методом пламенной атомно-абсорбционной спектрометрии (ПНД Ф 14.1:2.4.139-98).

В условиях многокритериальных задач для выбора МИ может быть использован метод расстановки приоритетов, который обладает преимуществом как по количеству сравниваемых объектов, так и по количеству выбранных критериев. В рамках реализации этого метода для сравнения выбираются объекты и критерии, составляется матрица исходных данных (табл. 3), а также матрица парных сравнений, служащая основой для определения рангов выбранных вариантов МИ по каждому критерию, после чего рассчитываются коэффициенты оценки знаков отношений между критериями. На заключительном этапе анализа строится матрица относительных приоритетов (табл. 4).

На основе полученных с помощью методов УК результатов можно сделать вывод о том, что ПНД Ф 14.1:2.4.139-98 является приоритетным для проведения экологической оценки природо-рожной территории автомобильных дорог г. Оренбурга по количественному признаку, поскольку обладает наилучшими количественными показателями. Данная МИ может применяться для анализа в любых лабораторных условиях, поскольку не требует специальных и сложных для приготовления растворов и материалов.



1 – ПНД Ф 14.1:2.4.139-98; 2 – ПНД Ф 14.1:2.4.140-98;  
3 – ПНД Ф 14.1:2.4.133-98

- ↙ – направление обхода при анализе;
- – направление желаемого изменения рассматриваемого показателя

**Рисунок 3. Результаты анализа выбора МИ с помощью матрицы приоритетов**

Источник: разработано авторами статьи



Таблица 3. Матрица исходных данных

Сравниваемая характеристика	Методика измерений		
	ПНД Ф 14.1:2:4.139-98	ПНД Ф 14.1:2:4.140-98	ПНД Ф 14.1:2:4.133-98
Диапазон измерений концентраций веществ, мг/дм <sup>3</sup>	От 0,005 до 10	От 0,00002 до 100	От 0,005 до 0,1
Погрешность (неопределенность) метода, %	17–42	15–60	25–50
Объем проб, дм <sup>3</sup>	0,25	От 0,5 до 1	1
Срок хранения проб, ч	4	48	12
Ориентировочная стоимость основного оборудования, руб.	3 350 000	3 540 000	4 000 000

Источник: разработано авторами статьи

Таблица 4. Матрица относительных приоритетов

Нормативный документ, регламентирующий методику	Критерии					Относительный приоритет
	Диапазон измерений веществ (0,25)	Погрешность (неопределенность) метода (0,31)	Объем проб (0,19)	Срок хранения проб (0,15)	Стоимость основного оборудования (0,1)	
ПНД Ф 14.1:2:4.139-98	0,33	0,42	0,50	0,42	0,60	0,43
ПНД Ф 14.1:2:4.140-98	0,50	0,17	0,25	0,42	0,20	0,31
ПНД Ф 14.1:2:4.133-98	0,17	0,42	0,25	0,17	0,20	0,26

Источник: разработано авторами статьи

## Выводы

Приведенные в статье методы и инструменты УК рекомендуются нами для выбора наиболее оптимальной МИ. Их применение значительно упростит поиск МИ и позволит учесть наиболее важные критерии. Выбор МИ должен основываться на комплексном анализе показателей точности и других нормативных требованиях, а также учитывать ее эффективность. Использование методов и инструментов УК позволит оптимизировать измерительный процесс, их применение должно быть направлено на повышение достоверности результатов измерений. Выбранная по критериям МИ должна пройти этап апробации перед ее внедрением на практике. Дальнейшие исследования могут быть направлены на внедрение цифровых технологий при разработке метрологического обеспечения измерений.

## Источники

1. Инструменты управления качеством [Электронный ресурс]. Научно-образовательный портал «Большая российская энциклопедия». URL: <https://bigenc.ru/c/instrumenty-upravleniia-kachestvom-04898c>
2. Чернышова М.А., Утешева А.Ю. Статистические методы анализа и управления качеством // Прикаспийский журнал: Управление и высокие технологии. 2009. № 3. С. 100–106.
3. Томохова И.Н., Рыжова Н.А. О многообразии и классификации средств и методов управления качеством // Сервис PLUS. 2008. № 4. С. 87–91.

4. Косяк Е.Д., Плотникова И.В., Шевелева Е.А. Применение инструментов качества в управлении инновационными процессами на предприятии // Компетентность. 2022. № 9–10. С. 49–53.

5. Дюдина О.В. Инструменты управления качеством инновационного продукта на промышленных предприятиях // ВЭПС. 2010. № 2. С. 13–16.

6. Вольнов А.С., Третьяк Л.Н. О системном подходе к оценке влияния автотранспортных средств в процессе эксплуатации на экологию городов // Вестник Оренб. гос. ун-та. 2014. № 1. С. 161–166.

## Sources

1. Quality Management Tools [Electronic resource]. Scientific and educational portal «Great Russian Encyclopedia». URL: <https://bigenc.ru/c/instrumenty-upravleniia-kachestvom-04898c>
2. Chernyshova M.A., Utesheva A.Yu. Statistical methods of quality analysis and management // Caspian Journal: Management and High Technologies. 2009. No. 3. Pp. 100–106.
3. Tomokhova I.N., Ryzhova N.A. On the diversity and classification of quality management tools and methods // Service PLUS. 2008. No. 4. Pp. 87–91.
4. Kosyak E.D., Plotnikova I.V., Sheveleva E.A. Application of quality tools in managing innovation processes at an enterprise // Competence. 2022. No. 9–10. P. 49–53.
5. Dyudina O. V. Tools for managing the quality of an innovative product at industrial enterprises // VEPS. 2010. No. 2. P. 13–16.
6. Volnov A. S., Tretyak L. N. On a systems approach to assessing the impact of motor vehicles during operation on the ecology of cities // Bulletin of the Orenburg state University. 2014. No. 1. P. 161–166.

# Обеспечение качества продукции при производстве поливинилхлорида и битумных эмульсий

**Д.М. Бободжонов,**

аспирант ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»;  
г. Иркутск  
e-mail: jumaboytj@mail.ru

**Аннотация.** В статье представлены результаты применения универсальной математической модели движения сплошной среды для обеспечения качества при производстве поливинилхлорида (ПВХ) суспензионного и битумных эмульсий. Разработан алгоритм математической модели, учитывающий особенности линейного движения компонентов по трубопроводам и их перемешивания в технологических установках. Данный алгоритм, первоначально разработанный для обеспечения принципов ХАССП, демонстрирует универсальность применения в различных отраслях промышленности, где используются процессы перемещения сплошной среды.

**Ключевые слова:** поливинилхлорид, битумные эмульсии, математическая модель, сплошная среда, качество продукции.

**Summary.** The article presents the results of applying a universal mathematical model of continuous medium movement for quality assurance in the production of suspension polyvinyl chloride (PVC) and bitumen emulsions. An algorithm for the mathematical model has been developed, taking into account the peculiarities of linear movement of components through pipelines and their mixing in technological installations. This algorithm, initially developed to ensure HACCP principles, demonstrates universality of application in various industries where continuous medium movement processes are used.

**Keywords:** polyvinyl chloride, bitumen emulsions, mathematical model, continuous medium, product quality.

## Введение

Современные промышленные производства, основанные на движении сплошной среды, сталкиваются с комплексом технологических вызовов, требующих научного подхода к обеспечению качества продукции. Особую значимость имеют технологические процессы перемешивания и смешения, основанные на движении сплошной среды и детерминированном формировании однородности гетерогенных смесей, которые лежат в основе многих стратегически важных отраслей.

Производство поливинилхлорида суспензионного и битумных эмульсий объединяет наличие процессов линейного движения компонентов по трубопроводам и их последующего перемешивания для формирования гетерогенных смесей, что создает предпосылки для разработки универсальных подходов к обеспечению качества продукции на основе структурного анализа и интеграции технологических процессов.

Целью данной работы является представление результатов применения разработанной математической модели движения сплошной среды для обеспечения качества при производстве поливинилхлорида суспензионного и битумных эмульсий.

Разработанный алгоритм математической модели основан на анализе движения сплошной среды на двух ключевых этапах технологического процесса, которые являются общими для производства как ПВХ, так и битумных эмульсий:

- линейное движение компонентов по трубопроводам;
- процесс перемешивания компонентов в реакторе/диспергаторе.

## Этап 1. Линейное перемещение компонентов по трубопроводам

Для описания движения компонентов по трубопроводам используется система уравнений Навье – Стокса, включающая уравнение движения сплошной среды и уравнение неразрывности.



Уравнение движения сплошной среды – векторное уравнение, выражающее баланс импульса для сплошной среды, имеет вид:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \nabla \cdot \vec{T} + \rho \vec{f} \quad (1),$$

где:

$\rho$  – плотность в точке;

$\vec{v}$  – скорость в точке;

$\frac{d}{dt}$  – материальная (полная) производная;

$\vec{T}$  – тензор напряжений Коши;

$\vec{f}$  – вектор внешних массовых сил.

В прямоугольной декартовой системе координат три проекции уравнения движения сплошной среды имеют вид:

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) &= \frac{\partial p_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{xz}}{\partial z} + \rho F_x, \\ \rho \left( \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) &= \frac{\partial p_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{yz}}{\partial z} + \rho F_y, \\ \rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) &= \frac{\partial p_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zz}}{\partial z} + \rho F_z, \end{aligned} \quad (2),$$

где:

$\rho(x, y, z, t)$  – плотность сплошной среды;

$v_x(x, y, z, t)$ ,  $v_y(x, y, z, t)$ ,  $v_z(x, y, z, t)$  – проекции скорости среды;

$p_{ij}$  – компоненты тензора напряжений;

$F_x(x, y, z, t)$ ,  $F_y(x, y, z, t)$ ,  $F_z(x, y, z, t)$  – компоненты вектора массовой плотности объемных сил.

Уравнение непрерывности для движения сплошной среды, содержащей суспензию, имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_k \frac{\partial \rho}{\partial x_k} + \rho \frac{\partial v_k}{\partial x_k} = 0 \quad (3),$$

где:

$v_k$  – компоненты вектора скорости;

$x_k$  – пространственные координаты.

## Этап 2. Перемешивания компонентов в реакторе/диспергаторе

Для описания процесса перемешивания компонентов в реакторе/диспергаторе используется модель планетарного движения мешалки. Планетарное движение месильного устройства, сочетающее вращение вокруг собственной оси и вокруг оси реактора, обеспечивает эффективное перемешивание компонентов.

При вращении тела вокруг двух пересекающихся осей результирующее движение тела является мгновенным вращением вокруг оси с угловой скоростью  $\vec{\omega}$ , равной геометрической сумме угловых скоростей:

$$\vec{\omega} = \vec{\omega}_1 + \vec{\omega}_2 \quad (4),$$

где:

$\vec{\omega}$  – результирующая угловая скорость;

$\vec{\omega}_1$  – угловая скорость вращения мешалки вокруг собственной оси;

$\vec{\omega}_2$  – угловая скорость вращения мешалки вокруг оси реактора.

В случае постоянного момента инерции основное уравнение динамики вращательного движения принимает вид:

$$M = J \varepsilon \quad (5),$$

где:

$M$  – момент силы,

$J$  – момент инерции,

$\varepsilon$  – угловое ускорение.

Такой подход к моделированию технологических процессов позволяет учесть ключевые факторы, влияющие на качество конечного продукта, как в производстве ПВХ, так и в производстве битумных эмульсий.

Применение разработанной математической модели для производства битумных эмульсий позволило выявить параметры, обеспечивающие высокое качество продукции.

Исследование влияния температуры компонентов на качество битумных эмульсий показало, что температура оказывает существенное влияние на средний размер частиц битума в эмульсии (рис. 1).

Как видно из графика, представленного на рис. 1, оптимальный температурный режим соответствует температуре битума 150°C и температуре водной фазы 50°C. При таких условиях средний размер частиц битума составляет 2–3 мкм, что обеспечивает высокую стабильность эмульсии.

При производстве битумных эмульсий критически важно контролировать температуру битума при его движении по трубопроводам. Слишком низкая температура увеличивает вязкость битума, что приводит к неравномерному течению и повышенному расходу энергии на перекачивание. Слишком высокая температура может привести к деградации битума и выделению летучих компонентов.

Разработанная математическая модель позволяет определить оптимальный температурный режим для конкретных условий производства, обеспечивая стабильное качество эмульсии и минимизацию энергозатрат.

Для проверки разработанной математической модели было проведено сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов. В табл. 1 представлены экспериментальные и расчетные значения показателя устойчивости битумных эмульсий для одного из режимов приготовления.

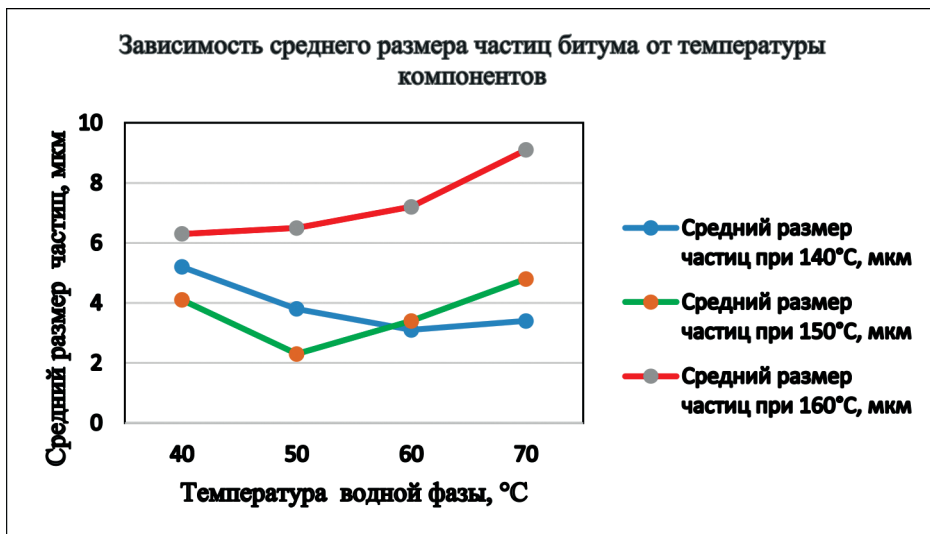


Рисунок 1. Зависимость среднего размера частиц битума от температуры компонентов

Таблица 1. Сравнение экспериментальных и расчетных значений показателя устойчивости битумных эмульсий

Режим	Температура битума, °C	Температура водной фазы, °C	Экспериментальное значение, %	Расчетное значение, %	Относительная погрешность, %
1	150	50	0,18	0,20	11,1

Как видно из табл. 1, относительная погрешность расчетных значений не превышает 11,1%, что свидетельствует о достаточной точности разработанной математической модели для практического применения.

Применение разработанной математической модели для производства ПВХ позволило выявить параметры, обеспечивающие высокое качество продукции.

Исследование влияния температуры на молекулярную массу полимера показало, что температура

оказывает существенное влияние на молекулярную массу и распределение молекулярной массы ПВХ (рис. 2).

При повышении температуры с 45°C до 85°C средняя молекулярная масса снижается с 120 000 до 70 000, а индекс полидисперсности увеличивается с 2,1 до 2,8. Оптимальная температура полимеризации, обеспечивающая требуемую молекулярную массу (90 000–100 000) и узкое распределение молекулярной массы (индекс полидисперсности: 2,2–2,4), составляет 55–65°C.

В производстве ПВХ особенно важно обеспечивать равномерное перемешивание реакционной массы в реакторе для предотвращения локальных перегревов и достижения однородности полимера. Планетарное движение мешалки, описываемое разработанной моделью, позволяет определить оптимальные параметры перемешивания.

Существенным фактором, влияющим на качество ПВХ, является также скорость и равномерность подачи компонентов в реактор. Математическая модель линейного движения компонентов по трубопроводам позволяет определить оптимальные режимы транспортировки, обеспечивающие стабильное качество полимера.

Для проверки разработанной математической модели было проведено сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов. В табл. 2 представлены экспериментальные и расчетные значения молекулярной массы полимера.

Как видно из табл. 2, относительная погрешность расчетных значений составляет 5,2%, что свидетельствует о достаточной точности разработанной математической модели для практического применения.

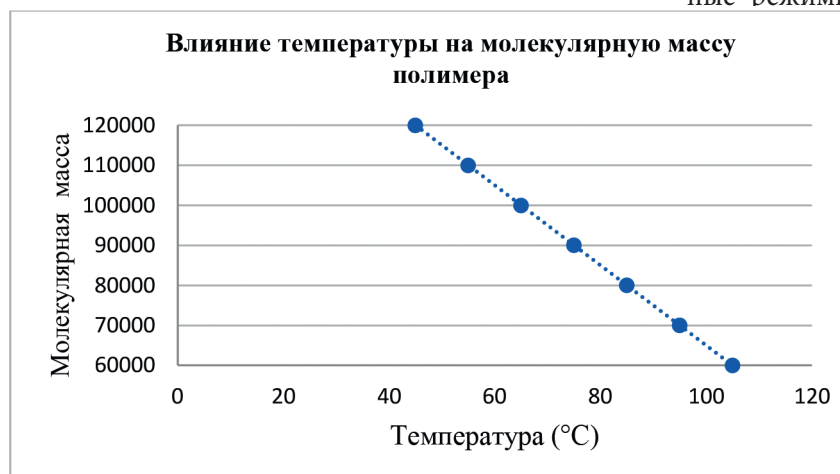


Рисунок 2. Влияние температуры на молекулярную массу полимера


**Таблица 2. Сравнение экспериментальных и расчетных данных для ПВХ**

Параметр	Экспериментальное значение	Расчетное значение	Погрешность, %
Молекулярная масса полимера	95 000	93 060	5,2

Сравнительный анализ результатов применения математической модели для производства битумных эмульсий и поливинилхлорида показал, что (несмотря на различия в физико-химических процессах) базовые принципы моделирования движения сплошной среды универсальны и применимы для обоих производств.

В табл. 3 представлены основные результаты внедрения разработанной математической модели на промышленных предприятиях.

**Таблица 3. Результаты внедрения математической модели**

Показатель	Производство битумных эмульсий	Производство ПВХ
Повышение стабильности качества	Снижение вариации среднего размера частиц с 0,9 до 0,5%	Повышение выхода продукции высшего сорта на 1,1%
Особенности применения модели	Определение оптимальных температурных режимов для транспортировки битума по трубопроводам и диспергирования в коллоидной мельнице	Расчет оптимальных параметров подачи компонентов в реактор и режимов перемешивания для обеспечения однородности полимеризации

Общими преимуществами применения математической модели для обоих производств являются:

- возможность прогнозирования качества продукции в зависимости от технологических параметров;
- улучшение технологических режимов для обеспечения требуемых показателей качества;
- снижение материальных потерь;
- повышение стабильности процесса и качества продукции.

## Заключение

В результате проведенного исследования разработан алгоритм математической модели технологического процесса на основе анализа движения сплошной среды, который успешно адаптирован для производства поливинилхлорида суспензионного и битумных эмульсий.

Ключевыми особенностями разработанной модели являются:

- учет двух основных этапов процесса: линейного движения компонентов по трубопроводам и их перемешивания в технологических установках;
- применение модели планетарного движения для описания процесса перемешивания.

Универсальность разработанной математической модели движения сплошной среды и успешность ее применения для производств различного профиля доказывают перспективность данного подхода для обеспечения качества в различных отраслях промышленности, где технологические процессы связаны с движением сплошной среды и формированием гетерогенных смесей.

## Использованные источники

1. Лонцих П.А., Бободжонов Д.М., Лившиц И.И., Буньковский В.И. Разработка алгоритма математической модели технологического процесса на основе движения сплошной среды // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2025.

2. ГОСТ Р 58952.1-2020. Дороги автомобильные общего пользования. Эмульсии битумные дорожные. Технические требования. М.: Стандартинформ, 2020. 18 с.

3. ГОСТ 14332-78. Поливинилхлорид суспензионный. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2005. 24 с.

## Source used

1. Lontsikh P.A., Bobodzhonov D.M., Livshits I.I., Bunkovskiy V.I. Development of an algorithm for a mathematical model of a technological process based on the movement of a continuous medium // Bulletin of Tula State University. Technical sciences, 2025.

2. GOST R 58952.1-2020. Public roads. Road bitumen emulsions. Technical requirements. Moscow: Standartinform, 2020. 18 p.

3. GOST 14332-78. Suspension polyvinyl chloride. Technical conditions. Moscow: Standartinform, 2005. 24 p.

# Математическое моделирование процесса создания леденцовой карамели

**А.М. Соколова**

бакалавр, ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

в г. Смоленске

e-mail: doriannagray27@mail.ru

**Аннотация.** В данной работе представлена математическая модель процесса создания леденцовой карамели с учетом основных процессов: теплового баланса, вязкости, карамелизации, испарения воды. Основой математической модели является уравнение теплового баланса, которое отражает взаимодействие испарения влаги и теплового потока. Модель также включает динамику изменения массовой доли и степень карамелизации. Особое внимание уделяется зависимости вязкости от температуры и концентрации сухих веществ, так как это сказывается на этапах производства, охлаждения и формования. Результаты моделирования отражены в графиках всех указанных процессов.

**Ключевые слова:** леденцовая карамель, математическая модель, тепловой баланс, испарение воды, карамелизация, вязкость, график.

**Summary.** This paper presents a mathematical model of the process of creating hard candy, taking into account the main processes: thermal balance, viscosity, caramelization, and water evaporation. The mathematical model is based on the thermal balance equation, which reflects the interaction between moisture evaporation and heat flow. The model also includes the dynamics of changes in mass fraction and the degree of caramelization. Special attention is given to the dependence of viscosity on temperature and the concentration of dry matter, as this affects the stages of cooling and shaping during production. The results of the modeling are presented in graphs of all these processes.

**Keywords:** hard candy, mathematical model, thermal balance, water evaporation, caramelization, viscosity, graph.

Леденцовая карамель – это сладкое лакомство, которое известно всем с детства, оно также может

быть и лекарственным препаратом (пастилки от кашля или от боли в горле).

Основные этапы производства леденцовой карамели:

- приготовление инвертного сиропа;
- уваривание карамельной массы;
- охлаждение;
- проминка;
- формование;
- упаковка и хранение.

В современной пищевой промышленности производства стремятся к оптимизации технологий, к разработке новых рецептур и совершенствованию старых, к снижению затрат на сырье, электроэнергию и т.д.

На основе ключевых показателей температуры  $T(t)$ , массовой доли воды  $\omega(t)$ , вязкости  $\eta(t)$ , теплового потока  $Q(t)$ , времени  $t$ , давления  $P$  можно создать математическую модель процессов производства леденцовой карамели [1].

Цель данной статьи – представить расчет математической модели процесса приготовления леденцовой карамели с учетом термодинамических и кинетических процессов.

В данной работе приводятся уравнения процессов, происходящих в ходе производства леденцовой карамели, такие как уравнение теплового баланса, испарения воды, вязкости и карамелизации. В последующем благодаря им можно построить математическую модель для дальнейшего практического применения [2].

Основой математической модели является уравнение теплового баланса:

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \frac{Q_{ВХ} - Q_{исп} - Q_{потерь}}{V},$$

где:  $\rho$  – плотность сиропа;

$c_p$  – удельная теплоемкость;

$Q_{вх}$  – подводимый тепловой поток;

$Q_{исп} = r \cdot \frac{dm}{dt}$  – тепловой поток на испарение воды;

$Q_{потерь}$  – тепловые потери в окружающую среду;

$V$  – объем смеси;

$r$  – удельная теплота парообразования воды;



$\frac{dm}{dt}$  — скорость испарения воды.

На начальных этапах производства леденцовой карамели происходит процесс удаления влаги, что позволяет увеличить количество сухих веществ, которое в свою очередь отвечает за снижение гигроскопичности и за условия, необходимые для начала кристаллизации. Поэтому важно учитывать данный процесс, который можно описать следующим уравнением:

$$\frac{d\omega}{dt} = -k_e \cdot (\omega - \omega_{eq}) \cdot e^{-\frac{E}{RT}},$$

где:  $\omega$  — текущая массовая доля воды;  
 $\omega_{eq}$  — равновесное содержание влаги;  
 $k_e$  — кинетическая константа испарения;  
 $E$  — энергия активации испарения;  
 $R$  — универсальная газовая постоянная;  
 $T$  — температура (в кельвинах).

Процесс карамелизации — это сложный процесс разложения и полимеризации сахаров, происходящий под действием высоких температур. Благодаря этому карамель приобретает свойственные ей цвет и вкус. От степени карамелизации зависит цвет и вкус карамели, если не соблюдать температурные и временные требования, то карамель может стать темной и начать горчить. Чтобы этого не произошло, можно воспользоваться уравнением первого порядка для процесса карамелизации:

$$\frac{dC}{dt} = k_c \cdot (1 - C) \cdot e^{-\frac{E_c}{RT}},$$

где:  $C$  — степень карамелизации (от 0 до 1);

$k_c$  — кинетическая константа реакции;  
 $E_c$  — энергия активации карамелизации.

Последний параметр, который будет рассмотрен — вязкость. Он является самым важным на этапе охлаждения и формования уваренной карамельной массы. Значение параметра может значительно отличаться в зависимости от рецептуры, влажности и температуры. Контролирование значения вязкости нужно для достижения необходимых органолептических показателей готового продукта. Уравнение для определения вязкости:

$$\eta(T, \omega) = \eta_0 \cdot e^{\frac{A}{T-T_0}} \cdot (1 - \omega)^n,$$

где:  $\eta(T, \omega)$  — вязкость карамельной массы при температуре  $T$  и массовой доле растворенных веществ  $\omega$ ;

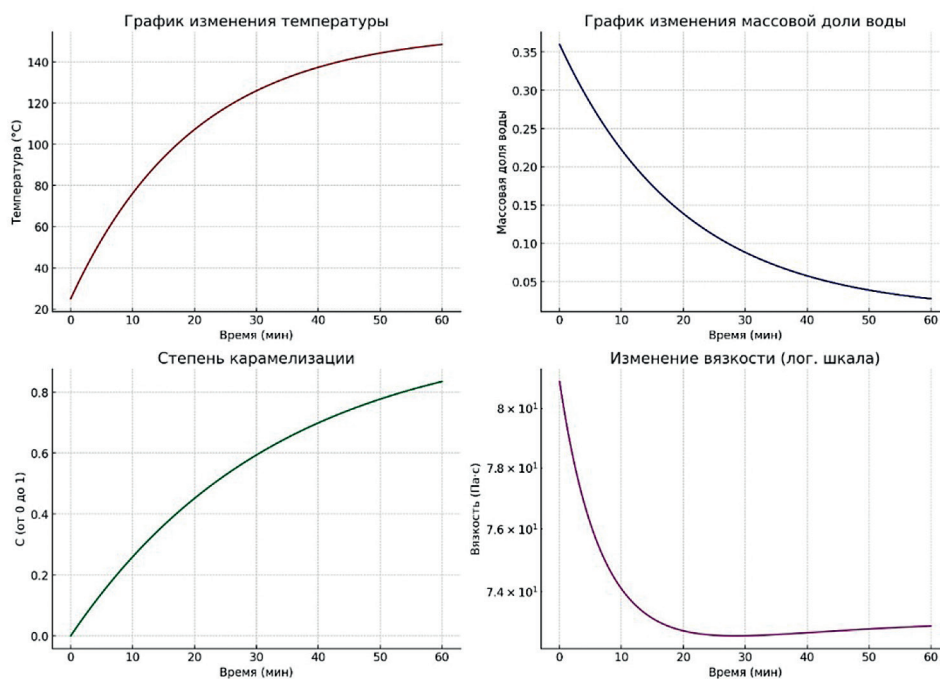
$\eta_0$  — константа базовой вязкости;  
 $e$  — основание натурального логарифма;  
 $A$  — эмпирический параметр, связанный с энергией вязкостных процессов;

$T$  — абсолютная температура карамельной массы;

$T_0$  — критическая температура (температурный сдвиг);

$\omega$  — массовая доля сухих веществ в карамели;  
 $n$  — показатель степени (эмпирический), отражающий чувствительность вязкости к изменению концентрации сухих веществ.

Результат математического моделирования процесса создания леденцовой карамели отражается на графиках изменения температуры, массовой доли воды, карамелизации и вязкости (см. рисунок).



### Результат математического моделирования

Построение модели позволяет разрабатывать новые программы для управления технологическими процессами, точно подбирать необходимые температурные, временные значения для получения нужной консистенции и вкуса будущего продукта. Математическую модель можно сделать расширенной, включив в нее показатели других процессов (инверсия сахара, кристаллизация и т.д.), а также учитывая многослойные распределения градиентов концентрации и температуры [1].

### Источники

1. Фридман Б.И. Математическое моделирование процессов в пищевой промышленности. СПб.: Профессия, 2018. 256 с.
2. Мартыненко А.Г. Пищевые технологии: физико-химические процессы. М.: Колос, 2019. 320 с.

### References

1. Fridman B.I. Mathematical Modeling of Processes in the Food Industry. St. Petersburg: Professiya, 2018. 256 p.
2. Martynenko A.G. Food Technologies: Physical and Chemical Processes. Moscow: Kolos, 2019. 320 p.



Шифр: 1.2.2  
УДК: 664.144

# Физико-математическое моделирование процесса вытягивания карамельной массы

**А.М. Соколова**

бакалавр, ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»  
в г. Смоленске  
e-mail: doriannagray27@mail.ru

**Аннотация.** В данной работе представлен процесс вытягивания карамельной массы – один из важных этапов производства леденцовой карамели, который отвечает за насыщение карамели воздухом, придание пластичности массе, а также равномерное перемешивание красителей и ароматизаторов. Приведены уравнения для создания физико-математической модели, которые отвечают за контроль охлаждения массы, описание вязкоупругого поведения массы, теплопроводности и сохранения объема. Результаты моделирования представлены в виде графиков, которые демонстрируют влияние параметров вытягивания на свойства карамели.

**Ключевые слова:** леденцовая карамель, тянущая машина, вытягивание, закон Оствальда – де Ваала, теплообмен, тепловой режим, число Пекле.

**Summary.** This paper presents the process of drawing caramel mass, which is an important step in the production of hard candy. This process is responsible for infusing the caramel with air, making the mass more plastic, and evenly mixing the dyes and flavorings. The paper provides equations for creating a physical and mathematical model that controls the cooling of the mass, describes the viscoelastic behavior of the mass, and accounts for thermal conductivity and volume preservation. The simulation results are presented in the form of graphs that demonstrate the impact of the drawing parameters on the properties of the caramel.

**Keywords:** hard candy, drawing machine, stretching, Ostwald – de Waal law, heat transfer, thermal regime, Peclet number.

Леденцовая карамель – это кондитерское изделие, которое знакомо каждому. Процесс ее созда-

ния требует постоянного контроля над показателями влажности и температуры.

Один из самых важных этапов производства – это вытягивание. Ранее карамель перетягивали вручную. В современной пищевой промышленности для увеличения производительности предприятия стремятся к автоматизации и механизации всех стадий производства [1].

Цель данной статьи – представить необходимые уравнения для создания физико-математического моделирования процесса вытягивания карамельной массы.

Процесс вытягивания необходим для равномерного перемешивания всех дополнительных компонентов, которые вносятся после уваривания карамельной массы (красители, ароматизаторы и т.д.), происходит это за счет насыщения карамели кислородом. Также этот этап производства позволяет определить степень прозрачности и матовости будущей конфеты: чем больше воздуха будет, тем матовее будет становиться масса. За счет перетягивания карамельная масса становится пластичной, что необходимо для дальнейшей ее формовки [2, 3].

В данной работе приводятся такие уравнения для физико-математического моделирования процесса перетягивания, происходящего в ходе производства леденцовой карамели, как уравнение закона Оствальда – де Ваала, условия сохранения объема, теплообмена и теплового режима (число Пекле).

Сама по себе карамельная масса – вязкоупругая жидкость с характерным поведением для неньютоновской жидкости, поэтому для моделирования используется закон Оствальда – де Ваала. Он описывает степенной закон вязкости жидкости [4]:

$$\tau = K \left( \frac{du}{dy} \right)^n$$

где:  $\tau$  – касательное напряжение;

$\frac{du}{dy}$  – градиент скорости;

$K$  – консистенция, Па·с<sup>n</sup>;

$n$  – индекс течения (0,4 – 0,6)

При перетягивании объем принято считать постоянным, однако карамельная масса увеличи-

вається в длину. В результате деформации масса насыщается кислородом и происходит уменьшение толщины пласта. Это все вытекает из условий сохранения объема:

$$V = A_0 \cdot L_0 = A \cdot L = const \rightarrow A = \frac{A_0 \cdot L_0}{L},$$

где:  $A_0, L_0$  – начальная длина и площадь сечения карамельной массы;

$A, L$  – значения после вытягивания.

При вытягивании карамельной массы важно поддерживать необходимую температуру. Стандартная температура, при которой происходит вытягивание,  $-80^{\circ}\text{C}$ , допускается  $70-75^{\circ}\text{C}$ . При такой температуре карамельная масса все еще пластична, однако если температура станет ниже, то пластичность теряется – и карамель становится хрупкой. Повышение температуры также плохо сказывается на свойствах карамельной массы, она становится текучей и плохо поддается формовке. Поэтому важно проводить оценку теплового и температурного режима, для чего нужно обратиться к уравнению теплопроводности [5]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2},$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$

где:  $\rho \cdot c$  – коэффициент температуропроводности;

$T=T(x,t)$  – температура в точке  $x$  в момент времени  $t$ ;

$\frac{\partial T}{\partial t}$  – частная производная температуры по времени;

$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$  – вторая частная производная температуры по пространственной координате.

По числу Пекле оценивается тепловой режим при вытягивании карамельной массы:

$$P_e = \frac{v \cdot L}{a},$$

где:  $v$  – скорость потока;

$L$  – длина;

$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$  – коэффициент температуропроводности,

где:

$\lambda$  – теплопроводность (для карамели –  $0,21 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ );

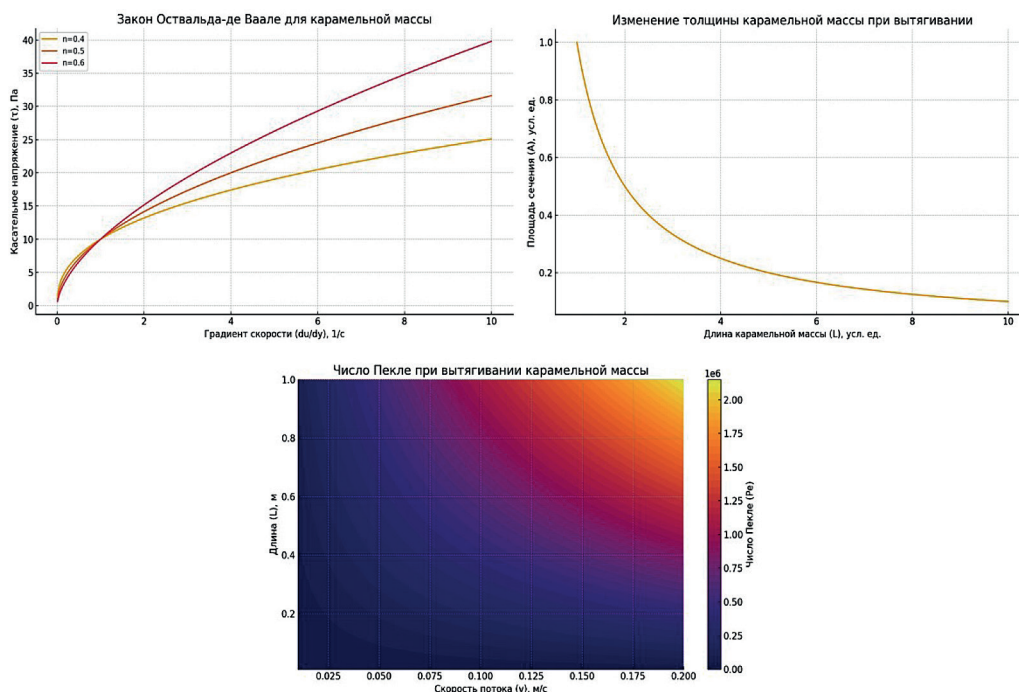
$\rho$  – плотность (для карамели –  $1250 \text{ кг/м}^3$ );

$c$  – теплоемкость (для карамели –  $1800 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ ).

При  $P_e > 100$  – масса стремительно охлаждается.

Результат физико-математического моделирования процесса вытягивания карамельной массы отражается на графиках закона Освальде – де Ваале, изменения толщины, числа Пекле (см. рисунок):

Построение модели позволяет отслеживать и контролировать необходимые показатели при процессе вытягивания карамельной массы. Увеличение определенных параметров тянущей машины, а именно скорости вращения, времени вы-



Результат физико-математического моделирования



тягивания, количества оборотов может привести к снижению плотности, вязкости и избыточному количеству воздуха, что плохо скажется не только на карамельной массе, но и на готовой продукции.

### Источники

1. Романов П.С. Оборудование предприятий пищевой промышленности. СПб.: Лань, 2021. 312 с.
2. ГОСТ 6477–2019. Карамель. Общие технические условия. Общие требования и правила составления: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен

в действие Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации 1 июля 2020 г. № 501: введен впервые: дата введения 15 августа 2019 г. [Электронный ресурс]. URL <https://internet-law.ru/gosts/gost/71557/>

3. Королев А.А. Технология кондитерского производства. М.: Пищепромиздат, 2019. 256 с.
4. Логинов С.А. Реология пищевых продуктов. М.: Колос, 2022. 280 с.
5. Осетров Н.Е. Моделирование тепловых процессов в пищевых производствах. Казань: КГТУ, 2020. 198 с.

### References

1. Romanov P.S. Equipment for Food Industry Enterprises. St. Petersburg, Lan, 2021, 312 p.
2. GOST 6477-2019. Caramel. General technical conditions. General requirements and rules for compilation: National Standard of the Russian Federation: Official Edition: Approved and put into effect by the Interstate Council for Standardization, Metrology, and Certification on July 1, 2020, No. 501: Introduced for the first time: Date of introduction: 2019-08-15. URL <https://internet-law.ru/gosts/gost/71557/>
3. Korolev A.A. Technology of Confectionery Production. Moscow, Pishchepromizdat, 2019, 256 p.
4. Loginov S.A. Rheology of Food Products. Moscow, Kolos, 2022, 280 p.
5. Osetrov N.E. Modeling of Thermal Processes in Food Production. Kazan, KSTU, 2020, 198 p.

# Рекомендации по определению степени готовности предприятий центрального теплоснабжения к цифровой трансформации в условиях концепции «Индустрия 4.0» и дальнейшему применению полученных результатов

**М.М. Самошкин**

*соискатель РХТУ имени Д.И. Менделеева, ПАО «Московская объединенная энергетическая компания»; Москва  
e-mail: mik4836@yandex.ru*

**Аннотация.** Рассмотрены общие понятия цифровой трансформации предприятий и концепции «Индустрия 4.0». Определены основные положительные аспекты внедрения цифровых технологий в теплоэнергетической отрасли в соответствии с требованиями четвертой промышленной революции и Информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям ИТС 48-2023 «Повышение энергетической эффективности». Предложены способы определения степени готовности предприятий центрального теплоснабжения к применению современных информационно-коммуникационных технологий, направленных на повышение качества и оптимизацию существующих бизнес-процессов.

**Ключевые слова:** цифровые технологии, искусственный интеллект, 3D-моделирование, цифровая трансформация, Индустрия 4.0, тепловая энергия, теплоснабжение, высококвалифицированные специалисты, конкурентоспособность.

**Summary.** The general concepts of digital transformation of enterprises and the concept of “Industry 4.0” are considered. The main positive aspects of the introduction of digital technologies in the thermal power industry are identified in accordance with the

requirements of the fourth Industrial Revolution and the Information Technology Handbook on the best available Technologies ITS 48-2023 “Improving Energy Efficiency”. The methods of determining the degree of readiness of central heating supply enterprises to use modern information and communication technologies aimed at improving the quality and optimizing existing business processes are proposed.

**Keywords:** digital technologies, artificial intelligence, 3D modeling, digital transformation, Industry 4.0, thermal energy, heat supply, highly qualified specialists, competitiveness.

## Введение

В настоящее время результаты развития цифровых технологий активно применяются и влияют практически на все сферы деятельности современного общества. Основной целью разработки и последующего внедрения цифровых инноваций является всестороннее улучшение качества жизни человека. Важность активного применения цифровых решений во всех отраслях российской экономики отметил Президент РФ В.В. Путин в ходе выступления на пленарном заседании Петербургского международного экономического форума [1]. Одним из приоритетных направлений применения рассматриваемых технологий, безусловно, можно назвать развитие мировой индустрии. Предприятия и организации всего промышленного сектора, понимая неоспоримые преимущества цифровых технологий над традиционными способами и методами производства, не просто переходят на цифровизированные процессы, а стараются применять такие современные технологии, как искусственный



интеллект (ИИ) и 3D-моделирование на всех стадиях жизненного цикла продукта. Увеличение доли цифровых технологий в процессе деятельности организаций и планы по максимально возможному использованию передовых компьютерных решений можно охарактеризовать как цифровую трансформацию предприятий, а также как интеграцию в мировую киберархитектуру.

Последние достижения информационных технологий лежат в основе четвертой промышленной революции Индустрия 4.0 [2], предлагающей массовое внедрение киберфизических систем в производство и в повседневную жизнедеятельность человека с целью улучшения их качества. Ключевыми компонентами данной концепции являются аддитивное производство, автономная и умная робототехника, Интернет вещей, облачные вычисления с большим объемом данных, кибербезопасность.

Однако для успешной реализации новейших цифровых технологий на практике основным требованием, гарантирующим положительный эффект, является уровень внутренней готовности самой системы. В ряде случаев внедрению концепции «Индустрия 4.0» на предприятиях препятствуют годами сложившаяся и принятая персоналом консервативная культура организации. Для определения степени готовности предприятия к цифровым преобразованиям необходимо провести внутренний системный анализ организационно-функциональной структуры [3], отражающий актуальный статус цифровизации, и разработать комплекс дальнейших мероприятий. С целью разработки алгоритма действий по определению готовности организаций к применению новых компьютерных технологий далее предложены рекомендации по цифровой трансформации компаний на примере предприятий такой важнейшей отрасли энергетики, как теплоснабжение.

### Современные технологии цифрового преобразования предприятий центрального теплоснабжения

Основным видом деятельности любой системы центрального теплоснабжения (ЦТС) является выработка и транспортировка тепловой энергии от источника генерации до конечного потребителя. В целом весь процесс представляет собой сложную химико-энерготехнологическую систему (ХТЭС), не претерпевшую за свое более чем 100-летнее существование каких-либо коренных изменений. Передача тепловой энергии от агрегата по ее выработке до конечного потребителя и обратно, осуществляется по специальной двухтрубной системе, где в качестве теплоносителя выступает химически подготовленная вода заданной температуры.

Применение современных цифровых концепций открывает возможности значительной оптимизации процессов и технологий теплоэнергетической отрасли [4]. Так, согласно Информационно-техническому справочнику по наилучшим доступным технологиям ИТС 48-2023 «Повышение энергетической эффективности» [5], цифровизация теплового комплекса обладает серьезным потенциалом, так как в настоящее время контроль потоков тепловой энергии осуществляется преимущественно в точках балансового разграничения с потребителями и не охватывает всю протяженность технологической цепи. Автоматизация технологических процессов управления режимами транспортировки теплоносителя позволит существенно повысить энергоэффективность системы и качество предоставления услуг. Создание цифровых двойников ЦТС обеспечит максимально точный прогноз работы оборудования, что в свою очередь отразится на надежности и безопасности ЦТС [6]. Формирование единого источника достоверной информации о всех данных и бизнес-процессах системы позволит максимально быстро принимать правильные решения, в том числе с использованием искусственного интеллекта и других киберфизических систем.

Переход к цифровым процессам в области логистики и экономики для предприятий ЦТС имеет ряд неоспоримых преимуществ [7]. Таким образом, ЦТС являются наиболее востребованной сферой деятельности по внедрению цифровых технологий в связи с выполнением жизнеобеспечивающей функции населения, что подтверждается «Стратегическим направлением в области цифровой трансформации строительной отрасли, городского и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации до 2030 года» [8].

Однако необходимо отметить, что реализация указанных инновационных решений требует значительного финансирования, источник которого, в силу специфики тарифообразования отрасли теплоснабжения<sup>1</sup>, необходимо определить теплоснабжающим организациям.

### Предложения по определению степени готовности предприятий центрального теплоснабжения к цифровой трансформации

Законодательно установленное качество теплоснабжения обеспечивается комплексом технических и организационно-управленческих мероприятий, выполняемых различными структурными подразделениями предприятий ЦТС в соответствии с установленным функционалом. С целью определения возможности применения

цифровых технологий структурными подразделениями ЦТЭС необходимо декомпозировать организацию по функциональным признакам выполняемых операций с классификацией основного и вспомогательного видов деятельности. Непосредственно в создании продукта (тепловой энергии) и его дальнейшей транспортировке и распределении участвуют производственно-эксплуатационные службы. Здесь необходимо отметить, что ключевым элементом рассматриваемой ХТЭС после процесса выработки тепловой энергии является подсистема транспортировки теплоносителя, состоящая из системы трубопроводов различного типа и диаметра, с достаточно длительным сроком нахождения в эксплуатации и изначально не предусматривающая возможности коммуникации в рамках IP-протокола. Поэтому необходимо определить цифровые технологии и методы передачи информации не только о гидротемпературных режимах текущей работы системы трубопроводов, но и отражающие их техническое состояние в целом, определяемое сегодня локально с помощью различных способов диагностики, начиная от визуального осмотра эксплуатационными специалистами, гидравлических и температурных испытаний, ультразвукового исследования, видеодиагностики мобильной робототехникой, тепловизионного обследования и пр. Исходя из этого целесообразно сформировать концепцию модернизации существующих систем посредством установки необходимых датчиков и по результатам обобщения и анализа полученной информации, создать полноценную базу данных текущего и всестороннего состояния системы, а в дальнейшем, при обновлении элементов системы, применять технологии «умных тепловых сетей» (Smart Heat Grid) [9]. Принимая во внимание основной вид деятельности предприятий ЦТЭС и характеризуя его как производственный процесс, можно сказать, что возможность всестороннего применения цифровых преобразований более достижима вспомогательными и обеспечивающими подразделениями в организациях центрального теплоснабжения, таким образом темпы и уровень цифровизации данных подразделений будет выше, чем у производственных.

Далее требуется определить перечень существующих информационных технологий для понимания возможности применения их профильными структурными подразделениями в функциональных и межфункциональных бизнес-процессах и непосредственно должностных обязанностей сотрудников этих подразделений, подверженных частично или полностью, цифровизации.

Первым шагом для определения степени готовности организации к цифровым трансформаци-

ям является анализ существующего плана долгосрочного стратегического развития в корреляции с текущим статусом реализации уже внедренных цифровых технологий и сравнительный анализ, отображающий оптимизированные бизнес-процессы в разрезе «было – стало». Подробное описание результатов использования цифровой технологии вместо традиционных способов имеет очень важное значение для дальнейшей реализации всего комплекса цифровизации, даже если содержит отрицательные аспекты, так как критический анализ позволяет достичь понимания процессов и установить ранее не известную причинно-следственную связь с другими бизнес-процессами. Корпоративная стратегия и уже реализованные цифровые технологии дают возможность определения вектора развития и с помощью анализа, в том числе недочетов и недостающих возможностей, сформировать план цифрового преобразования. И главное – информация о всем комплексе применения в организации современных компьютерных программ определяет текущий этап инновационных преобразований как общий уровень цифровизации.

Далее необходимо определить связь используемых программ и комплексов между собой и взаимное или одностороннее влияние их как на отдельные процессы, так и на общий результат деятельности организации – обеспечение надлежащего теплоснабжения. Показатель степени связанности информационных систем в организации будет являться вторым этапом на пути глобальной, в рамках предприятия, цифровизации. В данном случае конечным результатом должна быть полная интеграция информационных и эксплуатационно-технологических уровней [10].

Следующим показателем определения степени готовности цифровых преобразований на предприятиях ЦТЭС будет являться наличие и общая доступность цифровой модели организации, а также ее полнота и достоверность. Выполнение данного этапа является предметом дискуссий среди руководства организаций, так как существует мнение, что общедоступность всего объема информации о деятельности организации не всегда имеет положительный результат. Это одно из направлений в организациях, в рамках которого необходимо активно внедрять парадигму доверия [11]. Кроме того, важнейшим показателем степени готовности организации к использованию новых цифровых технологий является понимание всем персоналом необходимости, целесообразности и осознания всех положительных аспектов реализации инновационных методов и способов работы. Высокий результат данного показателя достигается путем максимального вовлечения сотрудников органи-



зации посредством проведения внутренних семинаров, опросов и обучающих курсов, а также постоянной визуализации общей картины цифровой трансформации, потому что компетентные и заинтересованные кадры являются одним из основных двигателей процесса преобразований.

Также для успешной реализации стратегии цифровой трансформации требуется создание единого источника достоверных данных [12] позволяющего провести системный анализ сформированной базы как информационной системы для установления причин положительных и отрицательных событий, а также возможности прогнозировать различные сценарии с большой долей вероятности их реализации. Параллельно требуется квалифицированно определить уровень информационной защищенности и дальнейшей безопасности вышеуказанной информационной системы.

После адекватного определения степени готовности предприятия к цифровой трансформации, опираясь на полученные результаты, возможно разработать последовательную, позитивную и единую для всех структурных подразделений организации концепцию цифрового преобразования, основными этапами реализации которой будут являться:

- установление областей, требующих развития и преобразования, цель данного этапа, определение взаимозависимости и понимания того, как структурные подразделения сопоставимы между собой для дальнейшего обеспечения их развития в одинаковом темпе;

- разработка комплекса непосредственных мер для каждого функционального подразделения с целью достижения установленных концепцией планов цифровой трансформации и системы оценки.

## Заключение

В заключение необходимо подчеркнуть, что главной задачей цифровой трансформации организации и ключевым показателем достижения цели цифровизации предприятия является возможность саморегуляции при изменении внешних и внутренних обстоятельств посредством высокотехнологичных цифровых систем не только в отдельных бизнес – процессах, но и в принятии управленческих решений самого высокого уровня.

Тем не менее, учитывая все положительные аспекты применения цифровых технологий, следующая концепция развития промышленности «Индустрия 5.0» определяет новые направления развития, а именно:

- человекоцентричность как доминанту достижений людей и создание инклюзивной, а также безопасной среды жизнедеятельности;

- устойчивость как сохранение баланса между развивающейся экономикой и интересами общества и природы.

Таким образом, ключевую роль в успехе деятельности организации играют высококвалифицированные специалисты, что подтверждается основными постулатами концепции talentism, являющейся важным фактором развития конкурентоспособности и стратегического преимущества [2].

## Примечание

1. Государственное регулирование цен (тарифов) на тепловую энергию осуществляется на основе принципов, установленных Федеральным законом от 27 июля 2010 г. № 190-ФЗ «О теплоснабжении».

## Источники

1. В.В. Путин: РФ предстоит сформировать цифровые платформы во всех отраслях к 2030 году [Электронный ресурс]. Известия. 2024. 7 июня. URL: <https://iz.ru/1709123/2024-06-07/putin-prizval-sformirovat-k-2030-godu-tcifrovye-platformy-vo-vsekh-otrasliakh-ekonomiki>

2. Шваб К. Четвертая промышленная революция (Top Business Awards). М.: Эксмо. 2016. 138 с.

3. Анфилатов В.С. Системный анализ в управлении. М.: Финансы и статистика. 2002. 368 с.

4. Мешалкин В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико-технологических систем. Смоленск: Универсум, 2021.

5. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 48-2023 «Повышение энергетической эффективности». Раздел «Цифровизация тепловых сетей централизованного теплоснабжения» [Электронный ресурс]. URL: [https://economy.gov.ru/material/file/7804a32b979d9d0490b33daeb4927d8a/spravochnik\\_po\\_nailuchshim\\_dostupnym\\_tehnologiyam\\_its\\_48\\_2023.pdf](https://economy.gov.ru/material/file/7804a32b979d9d0490b33daeb4927d8a/spravochnik_po_nailuchshim_dostupnym_tehnologiyam_its_48_2023.pdf)

6. Зачем энергетике цифровые двойники? [Электронный ресурс]. URL: <https://www.myenergy.ru/professional/2022/zachem-ehnergetike-cifrovye-dvoyniki/>

7. Мешалкин В.П. Логистика и электронная экономика в условиях перехода к устойчивому развитию. М. – Генуя, 2004. 413 с.

8. Распоряжение Правительства РФ от 27 декабря 2021 г. № 3883-р «О стратегическом направлении в области цифровой трансформации строительной отрасли, городского и жилищно-коммунального

хозяйства РФ до 2030 г.» [Электронный ресурс]. Кодекс. URL: <https://docs.cntd.ru/document/727688538>

9. ГК ЮРТЭК является резидентом фонда Сколково и занимается исследовательской деятельностью в области Smart Grid. ЧТО ТАКОЕ SMART HEAT GRID? [Электронный ресурс]. URL: <https://urtek-gk.com/about-shg/>

10. Шоров К.М. Интеграция информационных технологий в автоматизированные системы управления в современных условиях // Молодой ученый. 2012. № 4. С. 191–195.

11. Минаева В.Н. Организационное доверие как неосязаемый актив компании: проблема измерения // Вестник СПб. ун-та. Серия «Менед-

жмент». 2012. Вып. 2. С. 107–130. URL: <http://www.vestnikmanagement.spbu.ru/archive/pdf/556.pdf>

12. Андрей Блинов. Платформа iTMan от Softline: единый источник достоверной информации для ИБ и ИТ [Электронный ресурс]. СПб. IT.ru. 2022. 29 сентября. URL: [https://spbit.ru/it\\_class/platforma-itman-ot-softline-edinyy-istochnik-dostovernoy-informacii-dlya-ib-i-it-2747](https://spbit.ru/it_class/platforma-itman-ot-softline-edinyy-istochnik-dostovernoy-informacii-dlya-ib-i-it-2747)

13. Методические рекомендации по цифровой трансформации государственных корпораций и компаний с государственным участием (утв. Минцифры России). М., 2023.

14. Хлыстун К.С. Проблематика готовности бюджетной организации к цифровой трансформации // Молодой ученый. 2023. № 24. С. 39–41.

## References

1. Putin: The Russian Federation will have to form digital platforms in all sectors by 2030 (June 7, 2024) URL: <https://iz.ru/1709123/2024-06-07/putin-prizval-sformirovat-k-2030-godu-tcifrovye-platformy-vo-vsekh-otrasliakh-ekonomiki> (date of request: 05/29/2025)
2. Schwab K. The Fourth Industrial Revolution (Top Business Awards). Eksmo, 2016, 146 p.
3. Anfilatov V.S. System analysis in management. Moscow: Finance and Statistics
4. Meshalkin V.P. Fundamentals of intensification and resource-energy efficiency of chemical technology systems. Smolensk: Universum, 2021.
5. Information and technical handbook on the best available technologies ITS 48-2023 “Improving energy efficiency”, section Digitalization of district heating networks, available at: [https://economy.gov.ru/material/file/7804a32b979d9d0490b33daeb4927d8a/spravochnik\\_po\\_nailuchshim\\_dostupnym\\_tehnologiyam\\_its\\_48\\_2023.pdf](https://economy.gov.ru/material/file/7804a32b979d9d0490b33daeb4927d8a/spravochnik_po_nailuchshim_dostupnym_tehnologiyam_its_48_2023.pdf)
6. Why does the energy industry need digital twins? URL: <https://www.myenergy.ru/professional/2022/zachem-ehnergetike-cifrovye-dvoyniki/> (date of request: 05/29/2025)
7. V.P. Meshalkin. Logistics and the electronic economy in the context of transition to sustainable development. Moscow – Genoa. 2004. 413 p.
8. Decree of the Government of the Russian Federation dated December 27, 2021 No. 3883-r “On the strategic direction in the field of digital transformation of the construction industry, urban and housing and communal services of the Russian Federation until 2030”. Kodeks, available at: <https://docs.cntd.ru/document/727688538>
9. UTEK Group is a resident of the Skolkovo Foundation and is engaged in research activities in the field of Smart Grid. WHAT IS A SMART HEAT GRID? – URL: <https://urtek-gk.com/about-shg/> (date of request: 05/29/2025)
10. K.M. Sharov. Integration of information technologies into automated control systems in modern conditions / Young Scientist. 2012. – No. 4, pp. 191-195.
11. .N. Minina. Organizational trust as an intangible asset of a company: the problem of measurement. Bulletin of St. Petersburg State University. Ser. Management. 2012. Issue 2, pp. 107–130 URL: <http://www.vestnikmanagement.spbu.ru/archive/pdf/556.pdf> (date of request: 05/29/2025)
12. Andrey Blinov. Softline’s iTMan platform: a single source of reliable information for information security and OT. 27.09.2022 URL: [https://spbit.ru/it\\_class/platforma-itman-ot-softline-edinyy-istochnik-dostovernoy-informacii-dlya-ib-i-it-2747](https://spbit.ru/it_class/platforma-itman-ot-softline-edinyy-istochnik-dostovernoy-informacii-dlya-ib-i-it-2747)
13. Methodological recommendations on the digital transformation of state-owned corporations and companies with state participation. Figures approved by the Ministry of Finance of Russia. Moscow. 2023.
14. K.S. Khlystun. The problem of budget organization’s readiness for digital transformation. A young scientist. 2023.No. 24. pp. 39–41.



## Глоссарий основных терминов и понятий

**Искусственный интеллект** – компьютерная программа, наделенная когнитивными функциями.

**Жизненный цикл продукта** – этапы проектирования, создания, реализации и прекращения выпуска (в ряде случаев утилизация) продукта.

**Аддитивное производство** – трехмерное моделирование продукта с последующим применением технологий послойного формирования объекта.

**Автономная и умная робототехника** – машины и механизмы, выполняющие свои функции без участия (с минимальным участием) человека.

**Интернет вещей** – общее цифровое пространство для различных устройств, целью которого является всесторонняя коммуникация.

**Облачные вычисления** – доступность вычислительных ресурсов для интернет-пользователей.

**Кибербезопасность** – меры безопасности для участников информационного обмена как внутри организации, так и в Глобальной сети.

**Киберфизическая система** – интеграция вычислительных комплексов с технологическим оборудованием.

**Культура организации** – установленные и принятые персоналом системы ценностей, традиций, способов взаимодействия и выполнения трудовых функций.

**IP-протокол** – программа, обеспечивающая обмен данными между компьютерами и другими устройствами, в том числе в Интернете.

**Критический анализ** – детальный и всесторонний процесс изучения информации для дальнейшего принятия решений.

**Системный анализ** – методология изучения процессов как самостоятельных систем.

# Модель зрелости цифровых проектов гибридных систем распределенного реестра и распределенных нейронных сетей для управления качеством

## А.В. Чекмарев

доцент, канд. техн. наук,  
кафедра экономики и банковского бизнеса  
МГИМО; Москва  
e-mail: anatolii\_chekmar@mail.ru

## А.Н. Азаров

д-р техн. наук, профессор,  
Российский университет транспорта  
(МИИТ); Москва  
e-mail: vazarov52@gmail.com

## Е.К. Чернышев

заместитель начальника департамента  
информационных технологий  
АО «ААА Управление Капиталом»; Москва  
e-mail: echernyshev@gmail.com

**Аннотация.** В статье рассматривается оригинальная концепция модели зрелости, разработанная в рамках более широкой научной работы, посвященной управлению качеством цифровых продуктов, применительно к перспективному направлению объединения технологий распределенного реестра и нейросетей. Развитие гибридной технологии объединения распределенного искусственного интеллекта и распределенного реестра в настоящее время является передовым направлением цифровой трансформации, которое, возможно, станет одним из основных компонентов рождающейся Индустрии 5.0. Эта технология в самой яркой форме содержит такие ключевые особенности цифровых продуктов, как способность к коммуникации, самообучению и объединению, адаптивность, масштабируемость, превращение информации в актив, приносящий доход, способность выступать в качестве элемента системы управления. Учитывая быстрое развитие многообещающих, но достаточно рискованных проектов в этой области делает обоснованным разработку соответствующих моделей зрелости, которые позво-

лили бы оценивать качество отдельных проектов, сравнивать их между собой по критерию зрелости/качества, а также выстраивать дорожные карты развития.

**Ключевые слова:** качество, распределенный реестр, блокчейн, нейронные сети, искусственный интеллект, ИИ, модель зрелости, машинное обучение, смарт-контракты.

**Abstract.** The article discusses the original concept of a maturity model, developed within the framework of a broader scientific work devoted to digital product quality management, as applied to the promising direction of combining distributed ledger and neural network technologies. The development of a hybrid technology for combining distributed artificial intelligence and a distributed ledger is currently an advanced direction of digital transformation, which may become one of the main components of the emerging Industry 5.0. This technology in its most vivid form contains such key features of digital products as the ability to communicate, self-learn and combine, adaptability, scalability, turning information into an asset that generates income, and the ability to act as an element of a management system. Given the rapid development of promising, but rather risky projects in this area, it makes sense to develop appropriate maturity models that would allow assessing the quality of individual projects, comparing them with each other according to the maturity/quality criterion, and building development roadmaps.

**Keywords:** quality, distributed ledger, blockchain, neural networks, artificial intelligence, AI, maturity model, machine learning, smart contracts.

## Актуальность

В настоящее время совмещение распределенного реестра (blockchain) и распределенного искусственного интеллекта (DeAI) является достаточно «молодой» темой – ее возраст оценивается в 3–5 лет. Интеллектуальная «сеть сетей» (децентрализованная сеть нейросетей) обеспечивает обучае-



мость и решение неалгоритмизируемых задач, а блокчейн повышает уровень защиты, прозрачности и контроля наряду с добавлением возможности построения системы монетизации. Делаются попытки различных реализаций гибридной технологии: торговая криптовалютная площадка Binance выстраивает распределенную нейросеть высокой производительности для прогнозирования движения котировок и анализа злонамеренных действий, оплачивая вычислительные ресурсы эмитируемыми блокчейн-монетами [1], энергетические компании – распределенные системы безопасности для прогнозирования и распознавания опасных ситуаций и противоправных действий [2].

Объединение распределенного реестра и распределенного искусственного интеллекта, возможно, станет одним из основных компонентов рождающейся Индустрии 5.0. Эта технология характеризуется такими ключевыми особенностями цифровых продуктов, как неотчуждаемость от производителя, способность к коммуникации, самообучению и объединению, адаптативность, масштабируемость, преобразование информации в актив, приносящий доход, способность выступать в качестве элемента системы управления. Свойства цифровых продуктов делают их схожими с живыми системами, а управление их качеством с использованием традиционных подходов крайне затруднительным [3], но открывает возможность для разработки и апробации новых подходов, основанных, например, на применении теории взаимной адаптации сложных систем [4], эффективность применения которой на практике для управления качеством IT-проектов рассматривалась в научной работе [5].

В соответствии с положениями этой теории современное цифровое производство и цифровой продукт не только обеспечивают рост скорости реакции на изменения, но и делают поведение системы предприятия-продукта проактивным [6] за счет развития функции прогнозирования и стратегического планирования (в терминах [4] – обеспечивает многоуровневую опережающую взаимную адаптацию внутренних компонентов системы и системы с внешней средой), а качество продукта является результатом эффективной непрерывной многоуровневой опережающей взаимной внутренней адаптации компонентов, образующих его систему: команд сотрудников, руководителей, владельцев предприятия, участников транспортировки и хранения, используемых технологий, процессов между собой и с внешней средой, включающей потребителей, взаимодействующие компании, государство и окружающую среду в понимании устойчивого развития (ESG-повестки) [7].

Концепция цифрового предприятия и продукта как самообучающейся системы рассмотрена также в [8–14].

В свою очередь концепция модели зрелости предприятия, как инструмента управления качеством продукта, разработанная первично Филипом Кросби [15], относилась к универсальной системе управления качеством и получила промышленное применение в цифровой индустрии в виде Capability Maturity Model [16]. В настоящее время модели зрелости в различной интерпретации распространены в большинстве областей деятельности, но незаслуженно пока не признаются стандартным инструментом теории управления качеством наряду с принципом Парето или Циклом постоянного улучшения. Автором настоящего исследования проведен анализ следующих 14 областей деятельности: корпоративная стратегия, управление персоналом, корпоративная культура (включая корпоративную идеологию), производственные процессы, цифровой дизайн, корпоративная архитектура, управление рисками (включая кибербезопасность и аварийное планирование), корпоративное юридическое сопровождение, управление данными, управление корпоративными финансами, система корпоративного обучения, управление исследованиями, управление проектами, управление устойчивым развитием. В каждой из них выявлены разнообразные варианты моделей зрелости, что подтверждает их применимость и востребованность. Это делает обоснованным применение данного инструмента и к передовой технологии объединения распределенного реестра и распределенного искусственного интеллекта. И если для более «старой» технологии распределенного реестра существуют развитые модели зрелости, например [17], то для новой гибридной технологии такой модели обнаружить пока не удалось.

### Универсальная модель зрелости для цифрового предприятия

Модель зрелости помимо основного назначения (оценка процессов и рейтингование контрагентов) позволяет [18]:

- с высокой степенью объективности оценивать уровень зрелости процессов производства;
- обоснованно формулировать приоритетные направления развития и стратегию деятельности и процессов производства продуктов и услуг;
- оценивать прогресс в развитии процессов производства продуктов и услуг за период времени;
- проводить анализ актуальности и рисков крупных проектов (в том числе для инвесторов);
- получать экспресс-оценку деятельности служб и проводить бенчмаркинг (сравнение внутренних процессов с уровнем рынка);

- проводить эффективный, объективный и сравнимый внешний аудит зрелости процессов;
- демонстрировать конкурентное преимущество для клиентов и контрагентов в случае успешной высокой оценки внутренних процессов.

Модель зрелости построена на основе принципов, частично упоминаемых в официальной документации, а также в оригинальной монографии [15], методических и научных публикациях, например, в [19–22]. Большинство этих принципов может быть распространено на родственные модели зрелости, разрабатываемые или модифицируемые для других областей деятельности (не процессы разработки), а также для оценки моделей в случае выбора из списка доступных.

В том числе при формулировке предложенных принципов учтен анализ более 50 моделей зрелости из различных областей деятельности, в рамках которого выявлены основные общие векторы развития, которые в силу универсальности близки по смыслу к generic компонентам СММІ, но не соответствуют им полностью, так как цели и практики СММІ относятся к узким процессным областям.

Сформулируем основные.

*Эволюционность*, заложенная в модель, означает невозможность и нежелательность революционных преобразований. «Прыжки» через уровень не считаются осуществимыми и обоснованными. Такие проекты переходов в большинстве случаев бывают неуспешны [23]. С 1-го уровня допустимым считается переход на 2-й, со 2-го на 3-й и т.д. Считается, что на 1-м уровне сотрудники не в состоянии «увидеть» 3-й уровень, эффективно спланировать и осуществить меры по его достижению. При переходе с 1-го на 2-й уровень руководство и коллектив смогут разобраться в том, что собираются получить, где и когда будут происходить действия, кто их будет контролировать [19].

Этот принцип соответствует базовым подходам TQM в части цикла постоянного улучшения.

*Снижение цены качества и себестоимости* – первоисточник модели зрелости. Книга Ф. Кросби [15] основной идеей преподносит снижение удельной стоимости качества с ростом уровня зрелости. Кроме того, рост уровня зрелости процессов обеспечивает значительное снижение себестоимости для цифровых продуктов [24]. Снижение уровня рисков, конфликтов и повышение успешности проектов вносит дополнительный вклад в снижение соответствующих потерь.

*Фокусировка* – описание и применение модели должно обеспечивать фокусировку ресурсов и усилий на каждом конкретном периоде времени для обеспечения успешного продвижения в условиях

дефицита ресурсов и с учетом адаптационной способности предприятия. В теории управления качеством одним из основных инструментов признан закон Парето, эмпирически доказанный и утверждающий возможность и обоснованность достижения 70% результата за счет затрат 30% возможных ресурсов. Модели зрелости, родственные СММ, в неявной форме, но полностью соответствуют данному закону.

*Синхронизация* – модель зрелости позволяет сравнивать зрелость процессов не только для компаний и подразделений с однородным типом деятельности, но и за счет универсальности принципов и возможности адаптации может применяться для разнородных подразделений. Это позволяет в том числе выявлять участки процессов, связывающих различные подразделения, которые требуют приоритетного развития в связи с дивергенцией относительно общего уровня зрелости. Синхронизация и конвергенция развития характеризует уровень взаимодействия и взаимной адаптации компонентов системы [4], которые являются необходимым условием ее эффективного функционирования и результативности [4].

На практике часто приходится сталкиваться с ситуацией, когда бизнес-подразделение или компания обвиняет взаимодействующее ИТ-подразделение или сервисную ИТ-компанию в низком качестве обслуживания (в описываемом примере – доработка программного обеспечения автоматизированной системы). При этом анализ часто показывает, что основные проблемы присутствуют на стороне заказчика, который некачественно и с превышением нормативных сроков формулирует задачи по развитию, затягивает тестирование, не знаком с базовыми принципами приемочных процедур и т.п. В итоге процесс развития цифрового продукта оказывается затянут и не обеспечивает требуемой динамики развития.

Пользуясь аналогией с автомобилем, векторы развития можно представить как узлы автомобиля – двигатель определяет мощность, но скорость ограничивается трансмиссией, ходовой и аэродинамикой кузова, маневренность определяется в основном рулевым управлением, но ограничивается ходовой и сцеплением покрышек с дорожным покрытием, безопасность определяется тормозной системой, но зависит от множества дополнительных характеристик, включая мощность двигателя и качества покрышек и т.д. Все взаимодействующие узлы при этом определяют способность автомобиля удовлетворять разнообразные требования и потребности водителя в быстро меняющихся дорожных условиях, в различную погоду и сезоны, адаптируясь к этим условиям в широком диапазо-



не. Именно поэтому синхронизация выделена в отдельный вектор развития.

*Снижение уровня конфликтов* – рост уровня зрелости предусматривает не только рост качества продуктов, но и снижение уровня конфликтов при выполнении процессов и проектов. Данное явление исследовано, например, в [25, 26]. Снижение уровня конфликтов обусловлено повышением уровня регламентированности процессов, снижением количества коллизий в функциях ролей, включенных в процессы, и повышением способности предприятия к адаптации с ростом уровня зрелости, что соответствует требованию по обеспечению способности адаптации предприятий в условиях быстроизменяющегося внешнего окружения и конкурентной среды, а также [22].

*Снижение уровня рисков* – рост уровня зрелости процессов и организации в целом приводит к снижению уровня персональной зависимости и соответствующего персонального риска, связанного с увольнением, болезнью или изменением поведения ключевых сотрудников [27]. Обеспечиваемый рост качества продуктов и предоставляемых сервисов приводит к снижению уровня репутационных, проектных и других видов рисков, включая следствие конкуренции и изменения внешней среды за счет роста способности к адаптации и гибкости.

*Повышение допустимой сложности проектов* – более высокий уровень зрелости предприятия обеспечивает возможность реализовывать более сложные проекты за счет меньших потерь на конфликты, связанные с адаптационными процессами, коллизиями процессов, на функционально необоснованные конфликты, потери, связанные с реализацией рисков различной природы [18]. Таким образом, значительно снижается «наценка» на функционально обусловленную себестоимость проектов и снижается риск неуспеха для сложных проектов [28].

*Количественная управляемость* – повышение уровня зрелости, заложенное в СММ, предусматривает появление и развитие количественных метрик процессов при росте уровня зрелости. Принцип количественной управляемости и принятия решения, основанного на объективных измерениях, является одним из основных в концепции всеобщего управления качеством (TQM) [29]. В этом смысле сами модели зрелости являются инструментом измерения способности предприятия обеспечивать качество продукта и степень их внедрения, что обеспечивает рост способности к измерению потенциального качества продукта.

Концепции развития метрик и количественного управления на высоких уровнях зрелости соответствует внедрение *data driven* таких методик, как

Система сбалансированных показателей, «Шесть сигм», внедрение управляющих систем на основе нейросетей [11].

*Гибкость и адаптабельность* – одним из основных требований к перспективной системе управления качеством является способность обеспечивать гибкость и адаптабельность продукта, гибкость и адаптабельность предприятия к быстроизменяющимся условиям внешнего мира и конкурентной среды. В модели зрелости процессов СММ это выражается в снижении рисков реализации проектов, направленных на создание новых уникальных результатов, повышение соблюдения плановых сроков, а для модели зрелости качества – в снижении издержек на его повышение в соответствии с [15]. Таким образом, модели зрелости всех элементов перспективной системы управления качеством должны обеспечивать соблюдение принципа роста способности к быстрой адаптации и гибкости производства.

*Самообучение и непрерывное улучшение* – высший уровень модели зрелости, предложенной в оригинальной модели [15], предусматривает обеспечение улучшения качества – в виде непрерывной обычной деятельности. Аналогично СММ и родственные модели зрелости предусматривают на высших уровнях зрелости устойчивое функционирование процесса постоянного улучшения и закрепляют эту фокусировку в виде наименования уровня Optimizing («оптимизированный»). Иначе говоря, на высшем уровне зрелости предприятие устойчиво функционирует в качестве постоянно самообучающейся самосовершенствующейся системы. Данное состояние соответствует высокому уровню внутренней и внешней конвергенции в терминах [4].

*Развитие регламентации* – модель зрелости СММ предполагает наличие регламентации основных процессов, требуемых на определенном уровне зрелости. Отсутствие регламентации свидетельствует о недостаточном уровне зрелости процесса. При этом развитие регламентации не означает линейного наращивания объема текстов правил, регламентов, политик и увеличения количества используемых документов. Развитие регламентации – это увеличение доли ее исполнения в реальном бизнес-процессе, рост удобства использования за счет перехода к гипертекстовому представлению, учет требований цифрового дизайна к представлению, дополнение средствами управления версиями.

*От реактивности к проактивности* – повышение уровня зрелости не только обеспечивает рост скорости реакции на изменения или сбои, но и меняет поведение системы предприятия проактив-

ным [6] за счет развития функции прогнозирования и стратегического планирования (в терминах [4] – обеспечивает многоуровневую опережающую взаимную адаптацию внутренних компонентов системы и системы с внешней средой). С точки зрения временных характеристик продукта, на высоких уровнях зрелости обеспечивается не только сокращение времени вывода нового продукта на рынок в случае необходимости, но и его опережение рынка.

*Информация* – основным инструментом снижения уровня конфликтов [30], обеспечения эффективной опережающей взаимной внутренней и внешней адаптации [4], обеспечения количественного управления [21], а также большинства других направлений развития является полнота, доступность и скорость передачи информации в системе предприятия. На высших уровнях зрелости информация становится активом, приносящим доход.

*Масштаб* – на низших уровнях зрелости предприятие озабочено выращиванием островков компетенций, пока не соединенных в единую конвергентную систему, а на высших – деятельность

предприятия выходит далеко за его границы, распространяясь сначала на контрагентов, а затем, например, путем разработки стандартов или непосредственного использования (что особенно характерно для цифровых продуктов), на отрасль и в целом на международную экономику. Таким образом, на высших уровнях зрелости в соответствии с теорией взаимной адаптации [4] предприятие начинает оказывать возрастающее воздействие на внешнюю среду, переходя от реактивности к проактивному влиянию и заставляя ее взаимно адаптироваться в выбранном направлении.

Выявленные универсальные векторы развития позволяют сформировать универсальную модель зрелости, которая может быть применена к целевому для настоящего исследования набору перспективных проектов (табл. 1). Наименование и количество уровней зрелости заимствовано у модели-прототипа – СММ.

В связи со сложностью получения достоверных оценок оценка по отдельным категориям может быть получена методом экспертного оценивания с расчетом итоговой оценки по медиане [31].

Таблица 1. Универсальная модель зрелости

№ п/п	Вектор развития	Уровень зрелости	Описание уровня зрелости
1.	Управление временем – от реактивности к проактивности	<i>Initial</i> Начальный	Реактивное реагирование даже на плановые внешние события без контроля скорости реакции, планирование проектов и задач отсутствует
		<i>Managed</i> Управляемый	Реактивное реагирование на непредвиденные события. Планирование проектов и задач присутствует. Нарушение сроков планов в абсолютном большинстве случаев. Квартальное и годовое планирование отсутствует или не является полным. Не допускается нарушение сроков по критичным задачам. Глубина планирования ограничена сроками запланированных проектов (до двух лет)
		<i>Defined</i> Регламентированный	Планируемое реагирование на прогнозируемые изменения рынка и внешней среды. Присутствует регламентация и нормативы исполнения задач, которые в основном исполняются. Планирование проектов и задач для большинства случаев актуально и контролируется. Осуществляется оценка плановой трудоемкости и контроль фактической трудоемкости. Присутствует квартальное и годовое планирование, которое в целом исполняется. Глубина планирования около трех лет
		<i>Quantitatively managed</i> Количественно управляемый	Плановая периодическая синхронизация с прогнозируемыми изменениями внешней среды. Глубина планирования от трех до пяти лет
		<i>Optimizing</i> Оптимизируемый	Опережение требований внешней среды (рынка). Глубина планирования – от пяти лет
		<i>Initial</i> Начальный	Большинство инициатив слишком амбициозны и не приносят результата. Оценка уровня зрелости не производится (только в виде отдельного проекта модернизации)
		<i>Managed</i> Управляемый	Обеспечивается поступательное развитие за счет части успешных инициатив. Оценка зрелости производится регулярно. Результаты эпизодически используются для планирования



№ п/п	Вектор развития	Уровень зрелости	Описание уровня зрелости
2.	Эволюционность	<i>Defined</i> Регламентированный	Обеспечивается поступательное развитие без значительного отставания от рынка на основе обоснованной оценки текущего состояния (включая регулярную оценку зрелости) и стабильно успешно реализуемых масштабных инициатив
		<i>Quantitatively managed</i> Количественно управляемый	Обеспечивается количественная оценка (и объективная оценка уровня зрелости для планирования и контроля) и планирование результативности эволюционного развития
		<i>Optimizing</i> Оптимизируемый	Оптимизация эволюционного развития на основе количественных оценок развития внутренних компонентов и планирования развития внешней среды (включая оперативную оценку уровня зрелости)
3.	Снижение себестоимости качества  1 На основе [15]	<i>Initial</i> Начальный	Себестоимость повышения качества не оценивается
		<i>Managed</i> Управляемый	Отчетная – 3%; действительная – 18%
		<i>Defined</i> Регламентированный	Отчетная – 8%; действительная – 12%
		<i>Quantitatively managed</i> Количественно управляемый	Отчетная – 6,5%; действительная – 8%
		<i>Optimizing</i> Оптимизируемый	Отчетная соответствует действительной – 2,5%
4.	Фокусировка	<i>Initial</i> Начальный	Фокусировка изменений отсутствует
		<i>Managed</i> Управляемый	Фокусировка изменений декларируется, но не соблюдается
		<i>Defined</i> Регламентированный	Периодическая фокусировка формализована и в целом соблюдается
		<i>Quantitatively managed</i> Количественно управляемый	Периодическая фокусировка на основе выбора по количественным показателям
		<i>Optimizing</i> Оптимизируемый	Непрерывная оптимизация фокусировки на основе количественных показателей
5.	Синхронизация	<i>Initial</i> Начальный	Синхронизация проектов и приоритетов отсутствует
		<i>Managed</i> Управляемый	Формализована периодическая синхронизация проектов и приоритетов, но в основном не выполняется
		<i>Defined</i> Регламентированный	Формализована и обеспечивается периодическая синхронизация проектов и приоритетов с внешними изменениями
		<i>Quantitatively managed</i> Количественно управляемый	Степень синхронизации направлений деятельности, проектов и приоритетов, изменений внешней среды и внутреннего взаимодействия оценивается и корректируется на основе объективных данных
		<i>Optimizing</i> Оптимизируемый	Обеспечивается непрерывная синхронизация направлений деятельности и изменений внешней среды на основе объективных данных
6.	Снижение уровня конфликтов	<i>Initial</i> Начальный	Высокий уровень конфликтов, включая межперсональные
		<i>Managed</i> Управляемый	Информация о значительных конфликтах используется для развития предприятия и продукта
		<i>Defined</i> Регламентированный	Межперсональные несистемные конфликты отсутствуют или эффективно разрешаются. Системно обоснованные разрешаются преимущественно в стиле «компромисс»
		<i>Quantitatively managed</i> Количественно управляемый	Уровень конфликтов количественно мониторится по всей области внутренней и внешней деятельности. Информация о конфликтах используется для развития предприятия и продукта. Несистемные межперсональные конфликты отсутствуют или незамедлительно разрешаются. Разрешение конфликтов – в стиле win-win и «компромисс»

№ п/п	Вектор развития	Уровень зрелости	Описание уровня зрелости
		<i>Optimizing</i> Оптимизируемый	Конфликты низкого уровня, в случае возникновения разрешаются преимущественно в стиле win-win. Несистемные межперсональные конфликты отсутствуют или незамедлительно разрешаются
7.	Снижение уровня рисков	<i>Initial</i> Начальный	Высокий неуправляемый уровень рисков, включая персональные. Методология управления рисками не формализована
		<i>Managed</i> Управляемый	Методология управления рисками формализована. Предпринимаются определенные несистематизированные меры для снижения уровня рисков
		<i>Defined</i> Регламентированный	Меры по снижению уровня рисков регламентированы и систематически предпринимаются
		<i>Quantitatively managed</i> Количественно управляемый	Производится периодический количественный анализ рисков и реализация мер по снижению рисков
		<i>Optimizing</i> Оптимизируемый	Производится непрерывная оптимизация мер по снижению рисков на основе количественного анализа рисков
8.	Повышение допустимой сложности проектов	<i>Initial</i> Начальный	Большинство проектов и не оформленных в проекты инициатив завершаются неуспешно
		<i>Managed</i> Управляемый	Большинство проектов и инициатив со стоимостью до 20 млн руб. реализуются успешно в соответствии с планами
		<i>Defined</i> Регламентированный	Большинство проектов и инициатив со стоимостью до 100 млн руб. реализуются успешно в соответствии с планами
		<i>Quantitatively managed</i> Количественно управляемый	Большинство проектов и инициатив со стоимостью до 500 млн руб. реализуются успешно в соответствии с планами
		<i>Optimizing</i> Оптимизируемый	Все проекты и инициативы вне зависимости от стоимости и сложности реализуются успешно
9.	Количественная управляемость	<i>Initial</i> Начальный	Метрики эффективности деятельности отсутствуют
		<i>Managed</i> Управляемый	Существует система метрик основных направлений деятельности. Данные не всегда используются для принятия управленческих решений
		<i>Defined</i> Регламентированный	Периодическая (год, квартал) оценка количественных показателей основных направлений деятельности. Существуют КПД
		<i>Quantitatively managed</i> Количественно управляемый	Принятие всех основных управленческих решений на основе количественных показателей деятельности
		<i>Optimizing</i> Оптимизируемый	Непрерывная оптимизация деятельности на основе количественных показателей. Действующая непрерывная система сбалансированных показателей
10.	Гибкость и взаимная адаптация	<i>Initial</i> Начальный	Задачи по внутренней и внешней адаптации не ставятся
		<i>Managed</i> Управляемый	Формализована внутренняя адаптация, но в основном не исполняется. Формализация не покрывает основные направления деятельности
		<i>Defined</i> Регламентированный	Формализована внутренняя адаптация и в целом исполняется
		<i>Quantitatively managed</i> Количественно управляемый	Производится периодическая оценка степени внутренней адаптации и скорости адаптации к изменениям внешней среды на основе объективных данных. Присутствуют и реализуются соответствующие планы на основе прогнозов изменений внешней среды
		<i>Optimizing</i> Оптимизируемый	Обеспечивается непрерывная опережающая взаимная адаптация с внешней средой



№ п/п	Вектор развития	Уровень зрелости	Описание уровня зрелости
11.	Самообучение и непрерывное улучшение	<i>Initial</i> Начальный	Задачи по самообучению и постоянному улучшению не ставятся
		<i>Managed</i> Управляемый	Присутствуют формализованные задачи и методики по улучшению и самообучению, но в целом не исполняются
		<i>Defined</i> Регламентированный	Присутствуют формализованные задачи и методики по непрерывному улучшению и самообучению и в целом исполняются
		<i>Quantitatively managed</i> Количественно управляемый	Периодически планируются действия по улучшению на основе объективных показателей с использованием заимствованных и собственных подходов. Результативность оценивается на периодической основе
		<i>Optimizing</i> Оптимизируемый	Производится постоянная оптимизация задач по улучшению и самообучению на основе объективных показателей. Внедрены элементы самообучения на основе технологий искусственного интеллекта
12.	Развитие регламентации	<i>Initial</i> Начальный	Регламентация отсутствует
		<i>Managed</i> Управляемый	Регламентация присутствует, но исполняется не полностью
		<i>Defined</i> Регламентированный	Регламентация присутствует, достаточна и исполняется
		<i>Quantitatively managed</i> Количественно управляемый	Регламентация присутствует в эффективной форме, облегчающей поиск, развитие и использование
		<i>Optimizing</i> Оптимизируемый	Регламентация непрерывно развивается на основе встроенных механизмов самообучения
13.	Информация	<i>Initial</i> Начальный	Достаточная информация отсутствует. Информационный обмен не налажен
		<i>Managed</i> Управляемый	Задачи по сбору и обмену информацией существуют, но не реализуются полностью
		<i>Defined</i> Регламентированный	Задачи по сбору и обмену информацией существуют и реализуются полностью
		<i>Quantitatively managed</i> Количественно управляемый	Осуществляется количественная оценка эффективности сбора и обмена информацией. Информация рассматривается как ценный производственный актив, доходность которого количественно оценивается
		<i>Optimizing</i> Оптимизируемый	Система сбора и обмена информацией непрерывно развивается и оптимизируется. Обеспечивается рост доходности информации как актива
14.	Масштаб	<i>Initial</i> Начальный	Эффективность и качество связываются с деятельностью отдельных специалистов и команд
		<i>Managed</i> Управляемый	Эффективность и качество зависят от процессов предприятия
		<i>Defined</i> Регламентированный	Эффективность и качество распространяются на ближайших контрагентов и локально
		<i>Quantitatively managed</i> Количественно управляемый	Эффективность и качество предприятия распространяются на отрасль
		<i>Optimizing</i> Оптимизируемый	Эффективность и качество предприятия устанавливают стандарты для международной экономики

### Инжиниринг качества на основе универсальной модели зрелости

Под термином «инжиниринг качества» понимают деятельность, основанную на применении научных знаний и технических принципов, связанную с разработкой и подготовкой производственного процесса, обеспечением его нормального хода и реализации продукции, управление отдельными компонентами системы предприятия-продукта и их взаимосвязями: целенаправленное изменение элементов системы продукта с целью максимизации ценности, которую создает продукт для окружающей среды, всех участников производственного цикла продукта, производимое при помощи обеспечения непрерывного самообучения и адаптации, образования сетевых интеллектуальных надсистем и комплексных продуктов и воздействия на команды людей (как на стороне потребителя, так и на стороне производителя); процессы; инструменты, основанные на цифровых технологиях; средства и методы контроля производителем [3].

Применительно к разработанной эталонной модели зрелости определим инжиниринг качества следующим образом: инжиниринг качества – это непрерывная планомерная поступательная деятельность по повышению уровня зрелости предприятия с целью его опережающей многоуровневой взаимной внутренней адаптации, а также опережающей взаимной адаптации предприятия с внешней средой на всех этапах жизненного цикла продуктов, включая проектирование, производство, распространение и потребление.

На практике методология применения данного определения сводится в соответствии с подходом, применяемым для СММ, к циклу постоянного улучшения (применим DMAIC – Define Measure

Analyze Improve Control) и повторению шагов, приведенных в табл. 2.

В случае значительной рассинхронизации уровней зрелости векторов в целях минимизации затрат шаги 1–5 после проведения общей оценки могут выполняться для отдельного вектора до устранения значительного (более одного уровня) отставания.

Проведение оценки и выработки мер для достижения более высокого уровня зрелости позволяет определить их минимальный набор в разрезе каждого элемента для достижения следующего уровня зрелости.

Если предприятие оказалось на 1-м уровне, то для каждого вектора первого уровня учитывается минимальный набор мер для достижения 2-го уровня с учетом расчета по медиане.

Сумму мер для достижения следующего уровня зрелости для организации можно определить как «минимальную дистанцию этапа зрелости». Она определяет объем трудовых, временных и материальных затрат, необходимых для достижения следующего уровня зрелости и, следовательно, более высокого уровня качества продукта. Для ее вычисления необходимо выбрать необходимое минимальное количество рекомендованных мер по каждому вектору развития, оценить их плановую (обычно оценка производится экспертно) затратность и просуммировать. Целесообразно суммирование производить отдельно по различным видам затрат, а в части временных – с учетом возможности проведения работ параллельно (аналогично вычислению длительности критического пути проекта).

Таким образом, предложенная модель зрелости позволяет не только оценить уровень зрелости и выработать приоритетные задачи по его повышению, но и измерить объем затрат, необходимых для достижения следующего более высокого уровня.

Таблица 2. Инжиниринг качества цифрового предприятия для модели зрелости в цикле постоянного улучшения DMAIC

№ п/п	Этап DMAIC	Шаг инжиниринга качества
1.	Define	Определение объекта и методики оценки
2.	Measure	Проведение оценки уровня зрелости предприятия
3.	Analyze	Определение векторов, имеющих минимальный уровень, и планирование мер по повышению уровня зрелости в рамках отдельных векторов, но не более, чем на один уровень
4.	Improve	Реализация запланированных мер по повышению уровня зрелости отдельных векторов
5.	Control	Проведение контрольной оценки уровня зрелости



## Заключение

С точки зрения авторов, предложенная модель зрелости может служить эффективным инструментом для оценки и управления качеством передовых проектов, основанных на гибридной технологии объединения распределенного реестра и децентрализованных систем искусственного интеллекта. Разработанная модель при этом, основываясь на апробированных десятилетиями в рамках различных моделей зрелости подходах и новаторском применении теории взаимной адаптации, является достаточно универсальной для применения к широкому классу предприятий, выпускающих сложные технологичные продукты, в том числе цифровые. Предложенная эталонная модель может использоваться как шаблон при разработке и уточнении специализированных моделей зрелости.

К сожалению, формат журнальной статьи ограничивает объем представляемой информации и делает обоснованной отсылку к последующему более широкому исследованию, которое может включить примеры применения предложенной универсальной модели зрелости для разнородных цифровых и традиционных предприятий, проверку и калибровку характеристик уровней зрелости для выделенных векторов развития, уточнение списка этих векторов.

## Источники

1. Как искусственный интеллект может помочь блокчейн-разработчикам? [Электронный ресурс]. Binance. 2023. URL: <https://www.binance.com/ru/blog/all/8319500829156001205>

2. T. M. T. S. I. N. J. S. k. M. A. K. & N. H. Yazeed Yasin Ghadi. A hybrid AI-Blockchain security framework for smart grids 2025 [Электронный ресурс]. Nature. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-05257-w>

3. Чекмарев А.В., Азаров В.Н. Устойчивое развитие и технологии роста: Международная научно-практическая конференция. Санкт-Петербург, 21–23 октября 2024 г. // Цифровой продукт и его свойства. СПб., 2024.

4. Венда В.Ф. Системы гибридного интеллекта. М.: ЛЕНАНД, 2020.

5. Чекмарев А.В. Разработка метода количественного анализа конфликтов при управлении качеством информационно-технологических проектов: Дис. ... канд. техн. наук. М.: Рос. гос. технол. ун-т им. К.Э. Циолковского (МАТИ), 2012.

6. What is a Strategy Management Maturity Model and How to Use It? [В Интернете]. Quantive, 2025. URL: <https://quantive.com/resources/articles/strategy-management-maturity-model>

7. Чекмарев А.В., Азаров В.Н. Цифровой продукт – свойства и качество, Time/Team – bound digital product management (ТТ-QM): Материалы IX Международной научно-практической конференции «Менеджмент качества, транспортная и информационная безопасность, информационные технологии». Нальчик, 2024.

8. Азаров В.Н. Бизнес-процесс как нейрон. Процессная архитектура как нейронная сеть // Качество, инновации, образование. 2024. Т. 192. № 4.

9. Чекмарев А.В., Азаров В.Н., Кузина Е.Л., Кузина М.А. Трехмерная процессная архитектура цифрового производства: параллели с нейронными сетями // Петербургский экономический журнал, 2025. С. 6–17.

10. Азаров В.Н. Применение методологий, методов и инструментов Всеобщего управления качеством при проектировании цифрового предприятия. «Бережливо-шестисигмовая цифровая производственная модель» // Качество, инновации, образование. 2024. Т. 191. № 3. С. 3–29.

11. Sood A.C., Konika Singh Dhull. The Future of Six Sigma-Integrating AI for Continuous Improvement // International Journal of Innovative Research in Engineering and Management. 2024. Vol. 11. No. 5.

12. Азаров В.Н., Чекмарев А.В., Кузина Е.Л., Кузина М.А. Интеграция сбалансированной системы показателей и шесть сигм для управления ИТ-проектами, проектировании цифровых процессов и продуктов // Петербургский экономический журнал. 2024. Сентябрь.

13. Чернышев Е.К., Чекмарев А.В., Азаров В.Н. Построение самонастраивающейся и самообучающейся системы общего менеджмента цифрового предприятия // Качество. Инновации. Образование. 2025. Т. 196. № 2. С. 84–89.

14. Азаров В.Н., Кузина Е.Л., Чекмарев А.В. Цифровая трансформация государства, экономики, общества и человека / Под ред. В.Н. Азарова. М.: Фонд «Европейский центр по качеству», 2025.

15. Crosby P.B. Quality Is Free: The Art of Making Quality Certain. N.Y.: Penguin Books, 1980.

16. Чекмарев А.В. Качество, зрелость, институционализм // Качество. Инновации. Образование. 2014. № 6(109). С. 19–23.

17. Huaiqing Wang K.C., Huaiqing Wang D.X. A maturity model for blockchain adoption [Электронный ресурс]. 2016. URL: <https://jfin-swufe.springeropen.com/articles/10.1186/s40854-016-0031-z>

18. Чекмарев А.В., Азаров В.Н., Куприянов Ю.В. Цифровое качество: Монография. Ярославль: Академии Пастухова, 2024.

19. Norfolk D. Managing capability and maturity // Bloor Research, 2006.

20. CMMI [Электронный ресурс]. Maturity-Profile-Ending-Jun-30-2016.pdf. URL: <http://partners.cmmiinstitute.com>

21. Carnegie Mellon University Software Engineering Institute. CMMI® for Development, Version 1.3 [Электронный ресурс]. Carnegie Mellon University Software Engineering Institute, 2010. URL: <https://insights.sei.cmu.edu/library/cmmi-for-development-version-13/>

22. Chekmarev A. Conflict Analysis for Project and Maturity Management // DAAAM International Scientific Book, 2014. Published by DAAAM International. ISBN 978-3-90150998-8, ISSN 1726-9687. Vienna, Austria, 2014. P. 577–584.

23. Чекмарев А.В., Азаров В.Н., Бубненко А.О., Власюк Е.А., Спендер Л.В., Трандофиров Д.А. Управление ИТ-процессами и ИТ-проектами. М.: МИИТ, 2020.

24. Gibson D., Goldenson D., Kost K. CMU/SEI-2006-TR-004 Performance Results of CMMI-Based Process Improvement. Software Engineering Institute, 01.08.2006 [Электронный ресурс]. URL: <https://insights.sei.cmu.edu/library/performance-results-of-cmmi-based-process-improvement/>

25. Чекмарев А.В., Азаров В.Н. Использование количественных характеристик конфликтов в це-

лях оперативного управления проектами и оценки уровня зрелости в соответствии с моделью CMMI // Информатизация образования и науки. 2011. № 4. P. 86–93.

26. Barki H. Interpersonal Conflict and Its Management in Information System Development // MIS Quarterly. 2001. P. 195–228.

27. Чекмарев А.В., Азаров В.Н., Куприянов Ю.В. Управление качеством цифровых продуктов и проектами цифровой трансформации. СПб.: Лань, 2024.

28. Чекмарев А.В., Азаров В.Н., Андрейчиков А.В., Майборода В.П., Титов А.В., Леохин Ю.Л., Саксонов Е.А., Кабанов А.С. Методы инженерии в задачах цифровой трансформации экономики: В 4 т. Ярославль: Изд-во Академии Пастухова, 2021.

29. Майборода В.П., Азаров В.Н., Панычев А.Ю. Основы обеспечения качества. М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015.

30. Дружинин В. Введение в теорию конфликта. М.: Радио и связь, 1989.

31. Орлов А.И. Экспертные оценки. М., 2002.

32. Брукс П. Метрики для управления ИТ-услугами. М.: Альпина Бизнес Букс, 2008.

## Sources

1. How Can Artificial Intelligence Help Blockchain Developers? [Electronic resource]. Binance. 2023. URL: <https://www.binance.com/ru/blog/all/8319500829156001205>

2. T. M. T. S. I. H. J. S. k. M. A. K. & H. H. Yazeed Yasin Ghadi. A hybrid AI-Blockchain security framework for smart grids 2025 [Electronic resource]. Nature. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-05257-w>

3. Chekmarev A.V., Azarov V.N. Sustainable development and Growth Technologies: International Scientific and Practical Conference. St. Petersburg, October 21–23, 2024 // Digital product and its properties. St. Petersburg, 2024.

4. Venda V.F. Hybrid Intelligence Systems. Moscow: LENAND, 2020.

5. Chekmarev A.V. Development of a Method for Quantitative Analysis of Conflicts in Quality Management of Information Technology Projects: Diss. ... Cand. Tech. Sciences. Moscow: Russian State Technological University named after K.E. Tsiolkovsky (MATI), 2012.

6. What is a Strategy Management Maturity Model and How to Use It? [Online]. Quantive, 2025. URL: <https://quantive.com/resources/articles/strategy-management-maturity-model>

7. Chekmarev A.V., Azarov V.N. Digital Product – Properties and Quality, Time/Team – Bound Digital Product Management (TT-QM): Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference “Quality Management, Transport and Information Security, Information Technology”. Nalchik, 2024.

8. Azarov V.N. Business process as a neuron. Process architecture as a neural network // Quality, innovation, education. 2024. Vol. 192. No. 4.

9. Chekmarev A.V., Azarov V.N., Kuzina E.L., Kuzina M.A. Three-dimensional process architecture of digital production: parallels with neural networks // Petersburg Economic Journal, 2025. Pp. 6–17.

10. Azarov V.N. Application of methodologies, methods, and tools of Total Quality Management in designing a digital enterprise. «Lean Six Sigma Digital Manufacturing Model» // Quality, innovation, education. 2024. Vol. 191. No. 3. Pp. 3–29.



11. Sood A.C., Konika Singh Dhull. The Future of Six Sigma-Integrating AI for Continuous Improvement // International Journal of Innovative Research in Engineering and Management. 2024. Vol. 11. No. 5.
12. Azarov V.N., Chekmarev A.V., Kuzina E.L., Kuzina M.A. Integration of the Balanced Scorecard and Six Sigma for IT Project Management, Design of Digital Processes and Products // Petersburg Economic Journal. 2024. September.
13. Chernyshev E.K., Chekmarev A.V., Azarov V.N. Building a Self-Adjusting and Self-Learning General Management System for a Digital Enterprise // Quality. Innovations. Education. 2025. Vol. 196. No. 2. Pp. 84–89.
14. Azarov V.N., Kuzina E.L., Chekmarev A.V. Digital transformation of the state, economy, society and man / Ed. V.N. Azarov. Moscow: Foundation «European Center for Quality», 2025.
15. Crosby P.B. Quality Is Free: The Art of Making Quality Certain. New York: Penguin Books, 1980.
16. Chekmarev A.V. Quality, maturity, institutionalism // Quality. Innovations. Education. 2014. No. 6 (109). P. 19–23.
17. Huaiqing Wang K.C., Huaiqing Wang D.X. A maturity model for blockchain adoption [Electronic resource]. 2016. URL: <https://jfin-swufe.springeropen.com/articles/10.1186/s40854-016-0031-z>
18. Chekmarev A.V., Azarov V.N., Kupriyanov Yu.V. Digital quality: Monograph. Yaroslavl: Pastukhov Academy, 2024.
19. Norfolk D. Managing capability and maturity // Bloor Research, 2006.
20. CMMI [Electronic resource]. Maturity-Profile-Ending-Jun-30-2016.pdf. URL: <http://partners.cmmiinstitute.com>
21. Carnegie Mellon University Software Engineering Institute. CMMI® for Development, Version 1.3 [Electronic resource]. Carnegie Mellon University Software Engineering Institute, 2010. URL: <https://insights.sei.cmu.edu/library/cmmi-for-development-version-13/>
22. Chekmarev A. Conflict Analysis for Project and Maturity Management // DAAAM International Scientific Book, 2014. Published by DAAAM International. ISBN 978-3-90150998-8, ISSN 1726-9687. Vienna, Austria, 2014. P. 577–584.
23. Chekmarev A.V., Azarov V.N., Bubnenkova A.O., Vlasyuk E.A., Splendor L.V., Trandofirov D.A. IT Process and IT Project Management. M.: MIIT, 2020.
24. Gibson D., Goldenson D., Kost K. CMU/SEI-2006-TR-004 Performance Results of CMMI-Based Process Improvement. Software Engineering Institute, 01.08.2006 [Electronic resource]. URL: <https://insights.sei.cmu.edu/library/performance-results-of-cmmi-based-process-improvement/>
25. Chekmarev A.V., Azarov V.N. Using quantitative characteristics of conflicts for the purposes of operational project management and assessing the level of maturity in accordance with the CMMI model // Informatization of education and science. 2011. No. 4. P. 86–93.
26. Barki H. Interpersonal Conflict and Its Management in Information System Development // MIS Quarterly. 2001. P. 195–228.
27. Chekmarev A.V., Azarov V.N., Kupriyanov Yu.V. Managing the quality of digital products and digital transformation projects. St. Petersburg: Lan, 2024
28. Chekmarev A.V., Azarov V.N., Andreychikov A.V., Maiboroda V.P., Titov A.V., Leokhin Yu.L., Saksanov E.A., Kabanov A.S. Engineering methods in the problems of digital transformation of the economy: In 4 volumes. Yaroslavl: Publishing house of Pastukhov Academy, 2021.
29. Maiboroda V.P., Azarov V.N., Panychev A. Yu. Fundamentals of quality assurance. Moscow: Federal State Budgetary Educational Institution of Additional Professional Education «Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport», 2015.
30. Druzhinin V. Introduction to the theory of conflict. Moscow: Radio and Communications, 1989.
31. Orlov A.I. Expert assessments. Moscow, 2002.
32. Brooks P. Metrics for IT service management. M.: Alpina Business Books, 2008.

# Переработка пластиковых отходов в топливо и нефтехимическое сырье методом термолиза

**П.А. Малявина**

студент, Российский государственный  
университет нефти и газа  
имени И.М. Губкина; Москва

**А.Ю. Попов**

ведущий научный сотрудник, канд. хим. наук,  
Научно-исследовательский институт  
«Центр экологической промышленной  
политики»; г. Мытищи  
e-mail: a.popov@eipc.center

**Аннотация.** В статье представлен обзор современных технологий переработки пластиковых отходов. Рассмотрены мировые тенденции в области утилизации пластиковых отходов, статистические данные об объемах образования и переработки отходов, а также анализ эффективности различных методов переработки. Проанализированы потенциальные области применения продуктов термолиза, а также экологические и экономические аспекты данной технологии. Особое внимание уделено перспективам развития термолиза как эффективного метода переработки пластиковых отходов и получения ценного сырья для нефтехимической промышленности.

**Ключевые слова:** вторичная переработка, пластиковые отходы, полиэтилен, термолиз полиэтилена, утилизация отходов.

**Summary.** This article presents an overview of modern technologies for plastic waste recycling. It examines global trends in plastic waste disposal, statistical data on waste generation and recycling volumes, and an analysis of the effectiveness of various recycling methods. The potential application areas of pyrolysis products are analyzed, as well as the environmental and economic aspects of this technology. Particular attention is paid to the prospects for the development of pyrolysis as an effective method for plastic waste recycling and obtaining valuable raw materials for the petrochemical industry.

**Keywords:** recycling, plastic waste, polyethylene, polyethylene pyrolysis, waste disposal.

Загрязнение планеты отходами полимерных изделий и материалов является серьезным вызовом для человечества. Производство пластиков ежегодно растет, вместе с тем растет и количество отходов, производимых человеком. Мировой показатель переработки пластиковых отходов равен 9%, в отдельно взятом Евросоюзе – 44% (рис. 1).

Существует несколько способов утилизации полимерных отходов:

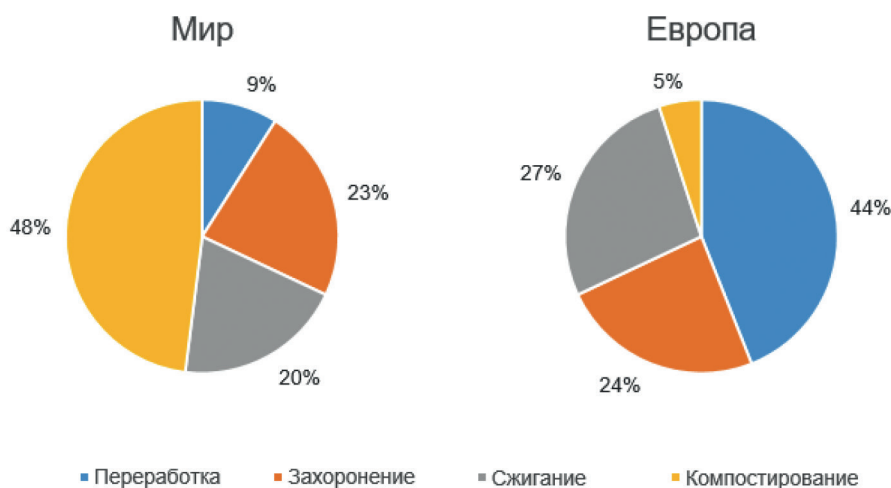


Рисунок 1. Текущие мировые и европейские показатели обращения с пластиковыми отходами

Источник: [1]

- механическая переработка;
- химическая переработка;
- энергетическая утилизация.

Захоронение как способ обращения с пластиковыми отходами, с одной стороны, характеризуется простотой, доступностью, низкой стоимостью и обеспечивает изоляцию от окружающей среды. С другой стороны, медленное разложение с последующим выделением вредных веществ, приводящим к загрязнению почвы и воды, а также неэффективное использование ресурсов определяют основные недостатки этого способа.

Механическая переработка – это физическая переработка пластиковых отходов (резка, измельчение, промывка и т.д.) во вторичное сырье, пригодное для производства пластиковых изделий. При этом полимер отделяется от загрязнений и перерабатывается в гранулы экструзией. Хотя этапы переработки варьируют, химическая структура перерабатываемого полимера не изменяется. Основными проблемами являются неоднородность перерабатываемых отходов и ухудшение свойств продукта из-за уменьшения молекулярной массы [2]. Механическая переработка подходит только для термопластичного пластика, в то время как термореактивный пластик необратимо разрушается и его переработка ограничена измельчением и использованием в качестве наполнителя в других материалах. Механическая переработка – традиционный и распространенный метод, относительно недорогой, но требующий начальных вложений.

Химическая переработка – это полная деполимеризация пластика до мономеров либо частичная – до олигомеров и других химических веществ, которые можно повторно использовать для производства новых продуктов [2]. Эта группа технологий преобразует пластиковые отходы в продукты, пригодные для применения в качестве компонентов топлив или сырья нефтехимических процессов. Для тех или иных полимеров существуют различные методы химической переработки, такие как пиролиз, термический и каталитический крекинг, гидрокрекинг и гидроконверсия [3]. Конденсационные полимеры, такие как полиэферы и полиамиды, подвергаются деградации для получения мономерных звеньев. Полиэтилен является наиболее массово производимым полимером, поэтому его вторичная переработка, в частности термолизом, наиболее актуальна с точки зрения экономики замкнутого цикла (рис. 2).

Термолиз – это процесс термического разложения веществ под воздействием температуры без доступа кислорода. Выделяют два основных подхода к реализации процесса термолиза полиэтилена: термический и каталитический пиролиз [4]. В процессе термического крекинга полиэтилена происходит деполимеризация [5] с разрывом цепи в случайных позициях, также осуществляется  $\beta$ -разрыв. Преимущественно получают нормальные альфа-олефины и алканы, среди побочных реакций – ароматизация и коксообразование.

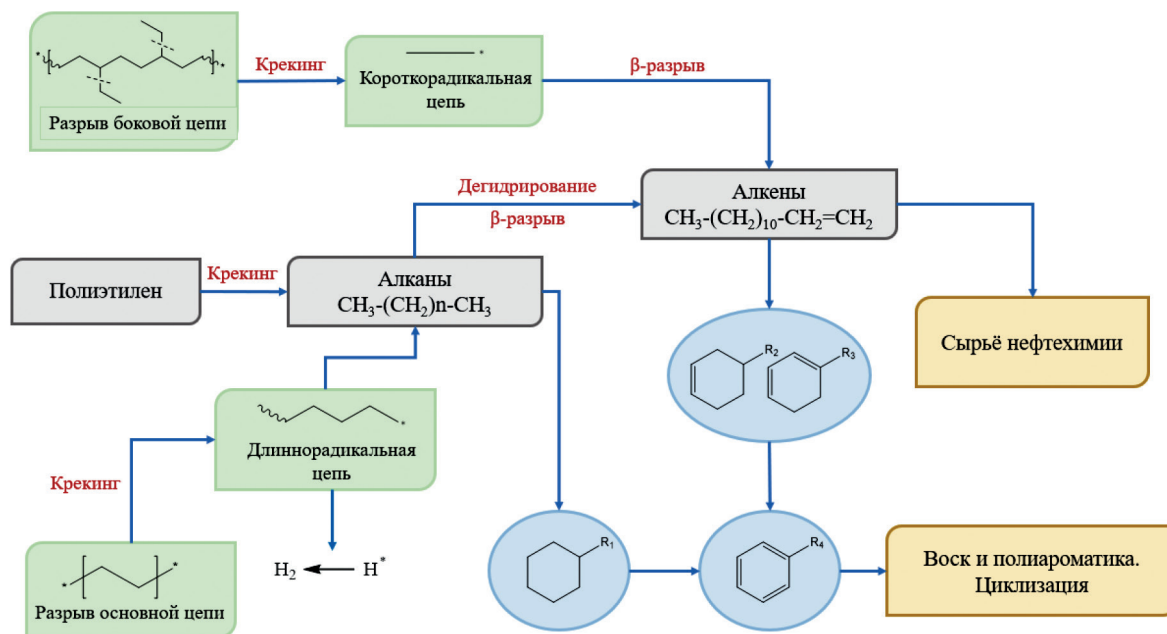


Рисунок 2. Полупродукты и продукты переработки полиэтилена в процессах термолиза и дегидрирования

Термический пиролиз предполагает нагрев полиэтилена с целью разрушения макромолекул и образования более коротких цепей или мономеров. В каталитическом пиролизе используют катализаторы для снижения температуры и времени реакции, что оказывает влияние на экономическую эффективность процесса и в ряде случаев – на его селективность. В качестве катализаторов применяются, например, цеолиты, характеризующиеся различным размером пор, концентрацией кислотных центров и площадью поверхности. Экспериментально установлено, что применение катализаторов с увеличенным размером пор способствует увеличению выхода жидких продуктов, а использование менее кислотных катализаторов – образованию легких фракций газообразных и жидких продуктов [6].

Процесс термолиза приводит к образованию сложной смеси продуктов, включающей жидкое пиролизное масло, газообразные компоненты и твердый остаток (пиролизный кокс). Состав и свойства этих продуктов зависят от условий проведения процесса, типа используемого пластика, а также от присутствия катализатора. Так, при термическом пиролизе гранул полиэтилена высокой плотности при температуре 350°C выход жидкого масляного продукта может достигать 81%, при этом основной состав этого масла представлен парафиновыми углеводородами C6–C16 [7].

Продукты, получаемые в результате термолиза пластиковых отходов, находят широкое применение в различных областях.

Пиролизное масло: может использоваться в качестве топлива или компонента топливных смесей, а также в качестве сырья для процессов нефтехимического синтеза. Переработка смешанных пластиковых отходов может потребовать дополнительной очистки и облагораживания пиролизного масла для соответствия установленным требованиям [7].

Газообразные продукты: могут найти применение для генерации энергии путем сжигания или в качестве сырья для химического синтеза широкого спектра соединений.

Твердый остаток (пиролизный кокс): может использоваться в качестве добавки в композитные материалы (в частности, в строительных материалах).

В последние годы наблюдается активное внедрение технологий химической переработки, таких как пиролиз и деполимеризация, для преобразования пластиковых отходов в топливо и другие ценные продукты. Австралийская компания OzmoTech [8] использует процесс, включающий сжижение, пиролиз, каталитическое разложение паров с высокой молекулярной массой и контролирующую дистилляцию, для преобразования пластиковых

отходов в дизельное топливо, соответствующее европейским стандартам.

В США *Natural State Research, Inc.* разработан и запатентован процесс для переработки пластиковых отходов с получением компонентов жидких топлив [8].

В Индии компания *Unique Plastic Waste Management & Research Co. Pvt Ltd* успешно внедрила коммерческую технологию, основанную на низкотемпературном плавлении с дегазацией и деполимеризацией пластиковых отходов с использованием запатентованного катализатора [9]. Полученное жидкое углеводородное топливо имеет схожие показатели с товарным бензином.

Разработанная компанией *Clariter* технология переработки пластика демонстрирует отрицательный углеродный след, что означает не только отсутствие дополнительных выбросов углерода, но и фактическое снижение его содержания в окружающей среде [10]. Отличительной особенностью технологии *Clariter* является химическая переработка, позволяющая преобразовывать отходы, не пригодные для механической переработки, в востребованное сырье: алифатические растворители, минеральные масла и парафиновые воски, используемые в дальнейшем в производстве широкого спектра потребительских товаров.

В России в последнее время наблюдается повышенный интерес к химической переработке пластиковых отходов, что обусловлено стремлением к более эффективной утилизации вторичных ресурсов и созданию экономики замкнутого цикла.

Так, компанией СИБУР планировался запуск пилотной установки термолиза пластиковых отходов на площадке «Нижнекамскнефтехим» в 2024 г. [11]. Установка предназначена для переработки пленки, пакетов и других полимерных упаковок из потока твердых коммунальных отходов для получения нефти для пиролиза и полимеров, сопоставимых по качеству с первичными.

Приведенные примеры указывают на перспективность химической переработки для эффективной утилизации пластиковых отходов и создания ценных материалов. Для дальнейшего развития этого направления необходимо совершенствовать системы сбора и сортировки отходов, разрабатывать соответствующее нормативное регулирование и привлекать инвестиции в новые технологии.

В целом наблюдается растущий интерес к применению химической переработки отходов в промышленных масштабах, что открывает возможности для решения проблемы пластиковых отходов и уменьшения зависимости от ископаемых ресурсов. Однако для успешного внедрения этих технологий необходимо учитывать экономическую эффектив-



ность, экологическую безопасность и создавать действенные системы сбора и сортировки отходов.

Важным фактором оценки эффективности процесса термолитиза для переработки пластика является качество получаемого пиролизного масла. Его состав и свойства зависят от вида перерабатываемого пластика, параметров процесса (температура, давление, время) и используемых катализаторов. Исследования показывают, что пиролизное масло из различных видов пластиковых отходов содержит углеводороды разной длины цепи (от C4 до C27), что позволяет использовать его как сырье для нефтехимии и производства топлива [8].

Сопоставление физико-химических характеристик масла термолитиза с характеристиками коммерческих топлив позволяет оценить возможность его использования в качестве альтернативного топлива и определить необходимые этапы доработки.

Хотя термолитиз пластиковых отходов имеет значительные экологические и экономические преимущества по сравнению с захоронением, необходима тщательная оценка ряда факторов для успешной реализации этого процесса. С экологической точки зрения термолитиз значительно сокращает объем отходов, отправляемых на размещение или захоронение. При этом необходимо обеспечивать строгий контроль за выбросами загрязняющих веществ в атмосферу и эффективно утилизировать побочные продукты. Экономическая целесообразность термолитиза зависит от стоимости энергии, затрат на подготовку сырья и переработку продуктов. Использование смешанных пластиковых отходов может снизить затраты на подготовку сырья, но потенциально ухудшить качество пиролизного масла [7].

## Выводы

Представленный обзор современных технологий переработки пластиковых отходов подчеркивает возрастающую значимость химических методов, в частности пиролиза, как эффективного способа решения проблемы утилизации отходов и получения ценного сырья для различных отраслей промышленности. Анализ мировых тенденций и опыта компаний из разных стран демонстрирует возможность преобразования пластиковых отходов в топливо, нефтехимическое сырье и другие востребованные продукты, снижая зависимость от ископаемых ресурсов и уменьшая негативное воздействие на окружающую среду.

При этом для успешного внедрения и масштабирования технологий химической переработки необходимо учитывать экономическую целесообразность, экологическую безопасность, необхо-

димость разработки эффективных систем сбора и сортировки отходов, а также соответствие получаемых продуктов требованиям стандартов качества. Дальнейшие исследования и разработки в области процессов термолитиза, разработки новых катализаторов и совершенствования технологий переработки позволят повысить эффективность этих процессов и снизить их негативное воздействие на окружающую среду, способствуя созданию устойчивой системы переработки пластиковых отходов и переходу к экономике замкнутого цикла.

## Источники

1. Hundertmark T., Mayer M., McNally C., Jan Simons T., Witte C. How plastics waste recycling could transform the chemical industry [Электронный ресурс]. McKinsey & Company. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/ourinsights/how-plastics-waste-recycling-could-transform-the-chemical-industry>

2. Sethi B. Methods of recycling // *Recycling of polymers: methods, characterization and applications*. 2016. P. 55–114.

3. Грингольц М.Л. и др. Химическая переработка отходов полимеров в моторные топлива и нефтехимическое сырье: Обзор // *Нефтехимия*. 2020. Т. 60. № 4. С. 464–475.

4. Ahmad I., et al. Pyrolysis study of polypropylene and polyethylene into premium oil products // *International journal of green energy*. 2015. Vol. 12. No. 7. P. 663–671.

5. Li C., et al. Different reaction behaviours of light or heavy density polyethylene during the pyrolysis with biochar as the catalyst // *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 399. P. 123075.

6. Santos B.P.S., et al. Petrochemical feedstock from pyrolysis of waste polyethylene and polypropylene using different catalysts // *Fuel*. 2018. Vol. 215. P. 515–521.

7. Thiounn T., Smith R.C. Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste // *Journal of Polymer Science*. 2020. Vol. 58. No. 10. P. 1347–1364.

8. Sarker M. Converting waste plastic to hydrocarbon fuel materials // *Energy Engineering*. 2011. Vol. 108. No. 2. P. 35–43.

9. Panda A.K., Singh R.K., Mishra D.K. Thermolysis of waste plastics to liquid fuel: A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products – A world prospective // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14. No. 1. P. 233–248.

10. Clariter's Unique Plastic Recycling Solution Achieves a Net Negative Carbon Footprint [Электронный ресурс]. Markets Insider. URL: <https://markets.businessinsider.com/news/stocks/clariter-s-unique-plastic-recycling-solution-achieves-a-net-negative-carbon-footprint-1029851905>

11. СИБУР намерен инвестировать в термоллиз отходов [Электронный ресурс]. Plastics. URL: <https://plastics.ru/publications/news/sibur-nameren-investirovat-v-termoliz-otkhodov/?ysclid=mdcwz2rwwu336554842>

## Sources

1. Hundertmark T., Mayer M., McNally C., Jan Simons T., Witte C. How plastics waste recycling could transform the chemical industry [Electronic resource]. McKinsey & Company. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/ourinsights/how-plastics-waste-recycling-could-transform-the-chemical-industry>

2. Sethi B. Methods of recycling // Recycling of polymers: methods, characterization and applications. 2016. P. 55–114.

3. Gringolts M.L. et al. Chemical processing of polymer waste into motor fuels and petrochemical feedstock: Review // Petrochemistry. 2020. Vol. 60. No. 4. P. 464–475.

4. Ahmad I., et al. Pyrolysis study of polypropylene and polyethylene into premium oil products // International journal of green energy. 2015. Vol. 12.No. 7. P. 663–671.

5. Li C., et al. Different reaction behaviors of light or heavy density polyethylene during the pyrolysis with biochar as the catalyst // Journal of Hazardous Materials. 2020. Vol. 399. P. 123075.

6. Santos B. P. S., et al. Petrochemical feedstock from pyrolysis of waste polyethylene and polypropylene using different catalysts // Fuel. 2018. Vol. 215. P. 515–521.

7. Thiounn T., Smith R.C. Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste // Journal of Polymer Science. 2020. Vol. 58.No. 10. P. 1347–1364.

8. Sarker M. Converting waste plastic to hydrocarbon fuel materials // Energy Engineering. 2011. Vol. 108. No. 2. P. 35–43.

9. Panda A.K., Singh R.K., Mishra D.K. Thermolysis of waste plastics to liquid fuel: A suitable method for plastic waste management and manufacture of value added products – A world prospective // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010. Vol. 14.No. 1. P. 233–248.

10. Clariter's Unique Plastic Recycling Solution Achieves a Net Negative Carbon Footprint [Electronic resource]. Markets Insider. URL: <https://markets.businessinsider.com/news/stocks/clariter-s-unique-plastic-recycling-solution-achieves-a-net-negative-carbon-footprint-1029851905>

11. SIBUR intends to invest in waste thermolysis [Electronic resource]. Plastics. URL: <https://plastics.ru/publications/news/sibur-nameren-investirovat-v-termoliz-otkhodov/?ysclid=mdcwz2rwwu336554842>