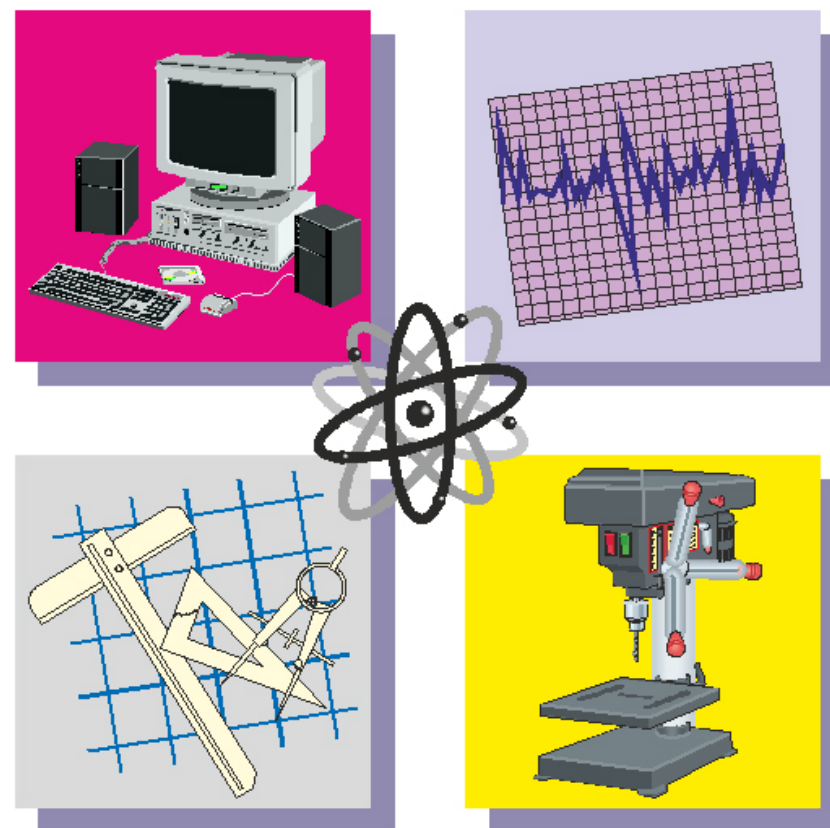


№ 1 (39)' 2025 Студенческий научно-технический журнал ИНЖЕНЕР

*Студенческий научно-технический
журнал*

ИНЖЕНЕР

№ 1(39)' 2025



ДОНЕЦК - 2025



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНЖЕНЕР

*Студенческий научно-технический
журнал*

Основан в 2000 году

№ 1(39) '2025

Донецк – 2025

УДК 621

Рекомендован к изданию Ученым Советом Донецкого национального технического университета (протокол № 5 от 30 мая 2025 г.)

Журнал «Инженер» ориентирован на публикацию научных работ студентов, магистрантов, стажеров, аспирантов, молодых специалистов по вопросам: создания и применения прогрессивных технологий; информационных технологий; механизации и автоматизации производственных процессов; управления качеством, метрологии, сертификации; вопросам экономической теории и практики; моделирования, расчетов и проектирования сложных технических систем, экологических проблем промышленности.

Издается при содействии Донецкого регионального отделения
«Союз машиностроителей России»

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донецкий национальный технический университет»

Главный редактор
Зам. гл. редактора
Отв. секретарь

Михайлов А. Н.
Лахин А. М.
Огренич Д. В.

Редакционная коллегия:

Буленков Е. А., Голубов Н. В., Горобец И. А., Петряева И. А.,
Огренич Д. В., Киселица Д. О., Жарких Д. С.

Адрес редакции:

кафедра ТМ, ДонНТУ
6-й учебный корпус, 6.305
ул. Артема, 58
г. Донецк, ДНР, 283001, Россия
Тел.: +7 949 306-09-79

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Донецкой Народной Республики. Регистрационный номер 000134 от 06 июня 2017 г.

ISSN 2073-5804

© ФГБОУ ВО «Донецкий национальный
технический университет», 2025

УДК 621.793

**СТРУКТУРА И ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА АВТОМОБИЛЬНЫХ
ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ: ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ**

Абаза Е. В., Анастасьев А. В., Михайлов А. Н. (кафедра АТР, АДИ
ДонНТУ, г. Горловка, кафедра ТМ, ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, РФ) E-mail:
mntk21@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены состав, структура и технология нанесения лакокрасочного покрытия (ЛКП) автомобилей. Описаны функции основных компонентов краски — плёнообразователя, пигментов, растворителей, наполнителей и добавок, а также их влияние на эксплуатационные свойства покрытия. Приведена последовательность технологических этапов нанесения ЛКП: подготовка поверхности, грунтование, нанесение базового слоя, лакирование, сушка и полировка. Особое внимание уделено соблюдению технологических параметров, влияющих на качество, долговечность и соответствие лакокрасочного слоя требованиям государственных стандартов. Отмечена важность регулярного ухода за покрытием для продления срока его службы и сохранения эстетических характеристик автомобиля.

Ключевые слова: Лакокрасочное покрытие (ЛКП); Автомобильная краска; Компоненты краски; Адгезия; Мойка и полировка; Долговечность покрытия.

1. Введение

Лакокрасочное покрытие (ЛКП) автомобиля выполняет не только эстетическую функцию, но и служит важным защитным барьером, предотвращая воздействие агрессивных факторов окружающей среды и механических повреждений на кузов.

В состав автомобильной краски входят пять ключевых компонентов: плёнообразователь, пигменты, растворитель, наполнители и добавки.

Плёнообразователь представляет собой связующее вещество, обеспечивающее молекулярное сцепление между компонентами краски и окрашиваемой поверхностью. В качестве плёнообразователей используются растительные масла, натуральные и синтетические смолы, обладающие высокой адгезией и долговечностью.

Пигменты являются основными красящими элементами, определяющими цвет, укрывистость и интенсивность окраски покрытия. Кроме того, пигменты выполняют важные функциональные задачи, такие как ингибирование коррозии, повышение механической прочности и долговечности лакокрасочного слоя. Пигменты могут быть получены на основе солей металлов, металлических порошков, а также органических оксидов природного или синтетического происхождения.

Растворитель служит для придания необходимой консистенции вязким или твёрдым плёнообразователям, обеспечивая равномерное нанесение краски. В качестве растворителей применяются спирты, эфиры, углеводороды, кетоны и их смеси, обладающие высокой растворяющей способностью и совместимостью с другими компонентами краски.

Наполнители представляют собой природные минералы, такие как гипс, тальк, мел, каолин, асбест и слюда, которые вводятся в состав краски для снижения её стоимости. Помимо экономической функции, наполнители также способствуют повышению прочности и термостойкости лакокрасочного покрытия, а также улучшению его устойчивости к механическим повреждениям.

Добавки выполняют различные целевые функции, направленные на улучшение эксплуатационных характеристик краски. Антиоксиданты, например, повышают устойчивость лакокрасочного слоя к старению и атмосферным воздействиям, антипирены обеспечивают огнестойкость покрытия, а пластификаторы улучшают его эластичность и пластичность [3].



Рис. 1. Виды покрытий [2]

2. Основное содержание и результаты работы

К качеству лакокрасочного покрытия автомобиля предъявляются строгие требования, регламентированные государственными стандартами (ГОСТами) [1]. Одним из ключевых параметров является толщина лакокрасочного слоя, которая измеряется в микрометрах и должна соответствовать установленным нормативам.

Правильный уход за лакокрасочным покрытием является важным аспектом эксплуатации автомобиля. Микротрещины, возникающие на поверхности кузова, могут способствовать проникновению грязи и пыли, что приводит к их дальнейшему расширению и повреждению глубоких слоёв покрытия. Регулярная мойка позволяет удалить загрязнения с поверхности краски, а полировка заполняет микротрещины

специальными составами, восстанавливая целостность и внешний вид лакокрасочного слоя.

Таким образом, лакокрасочное покрытие автомобиля представляет собой сложную систему, состоящую из множества компонентов, каждый из которых выполняет свои специфические функции. Правильный выбор материалов и соблюдение технологии нанесения краски, а также регулярный уход за покрытием, позволяют обеспечить его долговечность и сохранение эстетических характеристик на протяжении всего срока эксплуатации автомобиля.

Технология нанесения лакокрасочных покрытий включает следующие этапы:

1. Подготовка поверхности – это самый первый и самый важный этап, который напрямую влияет на качество и долговечность лакокрасочного покрытия. На этом этапе поверхность очищают от загрязнений, обезжиривают и обрабатывают специальными химическими реагентами. Основные шаги подготовки включают:

1.1. Механическая обработка: удаление ржавчины, старых слоёв краски, царапин и неровностей с помощью абразивов (шлифовка, дробеструйная очистка).

1.2. Химическая подготовка: использование фосфатирующих растворов, хроматирующих составов или специальных грунтовок для создания защитного барьера против коррозии.

1.3. Обезжиривание: устранение масел, жиров и других загрязнений с помощью моющих растворов или пара.

2. Нанесение грунта – первого слоя, который наносится после подготовки поверхности. Она выполняет несколько ключевых функций:

2.1. Улучшает сцепление последующих слоёв краски с металлом (адгезионные грунты).

2.2. Защищает металл от коррозии (антикоррозионные грунты).

2.3. Скрывает мелкие дефекты поверхности (царапины, поры).

3. Нанесение базового слоя (цветного слоя), который определяет основной цвет автомобиля. Современные базовые краски делятся на два типа:

3.1. Акриловые однослойные (нанесаются одним слоем и обладают высокой прочностью и устойчивостью к внешним воздействиям).

3.2. Металлики и перламутры (многослойные покрытия, которые содержат алюминиевую пудру или перламутровые пигменты, создавая эффект блеска и глубины).

4. Нанесение лака – прозрачного слоя, который защищает цветной слой от ультрафиолетового излучения, атмосферных осадков, мелких царапин и загрязнений. Лаковый слой обладает высокой прочностью и износостойкостью. В автомобильной промышленности применяют два основных вида лака – однокомпонентный (высыхает естественным путём) и двухкомпонентный (требует смешивания с отвердителем для ускорения процесса высыхания и повышения износостойкости).

5. Полимеризация – финальная сушка покрытия, которая выполняется в специальных камерах при повышенной температуре. Время и температура зависят от типа покрытия и рекомендаций производителя:

5.1. Естественная сушка: при комнатной температуре, занимает больше времени.

5.2. Конвекционная сушка: ускоренная сушка с помощью горячего воздуха в камере.

5.3. Инфракрасная сушка: интенсивный нагрев поверхности инфракрасными лучами, что ускоряет процесс полимеризации.

6. Полировка и финишная отделка – шлифовка мелких дефектов и финальная полировка поверхности для достижения зеркального блеска и устранения мельчайших шероховатостей. Чаще всего применяется двух видов:

6.1. Абразивная полировка: удаляет незначительные царапины и потёртости с использованием мелкоабразивной пасты.

6.2. Щадящая полировка: устраняет микроскопические следы износа и возвращает блеск.

Иногда требуются дополнительные меры, такие как антикоррозионная защита скрытых элементов кузова (колёсные арки, днище, двери) или нанесение специальных покрытий для защиты интерьера салона (антисептические, влагоустойчивые, светоотражающие) [4].

3. Заключение

Лакокрасочное покрытие защищает кузов автомобиля и придает ему эстетичный вид. В его состав входят плёнкообразователь, пигменты, растворитель, наполнители и добавки. Качество покрытия зависит от точного соблюдения технологии: подготовки поверхности, правильной дозировки компонентов, выбора метода нанесения и сушки. Толщина слоя должна быть в соответствии с ГОСТами. Регулярный уход, мойка и полировка продлевают срок службы покрытия, сохраняя внешний вид автомобиля.

Список литературы: 1. ГОСТ 9.072-2017 Единая система защиты от коррозии и старения Покрытия лакокрасочные Термины и определения : национальный стандарт Российской Федерации – Москва : Стандартинформ, 2018. – 16 с. 2. Цыганков, А. Д. Лакокрасочное покрытие автомобиля / А. Д. Цыганков // Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых : сборник научных статей 2-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок, Курск, 01 декабря 2021 года. Том 5. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. – С. 155-158. 3. Хисамутдинов, Д. А. Автомобильные лакокрасочные материалы / Д. А. Хисамутдинов, В. Е. Разманова // Стратегические ресурсы Тюменского АПК: Люди, наука, технологии : Сборник трудов LVIII международной научно-практической конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, Тюмень, 12 марта 2024 года. – Тюмень: Государственный аграрный университет Северного Зауралья, 2024. – С. 104-111. 4. Торопынин С. И., Медведев М. С. Технология и технические средства восстановления лакокрасочных покрытий сельскохозяйственной техники без удаления продуктов коррозии // Вестник КрасГАУ. 2009. №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-i-tehnicheskie-sredstva-vosstanovleniya-lakokrasochnyh-pokrytiy-selskohozyaystvennoy-tehniki-bez-udaleniya-produktov> (дата обращения: 09.10.2025). 5. Учебное пособие: А. Ю. Попов, Е. А. Чернова. «Основы лакокрасочного производства и технологии защитных покрытий».

УДК 66.045.2:519.2

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРАКТИКА ДИСПЕРСНОГО АНАЛИЗА
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЫЛИ СИТОВЫМ МЕТОДОМ

Бедоидзе М. В., Богданец Д. А., Джедиров Д. А., Кругликова М. А.,
Степаницын А. С. (Донской государственный технический университет, г. Ростов-
на-Дону, Россия)

Аннотация. Разработаны три эффективных алгоритма идентификации размерного распределения пылевых частиц на основе результатов просеивания (ситового анализа). Исследована их чувствительность к качеству начального приближения. Установлено, что при удачном начальном приближении все алгоритмы позволяют идентифицировать параметры модели с погрешностью на уровне точности первичных измерений. Проанализировано влияние числа сит на результаты анализа, показана достаточность использованной измерительно-аналитической базы для надежной параметрической инициализации модели. Для модели распределения Розина – Раммлера – Вейбулла – Гнеденко получена аналитическая связь между заутеровскими размерами, аналогичная соотношениям Хэтча – Шоута.

Ключевые слова: дисперсный анализ, ситовый метод, математическая обработка, функция распределения.

1. Введение

Дисперсный состав пылевых частиц, образующихся в различных технологических процессах, важен для целей проектирования средств защиты работников [1-3]. Его определение возможно различными методами, основными из которых являются ситовый анализ, прямые измерения размеров на микрофотографиях и LALLS-технология [4]. Объектом данной работы выбран дисперсный анализ технологической пыли ситовым методом, а предметом – эффективная алгоритмизация с использованием современного математического аппарата и действенных средств автоматизации и вычислений.

2. Первичные данные, их обозначение, единицы измерения, связность

В результате просеивания полидисперсной пыли через систему сит [5] навеска массой m [г] разделяется на фракции $\{m_i\}$. Величина $i = 0, 1, \dots, I$ соответствует номеру сита и увеличивается с размером ячейки x_i [мм]. Размером ячейки минимального (виртуального) сита будем считать величину $x_0 = 0$ (или при размере сит, подчиняющемся геометрической прогрессии $x_0 = x_1^2/x_2$), а максимального (также виртуального) – величину $x_{I+1} = \infty$. Предполагая частицы пыли сферическими, а их единственный размер x_i – распределенным с плотностью вероятности $P(x)$, получаем массовую долю i -й фракции:

$$\frac{m_i}{m} = \frac{\rho \int_{x_i}^{x_{i+1}} P(x) \cdot x^3 dx}{\rho \int_0^{x_{I+1}} P(x) \cdot x^3 dx}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, I. \quad (1)$$

Обычно используются наборы небольшого числа сит (в нашем случае восемь), что при математической обработке результата требует преобразовать (1) в соответствующую дискретную форму:

$$\frac{m_i}{m} \approx \frac{1/4 \cdot \rho \cdot P(x_i) \cdot (x_{i+1}^4 - x_i^4)}{1/4 \cdot \rho \cdot \sum_{i=0}^I [P(x_i) \cdot (x_{i+1}^4 - x_i^4)]}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, I. \quad (2)$$

Величина $m_i \approx 1/4 \cdot \rho \cdot P(x_i) \cdot (x_{i+1}^4 - x_i^4)$ в формуле (2) суть масса -й фракции. Фигурирующую в формулах (1)-(2) величину x_{I+1} удобно положить равной $(1/2) \times x_I^2/x_{I-1}$.

Совокупность $I + 1$ соотношений (2) и набор данных $\{m_i\}$ и $\{x_i\}$ позволяют однозначно определить все $P(x_i)$ с точностью до произвольного множителя k .

Рассчитать его значение позволяет условие нормировки, выражаемое формулой:

$$\int_0^{x_{I+1}} P(x) dx = 1. \quad (3)$$

Применительно к дискретной случайной величине, реализующейся при ситовом анализе, соотношение (3) принимает вид:

$$\sum_{i=0}^I P(x_i) \cdot (x_{i+1} - x_i) = 1. \quad (4)$$

3. Алгоритм первичной параметрической идентификации

В матричной форме система идентифицирующих размерное распределение уравнений (2), (4) принимает вид:

$$\begin{pmatrix} x_1^4 - x_0^4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x_1^4 - x_0^4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_{i+1}^4 - x_i^4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{I+1}^4 - x_I^4 & 0 \\ x_1 - x_0 & x_2 - x_1 & \dots & x_{i+1} - x_i & \dots & x_I - x_{I-1} & x_{I+1} - x_I \end{pmatrix} \times$$

$$\times \begin{pmatrix} P(x_0) \\ P(x_1) \\ \dots \\ P(x_i) \\ \dots \\ P(x_I) \\ P(x_{I+1}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k \cdot m_0 \\ k \cdot m_1 \\ \dots \\ k \cdot m_i \\ \dots \\ k \cdot m_I \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где в силу однородности первых $I + 1$ уравнений и наличия нормирующего последнего уравнения в системе (5) величину коэффициента:

$$k = \frac{\sum_{i=0}^I [P(x_i) \cdot (x_{i+1}^4 - x_i^4)]}{m} \quad (6)$$

можно выбрать произвольно, например, равной единице.

Почти диагональная структура матрицы (5) позволяет рассчитать $P(x_i)$ по рекуррентным формулам:

$$P(x_i) = \frac{k \cdot m_i}{x_{i+1}^4 - x_i^4}, \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad (7)$$

а последнее уравнение этой системы позволяет должным образом нормировать найденные значения.

Результирующую табулированную плотность вероятности $P(x_i)$ и соответствующую функцию распределения $F(x_i)$ можно впоследствии представить в формульном виде [5].

4. Методы преобразования данных в формульный вид

Известно, что фракционный состав производственной пыли, образующейся в процессах однократного дробления, хорошо описывается двухпараметрическим распределением Розина – Раммлера – Вейбулла – Гнеденко [7-9]:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{D}\right)^n}, \quad P(x) = \frac{d}{dx} F(x) = \frac{n}{D} \cdot \left(\frac{x}{D}\right)^{n-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{D}\right)^n}. \quad (8)$$

Найти числовые параметры этой модели можно двумя способами [10]. Первый состоит в решении оптимизационной задачи:

$$\Phi(D, n) = \sum_{i=1}^I \left[\frac{n}{D} \cdot \left(\frac{x_i}{D}\right)^{n-1} \cdot e^{-\left(\frac{x_i}{D}\right)^n} / P(x_i)_{\text{эксп}} - 1 \right]^2 \rightarrow \min, \quad (9)$$

а второй – в решении переопределенной системы уравнений:

$$\frac{n}{D} \cdot \left(\frac{x_i}{D}\right)^{n-1} \cdot e^{-\left(\frac{x_i}{D}\right)^n} / P(x_i)_{\text{эксп}} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, I. \quad (10)$$

С математической точки зрения оба способа эквиваленты, однако каждый имеет определенные преимущества в части удобства вычислений. В EXCEL-версии программы расчетный алгоритм базируется на формуле (9), минимальность результата согласно которой достигается при выполнении условия [11]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi(D, n)}{\partial D} = \frac{\partial}{\partial D} \sum_{i=1}^I \left[\frac{n}{D} \cdot \left(\frac{x_i}{D}\right)^{n-1} \cdot e^{-\left(\frac{x_i}{D}\right)^n} / P(x_i)_{\text{эксп}} - 1 \right]^2 = 0 \\ \frac{\partial \Phi(D, n)}{\partial n} = \frac{\partial}{\partial n} \sum_{i=1}^I \left[\frac{n}{D} \cdot \left(\frac{x_i}{D}\right)^{n-1} \cdot e^{-\left(\frac{x_i}{D}\right)^n} / P(x_i)_{\text{эксп}} - 1 \right]^2 = 0 \end{cases}, \quad (11)$$

Постановка (11) является типовой и реализуется встроенным средством EXCEL «Поиск решения» с достаточно развитыми алгоритмическими опциями.

MathCAD-версия программы использует встроенный решатель нелинейных уравнений «Given – Minerr» для отыскания оптимального решения задачи в формулировке (10).

5. Метод прямой идентификации модели Розина – Раммлера – Вейбулла – Гнеденко

Как альтернатива в программе реализован алгоритм прямой минимизации невязки экспериментальных данных с моделью Розина – Раммлера – Вейбулла – Гнеденко (РРВГ), выражаемой формулой:

$$\sum_{i=0}^I \left[\frac{(x_i^{n+2} e^{-(x_i/D)^2} + x_{i+1}^{n+2} e^{-(x_{i+1}/D)^2}) \cdot (x_{i+1} - x_i)}{\sum_{i=0}^I [(x_i^{n+2} e^{-(x_i/D)^2} + x_{i+1}^{n+2} e^{-(x_{i+1}/D)^2}) \cdot (x_{i+1} - x_i)]} \cdot \frac{m}{m_i} - 1 \right]^2 \rightarrow \min, \quad (12)$$

Параметры модели в этом случае находятся путем решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial D} \sum_{i=0}^I \left[\frac{(x_i^{n+2} e^{-(x_i/D)^2} + x_{i+1}^{n+2} e^{-(x_{i+1}/D)^2}) \cdot (x_{i+1} - x_i)}{\sum_{i=0}^I [(x_i^{n+2} e^{-(x_i/D)^2} + x_{i+1}^{n+2} e^{-(x_{i+1}/D)^2}) \cdot (x_{i+1} - x_i)]} \cdot \frac{m}{m_i} - 1 \right]^2 = 0 \\ \frac{\partial}{\partial n} \sum_{i=0}^I \left[\frac{(x_i^{n+2} e^{-(x_i/D)^2} + x_{i+1}^{n+2} e^{-(x_{i+1}/D)^2}) \cdot (x_{i+1} - x_i)}{\sum_{i=0}^I [(x_i^{n+2} e^{-(x_i/D)^2} + x_{i+1}^{n+2} e^{-(x_{i+1}/D)^2}) \cdot (x_{i+1} - x_i)]} \cdot \frac{m}{m_i} - 1 \right]^2 = 0 \end{cases}, \quad (13)$$

6. Оценка качества формульного представления данных

Обычно пригодность аналитического представления экспериментальных значений $P(x_i)$ и $F(x_i)$ формулами (8) оценивается [6] по их среднеквадратичному относительному отклонению от модельных значений:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{I} \cdot \sum_{i=1}^I \left[\frac{n}{D} \cdot \left(\frac{x_i}{D} \right)^{n-1} \cdot e^{-\left(\frac{x_i}{D} \right)^2} / P(x_i)_{\text{эксп}} - 1 \right]^2}, \quad (14)$$

и одновременно по соответствующему коэффициенту корреляции:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^I P(x_i)_{\text{эксп}} \cdot P(x_i)_{\text{мод}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^I P(x_i)_{\text{эксп}}^2 \cdot \sum_{i=1}^I P(x_i)_{\text{мод}}^2}}. \quad (15)$$

В предлагаемом программном продукте качество формульного представления эмпирических данных подвергается дополнительной проверке путем сопоставления экспериментального и формульно-модельного среднего значения:

$$M(x)_{\text{эксп}} = \sum_{i=0}^I P(x_i)_{\text{эксп}} \cdot x_{i \text{ эксп}} (x_{i+1 \text{ эксп}} - x_{i \text{ эксп}}) \approx M(x)_{\text{мод}} = \int_0^\infty P(x)_{\text{мод}} x dx, \quad (16)$$

среднеквадратичного отклонения:

$$\begin{aligned} \sigma(x)_{\text{эксп}} &= \sqrt{\sum_{i=0}^I P(x_i)_{\text{эксп}} \cdot (x_{i \text{ эксп}} - M(x)_{\text{эксп}})^2 \cdot (x_{i+1 \text{ эксп}} - x_{i \text{ эксп}})} \approx \\ &\approx \sigma(x)_{\text{мод}} = \sqrt{\int_0^\infty P(x)_{\text{мод}} \cdot (x - M(x)_{\text{мод}})^2 dx} \end{aligned}, \quad (17)$$

асимметрии:

$$\begin{aligned} \text{Skewness}(x)_{\text{ЭКСП}} &= \frac{\sum_{i=0}^I P(x_i)_{\text{ЭКСП}} \cdot (x_{i \text{ ЭКСП}} - M(x)_{\text{ЭКСП}})^3 \cdot (x_{i+1 \text{ ЭКСП}} - x_{i \text{ ЭКСП}})}{\sigma(x)_{\text{ЭКСП}}^3} \approx \\ &\approx \text{Skewness}(x)_{\text{МОД}} = \frac{\int_0^\infty P(x)_{\text{МОД}} \cdot (x - M(x)_{\text{МОД}})^3 dx}{\sigma(x)_{\text{МОД}}^3}, \end{aligned} \quad (18)$$

и эксцесса:

$$\begin{aligned} \text{Kurtosis}(x)_{\text{ЭКСП}} &= \frac{\sum_{i=0}^I P(x_i)_{\text{ЭКСП}} \cdot (x_{i \text{ ЭКСП}} - M(x)_{\text{ЭКСП}})^4 \cdot (x_{i+1 \text{ ЭКСП}} - x_{i \text{ ЭКСП}})}{\sigma(x)_{\text{ЭКСП}}^4} \approx \\ &\approx \text{Kurtosis}(x)_{\text{МОД}} = \frac{\int_0^\infty P(x)_{\text{МОД}} \cdot (x - M(x)_{\text{МОД}})^4 dx}{\sigma(x)_{\text{МОД}}^4}, \end{aligned} \quad (19)$$

размерных параметров сыпучего материала.

Для модели РРВГ (8) интегралы в правой части равенств (16)-(19) удается вычислить в квадратурах, и окончательные расчетные формулы принимают вид:

$$M(x)_{\text{ЭКСП}} = \sum_{i=0}^I P(x_i)_{\text{ЭКСП}} \cdot x_{i \text{ ЭКСП}} \cdot (x_{i+1 \text{ ЭКСП}} - x_{i \text{ ЭКСП}}) \approx M(x)_{\text{МОД}} = D \cdot \frac{\Gamma(1/n)}{n}, \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \sigma(x)_{\text{ЭКСП}} &= \sqrt{\sum_{i=0}^I P(x_i)_{\text{ЭКСП}} \cdot (x_{i \text{ ЭКСП}} - M(x)_{\text{ЭКСП}})^2 \cdot (x_{i+1 \text{ ЭКСП}} - x_{i \text{ ЭКСП}})} \approx \\ &\approx \sigma(x)_{\text{МОД}} = D \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Gamma(2/n)}{n} - \left(\frac{\Gamma(1/n)}{n}\right)^2}, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \text{Skewness}(x)_{\text{ЭКСП}} &= \frac{\sum_{i=0}^I P(x_i)_{\text{ЭКСП}} \cdot (x_{i \text{ ЭКСП}} - M(x)_{\text{ЭКСП}})^3 \cdot (x_{i+1 \text{ ЭКСП}} - x_{i \text{ ЭКСП}})}{\sigma(x)_{\text{ЭКСП}}^3} \approx \\ &\approx \text{Skewness}(x)_{\text{МОД}} = \frac{3 \cdot \frac{\Gamma(3/n)}{n} - 6 \cdot \frac{\Gamma(2/n)}{n} \cdot \frac{\Gamma(1/n)}{n} + 2 \cdot \frac{\Gamma(1/n)}{n}}{\left(2 \cdot \frac{\Gamma(2/n)}{n} - \left(\frac{\Gamma(1/n)}{n}\right)^2\right)^{3/2}}, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \text{Kurtosis}(x)_{\text{ЭКСП}} &= \frac{\sum_{i=0}^I P(x_i)_{\text{ЭКСП}} \cdot (x_{i \text{ ЭКСП}} - M(x)_{\text{ЭКСП}})^4 \cdot (x_{i+1 \text{ ЭКСП}} - x_{i \text{ ЭКСП}})}{\sigma(x)_{\text{ЭКСП}}^4} \approx \\ &\approx \text{Kurtosis}(x)_{\text{МОД}} = \\ &= \frac{4 \cdot \frac{\Gamma(4/n)}{n} - 12 \cdot \frac{\Gamma(3/n)}{n} \cdot \frac{\Gamma(1/n)}{n} + 12 \cdot \frac{\Gamma(2/n)}{n} \cdot \left(\frac{\Gamma(1/n)}{n}\right)^2 - 3 \cdot \left(\frac{\Gamma(1/n)}{n}\right)^4}{\left(2 \cdot \frac{\Gamma(2/n)}{n} - \left(\frac{\Gamma(1/n)}{n}\right)^2\right)^2}, \end{aligned} \quad (23)$$

где $\Gamma(x)$ – Гамма-функция Эйлера [11].

Более строгая оценка качества модели предусматривает также построение совмещенного графика «табулированные данные – формульное представление», пример которого показан на рис. 1, а также сопоставительный расчет различным образом усредненных размерных показателей (среднего степенного, среднегеометрического, среднегармонического и др.).

С этой целью в программе реализованы следующие расчетные формулы:

$$M^k(x)_{\text{эксп}} = \left[\sum_{i=0}^l P(x_i)_{\text{эксп}} \cdot x_{i \text{ эксп}}^k \cdot (x_{i+1 \text{ эксп}} - x_{i \text{ эксп}}) \right]^{1/k} \approx \quad (24)$$

$$\approx M^k(x)_{\text{мод}} = \left(\int_0^\infty P(x)_{\text{мод}} x^k dx \right)^{1/k}, \quad k \neq -1,$$

$$M_{\text{сргарм}}(x)_{\text{эксп}} = \left[\sum_{i=0}^l P(x_i)_{\text{эксп}} \cdot x_{i \text{ эксп}}^{-1} \cdot (x_{i+1 \text{ эксп}} - x_{i \text{ эксп}}) \right]^{-1} \approx \quad (25)$$

$$\approx M_{\text{сргарм}}(x)_{\text{мод}} = \left(\int_0^\infty P(x)_{\text{мод}} x^{-1} dx \right)^{-1},$$

$$M_{\text{сргеом}}(x)_{\text{эксп}} = e^{\left(\sum_{i=0}^l P(x_i)_{\text{эксп}} \cdot \ln x_{i \text{ эксп}} \cdot (x_{i+1 \text{ эксп}} - x_{i \text{ эксп}}) \right)} \approx \quad (26)$$

$$\approx M_{\text{сргеом}}(x)_{\text{мод}} = e^{\left(\int_0^\infty P(x)_{\text{мод}} \cdot \ln x dx \right)}.$$

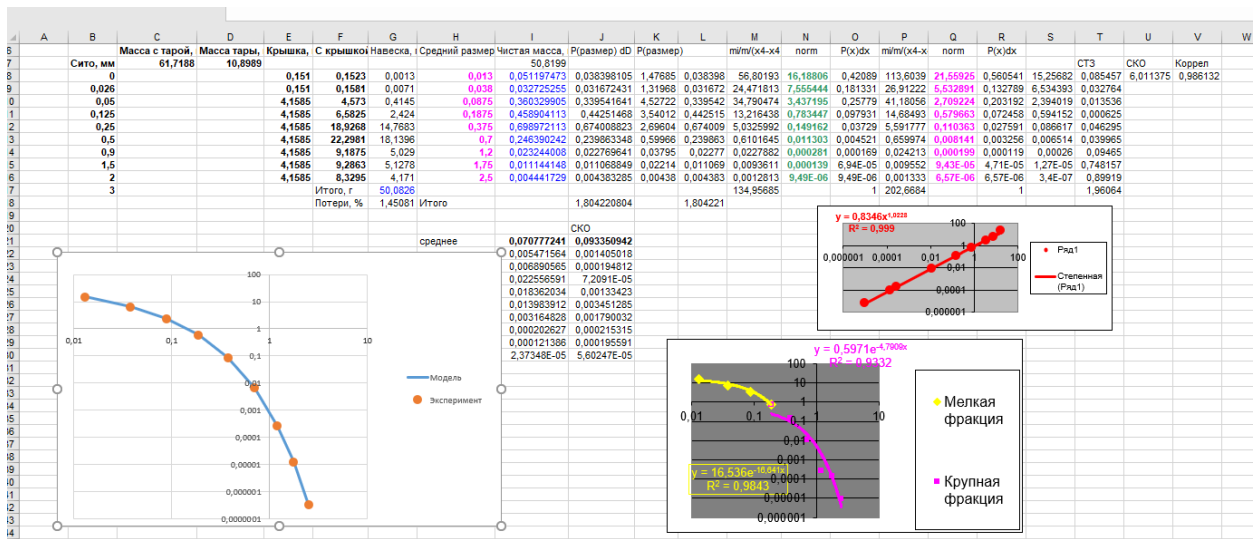


Рис. 1. Пример отображения данных, позволяющих оценить качество формульного представления

7. Расчет заутеровских диаметров на основе исходных данных и их формульное представление

Для различных приложений имеют важное значения специальным образом усредненные (т.н. заутеровские) диаметры. Если считать, что частицы среды шарообразны с диаметром x , который представляет собой непрерывную случайную величину в рамках функции распределения $F(x)$, то заутеровским диаметром ϕ_{rs} называется величина:

$$\phi_{rs} = \left[\frac{\int_0^\infty x^r dF(x)}{\int_0^\infty x^s dF(x)} \right]^{\frac{1}{r-s}}, \quad r = 1, 2, 3, 4, \quad s = 0, \dots, r-1, \quad (27)$$

которая с учётом известного соотношения $dF(x) = F'(x) dx = P(x) dx$ [6] может записываться как:

$$\phi_{rs} = \left[\frac{\int_0^\infty x^r P(x) dx}{\int_0^\infty x^s P(x) dx} \right]^{\frac{1}{r-s}}, \quad r = 1, 2, 3, 4, \quad s = 0, \dots, r-1, \quad (28)$$

Если $F(x)$ дискретна, заутеровские диаметры вычисляются по формуле:

$$\phi_{rs} = \left[\frac{\sum_{i=1}^I x_i^r}{\sum_{i=1}^I x_i^s} \right]^{\frac{1}{r-s}}, \quad r = 1, 2, 3, 4, s = 0, \dots, r-1, \quad (29)$$

в которой i – номер частицы, I – их общее число. Физический смысл и сфера использования различных ϕ_{rs} приведены в табл.

Отметим, что удобными в размерном анализе сыпучих сред являются нормированные заутеровские диаметры, т.е. величины ϕ_{rs}/ϕ_{10} , которые также рассчитываются в программе. Эти значения сравниваются с вычисленными аналитически:

$$\frac{\phi_{rs}}{\phi_{10}} = \frac{n}{\Gamma(1/n)} \cdot \left[\frac{r \cdot \Gamma(\frac{r}{n})}{s \cdot \Gamma(\frac{s}{n})} \right]^{\frac{1}{r-s}}. \quad (30)$$

Описанные выше алгоритмы интегрированы в проблемно-ориентированный программный комплекс, блок-схема которого приведена на рис. 2.

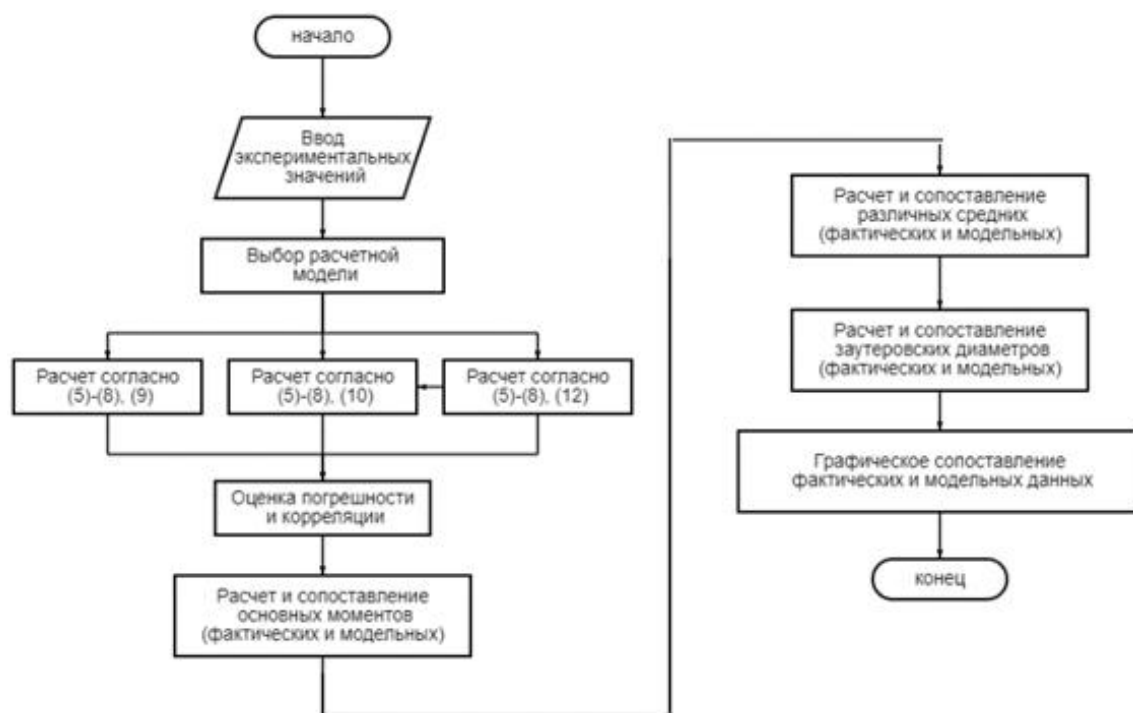


Рис. 2. Блок-схема реализующей программы

8. Практический анализ дисперсного состава технологической пыли, образующейся при фрезеровании серого чугуна

Рассмотрим результаты технического эксперимента, состоящего в сборе и последующем просеве технологической пыли при фрезеровании чугунной заготовки на различных режимах резания. В эксперименте (см. рис. 3) варьировались: режим резания – $R \in \{1, 2, 3\}$ и удаление точки сбора от источника пылевыведения – $r \in \{0.1, 0.4, 0.58, 0.78, 1.1\}$, м. Каждое сочетание параметров реализовывалось трижды с

целью сократить влияние случайных факторов. Первичные результаты измерений фиксировались в таблицах, примером которых служит табл. 1. Для автоматизации гранулометрического анализа эти таблицы дополнялись описанными выше алгоритмами расчета параметров РРВГ-модели (8).

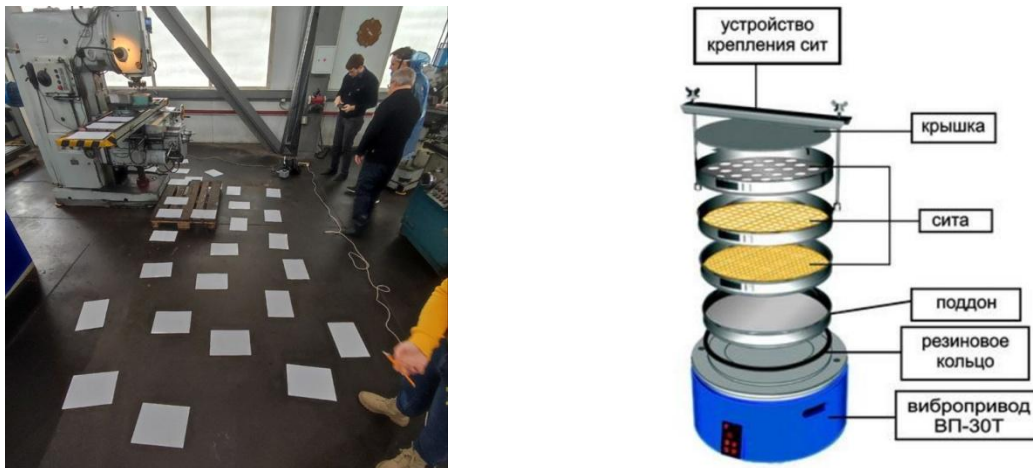


Рис. 3. Процедуры сбора (левый фрагмент) и средства гранулометрического анализа (правый фрагмент) чугуной пыли, образующейся при фрезеровании

Таблица 1. Первичные данные ситового анализа и результат их математической обработки

Сито, мм	Масса с тарой, г	Масса тары, г	Крышка, г	С крышкой, г	Навеска, г	Средний размер	Pi/k	Pi/k'dx	Pi норм	Pi модель	Расхождение
0	17,8663	12,872									
0,025			4,1387	4,1438	0,0051	0,013	11160,32352	290,1684115	13,78366972	15,6807023	0,004145293
0,05			4,1387	4,2068	0,0681	0,038	11755,51836	282,1324407	14,51877109	5,15033882	0,226863396
0,125			4,1387	4,7762	0,6375	0,0875	2679,802956	200,9852217	3,309717572	1,50905536	0,139847299
0,25			4,1387	4,9539	0,8152	0,1875	222,6039467	27,82549333	0,274929241	0,31062861	0,003716905
0,5			4,1387	5,6467	1,508	0,375	25,73653333	6,434133333	0,031786184	0,04112127	0,016394363
0,9			4,1387	7,25	3,1113	0,7	5,241408356	2,096563342	0,006473454	0,00328352	0,106889352
1,5			4,1387	4,3689	0,2302	1,2	0,052242193	0,031345316	6,45222E-05	0,00017216	0,206823124
2			4,1387	4,1859	0,0472	1,75	0,004315429	0,002157714	5,32981E-06	1,2436E-05	0,159995741
3			4,1387	4,2338	0,0951	2,5	0,001463077	0,001463077	1,80699E-06	6,0242E-07	0,249942774
Чистая масса		4,9943		Итого, г	6,5177	Итого	Итого:	809,6772299		Итого:	1,114618247
				Потери, %							

Важно, что параметры модели D и n рассчитывались тремя различными методами. Сравнение соответствующих результатов показывает, что хорошую устойчивость вычислений обеспечивают методы прямой аппроксимации экспериментально-измеренной плотности вероятности и сопоставления модельных и теоретических моментов. Метод прямой идентификации модели РРВГ (12) оказался очень требовательным к качеству начального приближения и демонстрировал слабую сходимость. Пример сопоставления показан на рис. 3 и свидетельствует о незначительности погрешности, вносимой в результат предлагаемым математическим аппаратом.

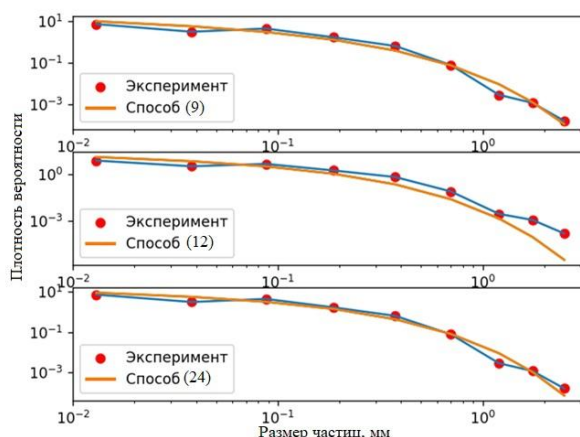


Рис. 4. Результаты идентификации размерного распределения пыли различными способами

Интересно также, какую погрешность имеет собственно физический метод сит. Для ее оценки выполнялся следующий компьютерный эксперимент. Предполагалось, что фильтрующая система содержит не восемь фактически использованных сит (с ячейками размером {2, 1.5, 0.9, 0.5, 0.25, 0.125, 0.05, 0.026}, мм, а меньше. Здесь рассматривались разные варианты ({2, 1.5, 0.9, 0.5, 0.25, 0.125, 0.05, 0.026}, {1.5, 0.9, 0.5, 0.25, 0.125, 0.05, 0.026}, {2, 1.5, 0.9, 0.5, 0.125, 0.05, 0.026}, {2, 0.5, 0.026}, {2, 1.5, 0.9, 0.5, 0.25, 0.125}, {2, 1.5, 0.9, 0.5, 0.25, 0.125, 0.05}) путем суммирования масс, осевших на нескольких реальных ситах. Результаты определения D и n на искусственно редуцированной аналитической системе приведены в табл. 2 и свидетельствуют, что использованный набор сит является достаточным для анализа данных пылевых выборок.

Таблица 2. Зависимость результатов гранулометрического анализа от числа сит

Набор сит, мм	D	n
{2, 1.5, 0.9, 0.5, 0.25, 0.125, 0.05, 0.026}	0.0204	0.571
{1.5, 0.9, 0.5, 0.25, 0.125, 0.05, 0.026}	0.0253	0.605
{2, 1.5, 0.9, 0.5, 0.125, 0.05, 0.026}	0.0200	0.568
{2, 0.5, 0.026}	0.0258	0.566
{2, 1.5, 0.9, 0.5, 0.25, 0.125}	0.0295	0.607
{2, 1.5, 0.9, 0.5, 0.25, 0.125, 0.05}	0.0191	0.563

Оценить влияние варьируемых в эксперименте факторов на геометрию пыли позволяет следующая параметризация. Представим, что геометрические характеристики пыли D и n , однозначно связанные со средним размером частиц $M(x)_{\text{эксп}}$ и среднеквадратичным отклонением $\sigma(x)_{\text{эксп}}$ от него (формулы (20)-(21)), можно описать соотношением:

$$\binom{D}{n} \binom{R}{r}_N = \binom{D}{n}_0 + \binom{D}{n}_R R + \binom{D}{n}_r r + \binom{D}{n}_N N + \binom{D}{n}_{RN} RN \quad (31)$$

или

$$\log \left[\binom{D}{n} \binom{R}{r}_N \right] = \log \left[\binom{D}{n}_0 + \binom{D}{n}_R R + \binom{D}{n}_r r + \binom{D}{n}_N N + \binom{D}{n}_{RN} RN \right]. \quad (32)$$

Выполнив параметрическую идентификацию этих моделей путем минимизации невязки между экспериментальными и расчетными значениями можно оценить влияние всех учтенных $\{r, R, N\}$, а также случайных факторов на геометрию технологической пыли. Выбрав в качестве нормы относительную погрешность, для модели (31) имеем:

$$\begin{pmatrix} D \\ n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ r \\ N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.135 \\ 0.443 \end{pmatrix}_0 + \begin{pmatrix} -0.022 \\ 0.144 \end{pmatrix}_R R + \begin{pmatrix} 0.014 \\ -0.04 \end{pmatrix}_r r + \begin{pmatrix} -0.029 \\ -0.054 \end{pmatrix}_N N + \begin{pmatrix} 0.011 \\ 0.026 \end{pmatrix}_{RN} RN. \quad (33)$$

О вкладе регулярной составляющей (33) в зависимость $\begin{pmatrix} D \\ n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ r \\ N \end{pmatrix}$ позволяет судить коэффициент корреляции $(0.32, 0.672)^T$ и относительная погрешность модельных данных по отношению к экспериментальным $(2.4, 1.26)^T$. При этом (33) требует модификации:

$$\begin{pmatrix} D \\ n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ r \\ N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.135 \\ 0.443 \end{pmatrix}_0 + \begin{pmatrix} -0.022 \\ 0.144 \end{pmatrix}_R R + \begin{pmatrix} 0.014 \\ -0.04 \end{pmatrix}_r r + \begin{pmatrix} -0.029 \\ -0.054 \end{pmatrix}_N N + \begin{pmatrix} 0.011 \\ 0.026 \end{pmatrix}_{RN} RN + \begin{pmatrix} \xi_D \\ \xi_n \end{pmatrix}. \quad (34)$$

Статистический анализ невязки определяет случайное слагаемое как:

$$P \begin{pmatrix} \xi_D \\ \xi_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot 0.152}} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{D-0.0601}{0.152} \right]^2} \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot 0.912}} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{n-0.67}{0.912} \right]^2} \end{pmatrix}. \quad (35)$$

Полученный результат свидетельствует, что геометрия частиц анализируемых образцов пыли определяется в основном случайными факторами, не фигурирующими как переменные уравнения (34). Это позволяет предположить, что гранулометрический состав определяется структурой материала заготовки и особенностями механического процесса, которые не изменялись и/или не измерялись в техническом эксперименте. Соответственно ближайшим направлением развития исследований видится анализ микрошлифов заготовки на предмет структуры материала. В качестве рабочей гипотезы предлагается следующая: геометрия пылевых частиц определяется вкраплением в чугун углеродистых пластинок, по которым происходит выкрошивание при фрезеровании.

9. Основные результаты и выводы

Разработаны методики физического и математического анализа геометрии пыли, образующейся при фрезеровании чугуна. Опытным путем доказана надежность ситового анализа при использовании доступных средств. Выявлены предпочтительные методы математической обработки результатов. Оптимальные алгоритмы математической обработки оформлены в виде предметно-ориентированного ПО [12]. Исследована зависимость геометрии пылевых частиц от режима обработки, удаленности точки сбора, а также воспроизводимости результатов. Установлен случайный характер геометрии в пределах полигона варьируемых параметров. На основании результатов исследования предложена программа развития данной НИР.

Список литературы: 1. HSE, Health Priority Plan. Occupational Lung Disease. Archived 8 Jan 2018. Available from: <https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/ukgwa/20180108165028/http://www.hse.gov.uk/aboutus/strategiesandplans/health-and-work-strategy/occupational-lungdisease.pdf> (accessed 03/10/2022). 2. HSE (2020) EH40/2005

Workplace exposure limits. Containing the list of workplace exposure limits for use with the Control of Substances Hazardous to Health Regulations (as amended). Fourth edition, published 2020. HSE Books. Available from: <http://www.hse.gov.uk/pubns/priced/eh40.pdf> (accessed 03/10/2022). **3.** HSE (2022) Wood dust. Controlling the risks. Woodworking Sheet No 23 (Revision 3). Information Sheet WIS23 (rev3). 05/22. Available from: <http://www.hse.gov.uk/pubns/wis23.pdf> (accessed 03/10/2022). **4.** Hulst H.C. Light Scattering by Small Particles. N-Y.: Courier Corporation, 1981. 470 p. **5.** Sieve Analysis Taking a close look at quality / RETSH GmbH. 2015: <https://www.retsch.com/files/8785/expert-guide-sieving.pdf>. **6.** Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Анализ данных на компьютере. М.: Инфра-М, 2003. **7.** Адушкин В.В., Попель С.И., Шишаева С.И. Анализ мелкодисперсной фракции при разрушении горных пород взрывом и образовании скальных оползней // Записки горного института. 2007. т.171. с. 32-38. **8.** Григорьев Б.С., Елисеев А.А., Погарская Т.А., Торопов Е.Е. Математическое моделирование дробления грунта и многофазного течения бурового раствора при бурении скважин // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 16-23. **9.** Королев Л.В. О распределении размеров частиц при дроблении // Информатика и ее применения. 2009. Т. 3. Вып. 3. С. 60-68. **10.** Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. Пер. с англ. — М.: Мир, 1985. **11.** Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. 13-е изд., исправленное. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986.-544 с. **12.** Азимова Н.Н., Бедоидзе М.В., Богданец Д.А. и др. Параметрическая идентификация дисперсного состава пыли на основе данных просеивания // Навигатор в мире науки и образования. 2024. № 01(62). р. 295-307.

УДК 519.6: 65.011.4

**ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО МАШИННОГО ПРОИЗВОДСТВА С
ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ М/М/1 ИЗ ТЕОРИИ ОЧЕРЕДЕЙ**

Богомоленко Д. В., Баранов И. В., Братищенко Я. А., Холодова С. Н. (кафедра ВМ,
ФГБОУ ВО «ДГТУ», Ростов-на-Дону)

Аннотация. Разработана методика количественной оценки влияния параметров обслуживания на ключевые показатели эффективности работы цехов загрузки оборудования, длины очереди и время ожидания обработки.

Ключевые слова: промышленное производство, оптимизация производственных процессов, системы массового обслуживания, теория очередей, модель М/М/1.

1. Введение

Современное промышленное производство характеризуется сложностью технологических процессов, требует эффективного управления ресурсами и минимизации простоев оборудования.

Одним из ключевых аспектов повышения производительности является оптимизация потоков материалов и распределения операций между производственными единицами.

В данном контексте Теория очередей (ТО) представляет собой мощный математический аппарат для анализа и моделирования систем массового обслуживания, позволит оценивать загрузку оборудования, время ожидания обработки и другие критические параметры.

Традиционно ТО находит применение в сфере обслуживания, например, при моделировании работы касс в розничных сетях.

В данной работе предлагается аналогичный подход, рассматривающий производственные цеха как клиентов, операторов станков - как обслуживающие аппараты (кассы), а материалы и заготовки - как требования (товары).

Такой перенос моделей ТО на производственные процессы позволяет формализовать и количественно оценить эффективность работы промышленных линий.

2. Основная часть.

В рамках исследования применяется классическая модель М/М/1 [1], предполагающая пуассоновский поток поступающих заявок (материалов) и экспоненциальное распределение времени обслуживания (обработки на станке).

Данная модель, несмотря на свою простоту, позволит выявить закономерность в загруженности операторов, средней длине очереди и времени ожидания, важные для принятия управленческих решений.

Целью исследования является анализ демонстрация применимости ТО М/М/1 к задачам промышленного производства, в частности для оценки влияния параметров обслуживания на общую эффективность работы цехов.

Система массового обслуживания (СМО) [2] включает три ключевых элемента:

1. Поток изделия λ описывается пуассоновским процессом [3], где интервалы между прибытием распределены экспоненциально:

$$P(t \leq T) = 1 - e^{-\lambda T} \quad (1)$$

2. Производно μ время обслуживания также подчиняется экспоненциальному распределению:

$$P(t_{\text{обсл}} \leq T) = 1 - e^{-\mu T} \quad (2)$$

3. Составляющие очереди материалы ожидают использования в порядке FIFO (First In, First Out).

Модель М/М/1 предполагает 1) экспоненциальное распределение времени между прибытием изделия; 2) экспоненциальное распределение времени изготовления; 2) один сервер (станок, точка выдачи изделия).

Таблица 1. Основные параметры модели М/М/1

Обозначение	Описание	Формула
λ	Интенсивность входящего потока (изделий/час)	Задается
μ	Интенсивность обслуживания (изделий /час)	Задается
ρ	Коэффициент загрузки системы	$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$

Условие устойчивости: ($\rho < 1$) (иначе очередь растет бесконечно).

Ключевые метрики:

1. Среднее число изделий в системе (L) равно:

$$L = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} = \frac{\rho}{1 - \rho} \quad (3)$$

2. Среднее время в системе (W) составляет:

$$W = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad (4)$$

3. Вероятность простоя системы (P_0) дает формулой:

$$P_0 = 1 - \rho \quad (5)$$

Для оптимизации изготовления изделий в промышленном машинном производстве рассмотрим три сценария работы цехов с разной производительностью. В каждом случае будем использовать классическую модель М/М/1 с бесконечной очередью, предполагая, что материалы ожидают использования неограниченное время.

Таблица 2. Сравнительный анализ работы цехов с разной производительностью

№	Параметры	ρ	L	W	P_0
1	$\lambda = 10$	$\frac{10}{15} = 0.666$ (система стабильная)	$\frac{10}{15-10}=2$	$\frac{1}{15-10}=12$ мин	1-0,666=0,333 (33.3% времени пунктов отгрузки склада свободна)
	$\mu = 15$				
2	$\lambda = 10$	$\frac{10}{20} = 0.5$ (система стабильная)	$\frac{10}{20-10}=1$	$\frac{1}{20-10}=6$ мин	1-0,5=0,5 (50% времени пунктов отгрузки склада свободна)
	$\mu = 20$				

Продолжение табл. 2.

3	$\lambda = 10$	$\frac{10}{25} = 0,4$ (система стабильная)	$\frac{10}{25-10} = 0,66$	$\frac{1}{25-10} = 4$ мин	$1-0,4=0,6$ (60 времени пунктов отгрузки склада свободна)
	$\mu = 25$				

Для наглядного представления работы системы массового обслуживания в условиях промышленности производства построим график зависимости времени ожидания материалов W от интенсивности входящего потока λ при фиксированной производительности трех вариациях μ (см. рисунок 1). Он позволяет определить критические точки нагрузки системы и оптимизировать работу пунктов отгрузки склада.

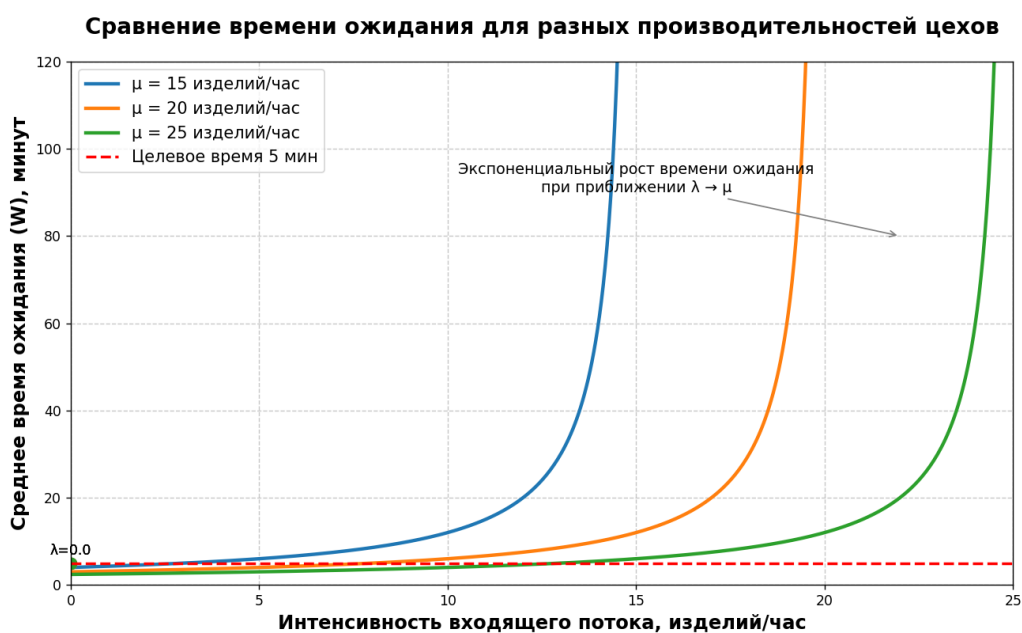


Рис. 1. Сравнение времени ожидания для различных производительности пунктов отгрузки склада

Полученный график демонстрирует нелинейную зависимость времени ожидания (W) от интенсивности потока запросов λ для трех различных значений производительности системы ($\mu = 15, 20, 25$ изделий/час). Экспоненциальный рост времени ожидания при приближении λ к μ подтверждает теоретическое условие устойчивости системы ($\rho = \frac{\lambda}{\mu} < 1$). Анализ показывает, что при стандартной нагрузке ($\lambda = 10$ изделий/час) увеличение производительности с 15 до 25 изделий/час сокращает среднее время ожидания с 12 до 4 минут. Горизонтальная линия целевого времени ожидания (5 минут) позволяет визуально определить предельные нагрузки для каждого сценария: 12, 18 и 23 изделий/час соответственно. Полученные результаты согласуются с теорией массового обслуживания и подтверждают, что для поддержания качества стабильности работы цехов необходимо либо ограничивать поток запросов, либо увеличивать производительность системы снабжения. График наглядно иллюстрирует компромисс между качеством обслуживания (временем использования) и экономической эффективностью (загрузкой ресурсов).

Анализ системы массового обслуживания типа М/М/1 позволяет получить аналитическое выражение для стационарного распределения вероятностей числа изделий в системе. Как следует из теории марковских процессов с непрерывным временем, для данной модели устанавливается геометрическое распределение вероятностей состояний системы [4].

$$P_n = (1 - \rho)\rho^n \quad (6)$$

Форма распределения (6) демонстрирует характерную экспоненциальную зависимость вероятности от числа изделий, что является следствием свойств пуассоновского потока заявок и экспоненциального распределения времени обслуживания (см. рисунок 2). Коэффициент загрузки системы ρ выступает в качестве параметра, определяющего скорость убывания вероятности с увеличением интенсивности запросов производства.

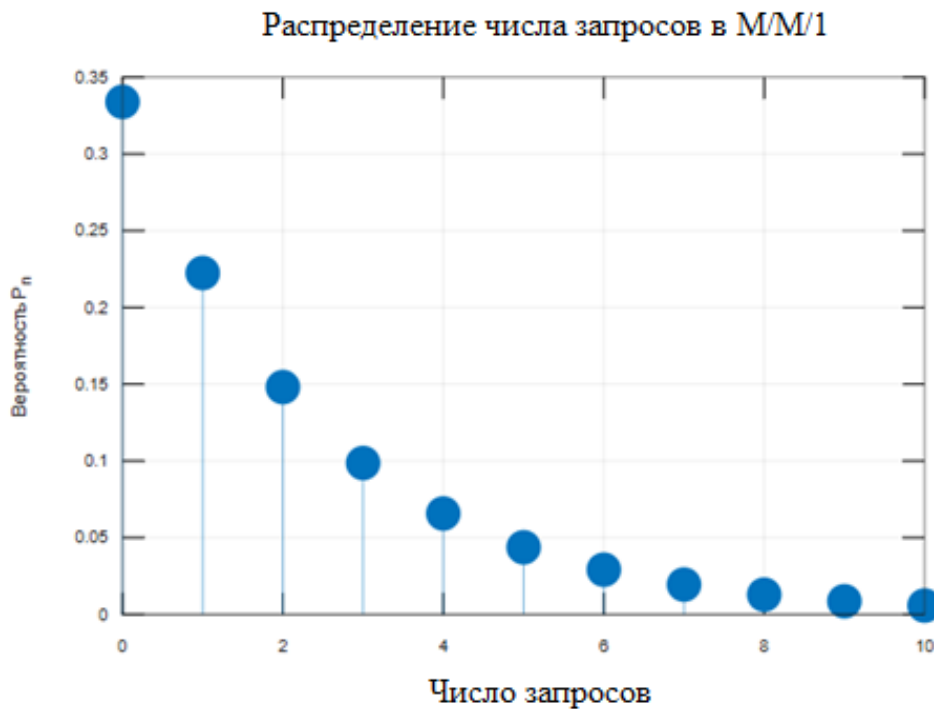


Рис. 2. Распределение числа запросов М/М/1

Базовая модель М/М/1, несмотря на свою аналитическую простоту и широкую применимость, содержит ряд существенных ограничений, которые необходимо учитывать при моделировании реальных систем. Основные модификации этой модели, позволяющие преодолеть ключевые ограничения исходной постановки задачи, собраны в таблице 3.

Таблица 3. Модифицированные модели М/М/1

Модель	Параметр	Формулы	Результат
М/М/1/К ограниченная очередь (K = 3)	Вероятность отказа (P _k)	$P_k = \frac{(1-p)p^K}{1-p^{K+1}}$	0.12 (12%)
	Среднее число изделий (L)	$L = \frac{p}{1-p} - \frac{(K+1)p^{K+1}}{1-p^{K+1}}$	1.43 изделий
	Эффективная λ (λ _{эфф})	$\lambda_{эфф} = \lambda(1 - P_k)$	8.8 изделий/час
	Среднее время в системе (W)	$W = \frac{L}{\lambda_{эфф}}$	~9.75 минут
	Ограничения	$\rho \neq 1, K - \text{конечное число}$	При $\rho \geq 1$ очередь заполняется мгновенно Макс. 3 изделий в системе
М/М/1 + М – материалы уходят из очереди (ренегинг)	Интенсивность ухода (γ)	Задается (γ = 6 изделий /час)	6 изделий /час
	Эффективная нагрузка	$\rho_{эфф} = \frac{\lambda}{\mu + \gamma}$	0.476 (47.6%)
	Среднее число клиентов (L)	$L \approx \frac{\lambda}{\mu + \gamma - \lambda}$	0.91 изделий
	Среднее время в системе (W)	$W \approx \frac{\lambda}{\mu + \gamma - 1}$	~5.45 минут
	Ограничения	Учет времени терпения клиентов	При $\gamma \rightarrow \infty$ система превращается в М/М/1/1 (без очереди) Реальные системы требуют имитации

Модель М/М/1/К – более практична, но требует выбора оптимального K, например, при K=3: 12% запросов получают отказ, среднее время ожидания ~9.75 минут.

Модель М/М/1+М – лучше отражает реальность (большое скопление материалов), но сложна для точных расчетов.

3. Заключение

Проведенное исследование демонстрирует ключевую роль ТО в управлении операционной эффективностью промышленного производства. Анализ базовой модели М/М/1 выявил фундаментальную зависимость между интенсивностью потока изделия, производительностью системы и временем ожидания, что подтверждается экспоненциальным характером роста времени обслуживания при приближении коэффициента загрузки к единице.

Сравнительная оценка модифицированных моделей показала:

1) М/М/1/К с ограниченной очередью обеспечивает контроль максимальной длины очереди, но приводит к потерям материалов (до 12% при K=3), что требует тщательного выбора параметра K на основе допустимого уровня потерь.

2) $M/M/1+M$ с учетом нетерпеливости материалов точнее отражает реальное удовлетворение запросов производства, однако её применение осложнено необходимостью эмпирически оценивать параметр γ и использовать численные методы.

Список литературы: 1. Бусарев М.И., Кирпичников А.П., Флакс Д.Б. Одноканальная система массового обслуживания с ограниченным средним временем пребывания заявки в системе в целом // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – С. 155-161. 2. Бескровная Ю.Д., Петраченко Ю.М. Эффективность использования системы массового обслуживания // Форум молодых ученых. – 2019. - №1. – С. 504-507. 3. Егоров В.А. О скорости сходимости к пуассоновскому процессу // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. - 2011. - №1. - С. 21-28. 4. Завистовский В.Э. Обзор законов распределения случайных величин при расчетах надежности технических систем // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. - 2004. - С. 108-122.

УДК 621.9.047

РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ СИНТЕЗА КОМБИНИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

Гончаров А. М., Матвиенко С. А. (кафедра АТСЭ, ДОННАСА филиал НИМГСУ, г. о. Макеевский, г. Макеевка, Россия)

Аннотация. В данной работе рассматриваются методологические основы синтеза комбинированных технологических процессов нанесения покрытий, в которых в качестве базовой технологии используется холодное газодинамическое напыление. Проводится анализ преимуществ и ограничений перспективных технологий нанесения покрытий. Предлагается методология, включающая выбор базовой технологии, определение требований к покрытию, выявление недостатков в свойствах, добавление дополнительных технологий для их устранения и оптимизацию параметров комбинированного процесса. Разработана математическая модель, описывающая влияние параметров холодного газодинамического напыления и последующей термообработки на свойства покрытия.

Ключевые слова: холодное газодинамическое напыление, комбинированные технологические процессы, нанесение покрытий, оптимизация, математическое моделирование, лазерное оплавление

1. Введение

Современное машиностроение, авиастроение и другие отрасли промышленности предъявляют всё более высокие требования к свойствам поверхностных слоёв деталей. Наносимые на поверхности покрытия направлены на обеспечение защиты от коррозии, износа, эрозии, высоких температур и других агрессивных воздействий.

При этом часто требуется сочетание нескольких свойств, таких как высокая твёрдость, хорошая адгезия, низкий коэффициент трения и высокая коррозионная стойкость, что не всегда может быть обеспечено одной технологией нанесения покрытий.

В связи с этим всё большую актуальность приобретает разработка комбинированных технологических процессов, объединяющих преимущества различных методов нанесения покрытий для достижения требуемого комплекса эксплуатационных свойств деталей.

Холодное газодинамическое напыление (ХГН) — это перспективная технология нанесения покрытий, основанная на ускорении порошковых частиц газом до сверхзвуковых скоростей и их последующей адгезии к подложке.

ХГН обладает рядом преимуществ, таких как отсутствие высоких температур, низкий уровень остаточных напряжений в покрытии, возможность нанесения материалов, склонных к окислению и разложению, а также высокая производительность [1-3].

Однако, у ХГН есть и ограничения, например относительно низкая адгезия некоторых материалов к подложке, пористость покрытия и ограниченный выбор материалов.

Целью настоящей работы является разработка методологических основ синтеза комбинированных технологических процессов нанесения покрытий на базе ХГН, направленных на устранение ограничений ХГН и достижение заданного комплекса свойств покрытия.

2. Анализ существующих технологий нанесения покрытий и их комбинаций

Существует множество технологий нанесения покрытий, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки. К наиболее распространённым относятся [4-7]:

- термическое напыление: характеризуется высокой производительностью и широким спектром наносимых материалов, высокой температурой процесса;
- гальваническое осаждение: широко используется для нанесения тонких металлических покрытий с высокой точностью и однородностью, может быть экологически небезопасным из-за использования токсичных электролитов;
- химическое осаждение из газовой фазы: позволяет получать тонкие, плотные и химически стойкие покрытия, требует высоких температур и использования прекурсоров, которые могут быть токсичными;
- физическое осаждение из газовой фазы: позволяет получать покрытия с высокой твердостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью, однако этот метод требует наличия вакуумного оборудования и может быть дорогостоящим;
- электродуговая наплавка: сопровождается высоким тепловложением и образованием зоны термического влияния;
- лазерная обработка: позволяет получать покрытия с высокой точностью и локальностью, а также улучшать структуру и свойства уже нанесённых покрытий.

Сочетание различных технологий позволяет объединить их преимущества и компенсировать недостатки. Примеры оптимальных сочетаний:

- плазменное напыление с последующей лазерной обработкой: позволяет улучшить плотность, адгезию и механические свойства плазменных покрытий.
- гальваническое осаждение с последующим термическим упрочнением: повышает твердость и износостойкость гальванических покрытий;
- холодное газодинамическое напыление с последующей термообработкой: улучшает адгезию и когезионную прочность покрытий ХГН.

3. Методология синтеза комбинированных технологических процессов на основе ХГН

Предлагаемая методология синтеза комбинированных технологических процессов на основе ХГН включает в себя следующие этапы:

1. Определение требований к покрытию: определяются свойства покрытия, такие как твердость, износостойкость, коррозионная стойкость, адгезия, толщина и условия эксплуатации.
2. Выбор базовой технологии: обосновывается выбор ХГН в качестве базовой технологии с учетом ее преимуществ и ограничений, а также требований к покрытию.
3. Анализ возможностей ХГН для достижения требуемых свойств: оценивается, насколько ХГН позволяет достичь заданного комплекса свойств.
4. Выбор технологий для устранения недостатков: выбираются технологии, совместимые с ХГН, которые позволяют компенсировать недостатки ХГН и достичь требуемого комплекса эксплуатационных свойств деталей.
5. Разработка схемы комбинированного технологического процесса: определяется подход к комбинированию технологий, а также параметры каждой технологии.
6. Оптимизация параметров комбинированного технологического процесса: проводится оптимизация параметров каждой технологии с целью достижения оптимального комплекса свойств покрытия.
7. Экспериментальная проверка и подтверждение результатов.

4. Математическое моделирование влияния параметров ХГН и последующей термообработки на свойства покрытия

Для оптимизации параметров комбинированного процесса ХГН с последующей термообработкой была разработана математическая модель, описывающая влияние параметров ХГН (скорости частиц, температуры газа, давления) и параметров термообработки (температуры, времени выдержки) на свойства покрытия (адгезию, плотность, микротвёрдость).

Модель основана на следующих предположениях:

- процесс соединения частиц при высокоэнергетическом напылении описывается теорией динамического упрочнения и деформации;
- процесс термообработки приводит к диффузионному срастанию частиц, росту зёрен и снятию остаточных напряжений.

Математическая модель включает в себя следующие уравнения:

1. Уравнение для скорости частиц:

$$v_p = v_g (1 - \exp(-C_d R_e A_p \rho_g / (2m_p t))), \quad (1)$$

где: v_p – скорость частицы; v_g – скорость газа; C_d – коэффициент сопротивления; R_e – число Рейнольдса; A_p – площадь поверхности частицы; ρ_g – плотность газа; m_p – масса частицы; t – время.

2. Уравнение для расчёта деформации при ударе:

$$\varepsilon = (v_p^2 \rho_p) / (2 \sigma_T), \quad (2)$$

где: ε – деформация; ρ_p – плотность частицы; σ_T – предел текучести материала частицы.

3. Уравнение адгезии:

$$A = A_0 + k \varepsilon, \quad (3)$$

где: A – адгезия; A_0 – начальная адгезия, k – коэффициент пропорциональности.

4. Уравнение для определения плотности покрытия после термообработки:

$$\rho = \rho_0 + (\rho_t - \rho_0) \cdot (1 - \exp(-t/\tau)), \quad (4)$$

где: ρ – плотность покрытия; ρ_0 – начальная плотность покрытия (после ХГН); ρ_t – теоретическая плотность материала покрытия, t – время термообработки, τ – характеристическое время диффузии, зависящее от температуры по закону Аррениуса:

$$\tau = \tau_0 \exp(E_a / (RT)), \quad (5)$$

где: τ_0 – предэкспоненциальный фактор; E_a – энергия активации диффузии, R – газовая постоянная, T – температура термообработки.

5. Уравнение для определения микротвёрдости после термообработки:

$$HV = HV_0 + k (\rho - \rho_0), \quad (6)$$

где: HV – микротвердость, HV_0 – начальная микротвёрдость (после ХГН), k – коэффициент пропорциональности

Данная модель позволяет прогнозировать влияние параметров ХГН и термообработки на свойства покрытия и оптимизировать их для достижения заданного комплекса свойств.

Для реализации модели необходимо определить параметры материала покрытия и подложки, а также эмпирически определить коэффициенты A_0 , k , τ_0 , E_a и k на основе экспериментальных данных.

Алгоритм оптимизации параметров комбинированного процесса:

1. Задаются требования к свойствам покрытия (адгезия, плотность и т. д.).
2. Выбираются параметры ХГН (скорость газа, температура газа, давление).
3. Выбираются параметры термообработки (температура, время выдержки).
4. С помощью разработанной математической модели рассчитываются значения свойств покрытия.
5. Рассчитанные значения свойств покрытия сравниваются с заданными требованиями.
6. Если расчётные значения свойств покрытия соответствуют заданным требованиям, то параметры комбинированного процесса считаются оптимальными.
7. Если расчётные значения свойств покрытия не соответствуют заданным требованиям, необходимо изменить параметры ХГН и/или термообработки и повторить шаги 4–6.

5. Заключение

В настоящей работе предложена методология синтеза комбинированных технологических процессов нанесения покрытий на базе ХГН, включающая выбор базовой технологии, определение требований к покрытию, выявление дефицитов свойств, добавление дополнительных технологий для их устранения и оптимизацию параметров комбинированного процесса.

Разработанная методология может быть применена для синтеза комбинированных процессов нанесения покрытий на основе ХГН с использованием различных технологий, таких как термообработка, плазменное напыление, гальваническое осаждение и другие. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку более сложных математических моделей, учитывающих влияние различных факторов на свойства покрытия, а также на расширение спектра комбинированных технологических процессов на основе ХГН для различных областей применения.

Список литературы: 1. Матвиенко С.А. Математическая модель холодного газодинамического напыления в магнитном поле // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2025. - №1 (88). – С. 28-35. 2. Матвиенко С. А. Разработка алгоритма синтеза комбинированных технологических процессов на базе холодного газодинамического напыления с применением эволюционных стратегий // Журнал передовых исследований в области естественных наук. — Сياتл, США: SRC MS, AmazonKDP. — 2025. — Выпуск 23. — С. 15-24. 3. Матвиенко, С. А. Перспективы разработки комбинированных методов обработки на базе холодного газодинамического напыления с целью повышения эксплуатационных характеристик покрытий / С. А. Матвиенко. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2025. — № 29 (580). 4. Матвиенко, С. А. Концепция формирования функциональных покрытий методом холодного газодинамического напыления / С.А. Матвиенко, Н.Д. Бачурин // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. трудов XXXI Междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополь 16 – 22 сент. 2024 г. С. 209-213. 5. Рахадиллов Б.К., Курбанбеков Ш.Р., Сейтов Б., Муктанова Н., Балтабаева Д.Э., Катпаева К. Теоретические исследования и решения оптимальных режимов процесса термического напыления HVOF для покрытия

Cr₃C₂-NiCr // Вестник НЯЦ РК. – 2023. - №4. – С. 22-31. 6. Дюльдина Н.Е., Нехорошев М.В., Проничев Н.Д. Исследование процесса гальванического осаждения металла на полимерный электрод-инструмент методом конечных элементов с использованием COMSOL Multiphysics» // Проблемы и перспективы развития двигателестроения. – 2016. – Т 2. – С. 12-13. 7. Кирюханцев-Корнеев, Ф. В. Научные и технологические принципы нанесения покрытий методами физического и химического осаждения : методы получения и исследования покрытий : учебное пособие / Ф. В. Кирюханцев-Корнеев. — Москва : МИСИС, 2015. — 56 с. — ISBN 978-5-87623-924-2. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система.

УДК 621.43.068

РАСЧЕТ ТОКСИЧНОСТИ РЕАКТИВНЫХ, ОТРАБОТАВШИХ И ДЫМОВЫХ ГАЗОВ: МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Грищенко В. И., Калмыкова К. Ф., Степаницын А. С., Цымбалов Д. С.,
Яценко О. В. (Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия)

Аннотация. Предложена универсальная математическая модель для расчета содержания вредных веществ в реактивных ракетных струях, выхлопе автотранспортных двигателей и дымовых газах горелочных устройств. Для анализа модели использован метод констант равновесия, позволяющий изучать многокомпонентные системы. Модель и ее программная реализация протестированы с помощью альтернативного наукоемкого ПО, а также путем сопоставления расчетных и экспериментальных данных для горелочного устройства, автомобильного двигателя и ракеты-носителя. Установлена надежность полученных результатов.

Ключевые слова: горение, токсичные газы, математическое моделирование, технический эксперимент, горелочное устройство, автотранспорт, ракетная техника.

1. Введение

Токсичность реактивных, отработавших и дымовых газов (РОДГ), образующихся при сжигании углеводородов, определяется рядом факторов. Во-первых, РОДГ выбрасываются в атмосферу при высокой температуре. Во-вторых, в их составе присутствуют не только продукты сгорания CO_2 и H_2O , но также ряд промежуточных CO , C_nH_m и побочных NO_x . Наконец, в составе топлив фигурируют побочные вещества (сера, тяжелые металлы и др.), которые образуют при горении множество токсинов.

Таким образом, выбранный авторами объект математического моделирования – продукты сгорания РОДГ представляет большой практический интерес, а эффективная методика расчета их состава в различных технических устройствах – заметную научную ценность.

Расчет химических превращений базируется на следующих положениях [1]:

- 1) превращение представляет собой совокупность параллельных и/или последовательных обратимых (элементарных) реакций;
- 2) динамика и энергетика реакций неразрывны;
- 3) в консервативных (замкнутых) системах равновесные состояния являются предельными;
- 4) аналогом равновесия в открытых системах служат т.н. стационарные состояния;
- 5) мгновенный состав реагирующих систем адекватно описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями;
- 6) на каждом этапе эволюции реагирующих систем выделяются главные вещества и реакции.

В качестве источников РОДГ рассмотрим три особо беспокоящих экологов:

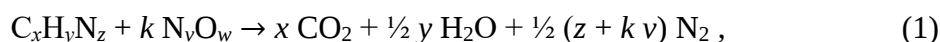
- 1) реактивные струи ракетно-космической техники [2];
- 2) отработавшие газы автотранспортных двигателей [3];
- 3) дымовые газы промышленных горелочных устройств [4].

Эти объекты объединяет общность исходного состава используемых топлив, окислителей и соответственно основных компонентов в продуктах сгорания. При этом существенно отличаются термодинамические параметры процесса сжигания, а также

места и характер выброса РОДГ. Как следствие, негативному воздействию подвержены различные области и аспекты среды обитания.

2. Универсальная модель горения

Общая математическая модель горения C – H – N – O-содержащих смесей при стехиометрическом соотношении топлива $C_xH_yN_z$ и окислителя N_vO_w выражается брутто-уравнением (химической схемой процесса) [1, 3]:



в котором v, w, x, y, z – параметры, характеризующие содержание различных элементов в топливе и окислителе, k – стехиометрический коэффициент. При неполном горении и вторичных процессах, естественно, в составе продуктов оказываются также продукты неполного сгорания или часть окислителя и/или его фрагментов. Их номенклатура требует конкретизации в каждом конкретном случае.

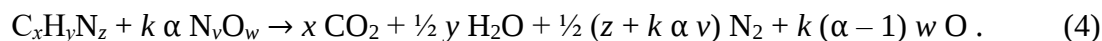
Удобно считать, что

$$x + y + z = 1 \quad \text{и} \quad v + w = 1. \quad (2)$$

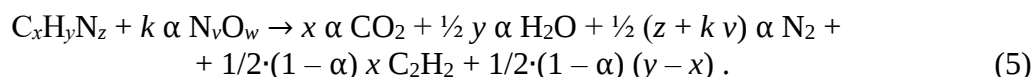
Стехиометрический коэффициент, очевидно, равен:

$$k = (2x + \frac{1}{2}y) \cdot v^{-1}. \quad (3)$$

При коэффициенте избытка окислителя $\alpha > 1$ схема (1) трансформируется в



Если коэффициент избытка окислителя $\alpha < 1$, вместо (1) имеем:



Крайне важным моментом в расчетах химических равновесий является удачный выбор «химического множества» – учитываемых в модели веществ. Оно, с одной стороны, должно включать химически значимые (в условиях превращения) вещества, с другой, вещества, опасные для человека и окружающей среды, а в-третьих, не создавать непреодолимых препятствий для математического исследования (высокая размерность уравнений в сочетании с жесткостью и/или очень плохой обусловленностью).

Предварительный анализ термохимических показателей веществ, образующихся при горении в жидкостном ракетном двигателе (ЖРД), позволяет остановиться на следующем составе продуктов сгорания: CO – O – CO₂ – O₂ – NO – OH – H – H₂O – H₂ – N₂ – C₂H₂. В этом перечне вещества, вредные для стратосферы, выделены жирным шрифтом. Оба радикала NO и OH, попадая в стратосферу вызывают разрушение озона, формируя озоновую дыру. Типичными условиями горения в ЖРД космических ракет-носителей (РН) являются температура 2700-3000 К, давление 50-200 атм и коэффициент избытка окислителя $\alpha \approx 0.7$.

Выхлоп поршневых ДВС бензиновых, дизельных, а также использующих спиртовые и комбинированные топлива растительного происхождения можно описать в

рамках множества следующих веществ (жирным шрифтом выделены опасные для человека и природы токсины): CO – O – CO_2 – O_2 – NO – OH – H – H_2O – H_2 – N_2 – C_2H_2 . Однако при этом регламентируемый санитарными нормами (СН) выброс углеводородов описывается слишком грубо. Ацетилен C_2H_2 , хоть и определяющий образование чрезвычайно токсичного бенз(а)пирена $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$, не исчерпывает всех недогоревших продуктов термического распада топлива. Поэтому данную модель следует дополнить соответствующими веществами. Характерными условиями процесса являются температура 1200-2700 К, давление 10-100 атм и коэффициент избытка окислителя $\alpha \approx 0.7$ -1.3. Особенностью процесса является существенная параметрическая неоднородность, нестационарность и ограниченность во времени. Это обстоятельство снижает надежность результатов КМ вследствие используемых в моделях термохимии (1)-(5) предположений. Спецификой воздействия данного вида РОДГ является неоднородность их распределения – вдоль автомагистралей.

Известно, что при качественной организации сжигания РОДГ горелочных устройств (ГУ) практически не содержат высокомолекулярных углеводородов. Это позволяет ограничить схему горения следующими веществами:

- 1) кислородсодержащими O_2 и O ;
- 2) водородсодержащими H и H_2 ;
- 3) оксидами водорода OH , HO_2 , H_2O , H_2O_2 ;
- 4) углеводородом и углеводородами C , CH , CH_2 , C_2H_2 , C_2H_4 ;
- 5) оксидами углерода CO , CO_2 ;
- 6) азотом и его оксидами N_2 , N , NO , N_2O , NO_2 .

К перечисленным веществам следует добавить исключительно токсичные циан C_2N_2 , синильную кислоту HCN и ацетилен C_2H_2 – основной источник сажи [3]. Результирующая модель объединяет двадцать два соединения атомов C , H , N и O . Процесс в промышленных ГУ характеризуется температурой ~ 1200 К и атмосферным давлением. Коэффициент избытка воздуха ограничен интервалом $1 \leq \alpha \leq 1.3$ [4].

Рассчитать равновесный состав многокомпонентной химической системы можно одним из двух способов [5, 6]. Первый обычно применяется отечественными учеными и заключается в прямой минимизации термохимического потенциала (ТХП) Гиббса – Гельмгольца, а второй (его используют в англо-американской научной школе) – в сочетании уравнений химического равновесия между отдельными веществами системы с уравнениями материального баланса и состояния. Недостатком первого метода является сочетание высокой размерности с плохой обусловленностью матриц. Плохо обусловленные матрицы появляются при линеаризации уравнений, отвечающих необходимому условию экстремума. Например, для совокупности N элементов в M веществах, СНАУ равновесия при прямой минимизации ТХП имеет размерность $N + M$. Ее численное решение оказывается проблематичным.

3. Метод констант равновесия

Описанный ниже метод в данной задаче продуктивней, поскольку размерность системы совпадает с числом элементов N . Опыт расчета химического состава РОДГ показывает, что итерационный вычислительный процесс при непосредственной минимизации ТХП теряет устойчивость, когда число учитываемых в модели веществ превышает 10-13.

Поэтому в данной работе для расчета состава ДГ отработываемого РОДГ предлагается использовать метод констант равновесия [1].

Метод констант равновесия требует последовательно выполнить следующие

действия:

- 1) выбрать «химический базис»;
- 2) составить уравнения реакций как комбинаций базисных веществ;
- 3) составить уравнение материального баланса для всех элементов системы, кроме одного;
- 4) составить уравнение состояния системы.

В итоге получается система уравнений для «базисных» переменных, в которой концентрации всех прочих веществ выражаются через базисные посредством уравнений равновесия.

В удобных для моделирования газовых сред переменных универсальная математическая модель состава РОДГ формулируется тремя уравнениями материального баланса (сохранение четвертого элемента является их следствием) и законом Дальтона:

$$\sum_{m=1}^M \left(\frac{P_H}{P} \right)_m = \sum_{m=1}^M \left(\frac{P_H}{P} \right)_m^{\text{init}}, \quad \sum_{m=1}^M \left(\frac{P_N}{P} \right)_m = \sum_{m=1}^M \left(\frac{P_N}{P} \right)_m^{\text{init}},$$

$$\sum_{m=1}^M \left(\frac{P_O}{P} \right)_m = \sum_{m=1}^M \left(\frac{P_O}{P} \right)_m^{\text{init}}, \quad \sum_{m=1}^M P_m = P, \quad (6)$$

где $\left(\frac{P_n}{P} \right)_m$ – доля атомов n -го сорта в m -м веществе; P_m – парциальное давление m -го вещества; P – общее давление; индекс init соответствует условиям реагирования.

Если реакции записывать в формате:

$$\sum_i v_i^+ R_i = \sum_j v_j^- P_j, \quad (7)$$

парциальное давление всех небазисных веществ при заданных парциальных давлениях базисных веществ (их число равно числу химических элементов в системе) рассчитывается на основе констант равновесия отдельных реакций:

$$K_p = \exp \left(-\frac{\Delta G}{RT} \right) = \prod_j \left(\frac{P_{P_j}}{P} \right)^{v_j^-} / \prod_i \left(\frac{P_{R_i}}{P} \right)^{v_i^+}, \quad (8)$$

где $\Delta G = G_p - G_R$ – изменение ТХП в реакции, индексы P и R обозначают продукты и реагенты, T – температура в К, v_i^+ и v_j^- – стехиометрические коэффициенты реагентов и продуктов, R – газовая постоянная. Это позволяет замкнуть систему уравнений (6) с учетом матрицы содержания химического элемента в реагенте.

Подчеркнем, что для независимости уравнений необходимо «собирать» все небазисные вещества исключительно как линейную комбинацию базисных. Т.е. получаемая система реакций, строго говоря, виртуальна.

ТХП каждого вещества G_m состоит из энтальпийного H_m и энтропийного S_m слагаемых, комбинируемых следующим образом:

$$G_m = H_m - T \cdot S_m. \quad (9)$$

Уравнения (6)-(9) решается итерационным методом. Сначала задаются ориентировочные значения парциального давления базисных веществ, на основе которых в соответствии с (8) рассчитываются парциальные давления прочих

компонентов. Затем вектор всех парциальных давлений подставляется в систему (6), размерность которой совпадает с числом базисных веществ или учтенных химических элементов.

В качестве «химического базиса» универсальной модели используем рекомендуемый в [1]: $\text{CO} - \text{H}_2 - \text{N}_2 - \text{O}_2$. Тогда система реакций образования небазисных веществ принимает вид согласно табл. 1.

Таблица 1. Двадцатидвухкомпонентная модель реакций в «химическом базисе» $\text{CO} - \text{H}_2 - \text{N}_2 - \text{O}_2$

№	Вещество	Реакция	№	Вещество	Реакция
1	CO	$\text{CO} \leftrightarrow \text{CO}$	12	OH	$\text{OH} \leftrightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2 + \frac{1}{2} \text{H}_2$
2	O ₂	$\text{O}_2 \leftrightarrow \text{O}_2$	13	HO ₂	$\text{HO}_2 \leftrightarrow \text{O}_2 + \frac{1}{2} \text{H}_2$
3	H ₂	$\text{H}_2 \leftrightarrow \text{H}_2$	14	H ₂ O	$\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2$
4	N ₂	$\text{N}_2 \leftrightarrow \text{N}_2$	15	H ₂ O ₂	$\text{H}_2\text{O}_2 \leftrightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2$
5	CO ₂	$\text{CO}_2 \leftrightarrow \text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2$	16	CH	$\text{CH} \leftrightarrow \text{CO} - \frac{1}{2} \text{O}_2 + \frac{1}{2} \text{H}_2$
6	O	$\text{O} \leftrightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2$	17	CH ₂	$\text{CH}_2 \leftrightarrow \text{CO} - \frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2$
7	H	$\text{H} \leftrightarrow \frac{1}{2} \text{H}_2$	18	CH ₄	$\text{CH}_4 \leftrightarrow \text{CO} - \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2 \text{H}_2$
8	N	$\text{N} \leftrightarrow \frac{1}{2} \text{N}_2$	19	C ₂ H ₂	$\text{C}_2\text{H}_2 \leftrightarrow 2 \text{CO} - \text{O}_2 + \text{H}_2$
9	NO	$\text{NO} \leftrightarrow \frac{1}{2} \text{N}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$	20	C ₂ H ₄	$\text{C}_2\text{H}_4 \leftrightarrow 2 \text{CO} - \text{O}_2 + 2 \text{H}_2$
10	N ₂ O	$\text{N}_2\text{O} \leftrightarrow \text{N}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$	21	C ₂ N ₂	$\text{C}_2\text{N}_2 \leftrightarrow 2 \text{CO} - \text{O}_2 + \text{N}_2$
11	NO ₂	$\text{NO}_2 \leftrightarrow \frac{1}{2} \text{N}_2 + \text{O}_2$	22	HCN	$\text{HCN} \leftrightarrow \text{CO} - \frac{1}{2} \text{O}_2 + \frac{1}{2} \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{N}_2$

В расчетах химического равновесия крайне важна температурная зависимость $G_m(T)$. Она обусловлена физической связью теплоемкости газообразного вещества с температурой $C_{P\,m}(T)$ и величинами $H_m(T)$ и $S_m(T)$:

$$H_m(T) = H_m(298.15) + \int_{298.15}^T C_{P\,m}(T) dT \quad (10)$$

$$S_m(T) = S_m(298.15) + \int_{298.15}^T C_{P\,m}(T) / T dT . \quad (11)$$

Обычно $C_{P\,m}(T)$ аппроксимируют полиномами, однако такой подход физически не корректен. Поэтому здесь предлагается оригинальная аппроксимация $C_{P\,m}(T)$ вида:

$$C_P(A, B, C, C_0, T) = C_0 + A \cdot [1 - e^{-(\frac{T}{B})^C}] , \quad (12)$$

$$H(A, B, C, C_0, T) = H_0 + \int_{298.15}^T C_P(A, B, C, C_0, T) dT , \quad (13)$$

$$S(A, B, C, C_0, T) = S_0 + \int_{298.15}^T \frac{C_P(A, B, C, C_0, T)}{T} dT . \quad (14)$$

В формулах (12)-(14) C_0 , H_0 и S_0 – теплоемкость, энтальпия и энтропия отдельного вещества при стандартной температуре 298,15 К; A , B , C – подгоночные коэффициенты. Отметим, что модель (12)-(14) верна в предельных случаях $T \rightarrow 0$ и $T \rightarrow \infty$. При этом в ней всего три (а не семь как в полиномиальной) эмпирических коэффициента. Для их нахождения достаточна термодинамическая база JANAF [7].

Числовые параметры модели (12)-(14) определены как решение задачи:

$$\begin{cases} \sum_i \left[C_P(A, B, C, C_0, T) - \left\{ C_0 + A \cdot [1 - e^{-(\frac{T}{B})^C}] \right\} \right]^2 \rightarrow \min \\ \sum_i \left[S(A, B, C, C_0, T) - \left\{ S_0 + \int_{298.15}^T \frac{C_P(A, B, C, C_0, T)}{T} dT \right\} \right]^2 \rightarrow \min \end{cases}, \quad (15)$$

Перед проведением сценарных компьютерных экспериментов с различными РОДГ модель (1)-(9) тестировалась на нескольких системах, рассчитываемых онлайн-калькулятором *STANJAN* [8,9]. Результат, показанный на рис. 1, состоит в том, что верно рассчитываются компоненты, доля которых в смеси превышает 10^{-6} .

Таблица 2. Расчетные значения эмпирических коэффициентов модели (12)-(14)

Вещество	Коэффициент			Вещество	Коэффициент		
	A	B	C		A	B	C
CO	0,942	1217	2,21	OH	0,998	1899	2,124
O ₂	1,313	1342	1,47	HO ₂	2,696	1011	1,587
H ₂	1,022	2037	2,643	H ₂ O	2,743	1575	1,971
N ₂	0,938	1320	2,123	H ₂ O ₂	4,326	631,075	1,38
CO ₂	3,401	811,953	1,503	CH	1,46	1546	2,666
O	0	10000	2	CH ₂	3,186	1190	2,174
H	0	10000	2	CH ₄	8,005	1123	1,838
N	0	10000	2	C ₂ H ₂	6,633	983,73	1,108
NO	0,987	1097	1,857	C ₂ H ₄	10,951	956,5	1,526
N ₂ O	3,312	731,007	1,439	C ₂ N ₂	6,387	546,09	0,862
NO ₂	2,846	742,784	1,634	HCN	3,341	1052	1,437

	Initial State		Equilibrium State			Initial State		Equilibrium State					
	mole fraction	mass fraction	mole fraction	mass fraction		mole fraction	mass fraction	mole fraction	mass fraction				
CO	9.7087E-02	1.3549E-01	6.8783E-02	8.6674E-02	CO	7.67025419 · 10 ⁻⁶		N2O	0.0000E+00	0.0000E+00	3.1568E-15	6.2503E-15	N2O = 1.1673626 · 10 ⁻¹⁰
O2	9.7087E-02	1.5479E-01	7.1918E-15	1.0353E-14	O2	5.99864483 · 10 ⁻⁶		HO2	0.0000E+00	0.0000E+00	4.8473E-18	7.1975E-18	HO2 = 6.48720412 · 10 ⁻¹²
H2	3.2039E-01	3.2180E-02	1.7853E-01	1.6191E-02	H2	4.76396511 · 10 ⁻⁶		H2O	0.0000E+00	0.0000E+00	1.7631E-01	1.4289E-01	H2O = 0.1405666
N2	4.8544E-01	6.7754E-01	5.3763E-01	6.7754E-01	N2	0.73446905		H2O2	0.0000E+00	0.0000E+00	7.8818E-16	1.2061E-15	H2O2 = 1.75725727 · 10 ⁻¹¹
CO2	0.0000E+00	0.0000E+00	3.8743E-02	7.6706E-02	CO2	0.12494504		CH	0.0000E+00	0.0000E+00	2.6506E-22	1.5524E-22	CH = 1 · 10 ⁻¹²
O	0.0000E+00	0.0000E+00	1.4837E-14	1.0679E-14	O	3.94617796 · 10 ⁻¹⁰		CH2	0.0000E+00	0.0000E+00	2.3731E-17	1.4975E-17	CH2 = 1 · 10 ⁻¹²
H	0.0000E+00	0.0000E+00	4.6469E-07	2.1071E-08	H	2.32877773 · 10 ⁻⁹		CH4	0.0000E+00	0.0000E+00	1.6022E-07	1.1563E-07	CH4 = 1 · 10 ⁻¹²
N	0.0000E+00	0.0000E+00	1.2154E-16	7.6583E-17	N	1 · 10 ⁻¹²		C2H2	0.0000E+00	0.0000E+00	5.0067E-14	5.8647E-14	C2H2 = 1 · 10 ⁻¹²
OH	0.0000E+00	0.0000E+00	6.1679E-09	4.7191E-09	OH	8.63916178 · 10 ⁻⁷		C2H4	0.0000E+00	0.0000E+00	2.2563E-14	2.8476E-14	C2H4 = 1 · 10 ⁻¹²
NO	0.0000E+00	0.0000E+00	6.6280E-11	8.9469E-11	NO	5.358124 · 10 ⁻⁹		C2N2	0.0000E+00	0.0000E+00	1.4675E-17	3.4352E-17	C2N2 = 1 · 10 ⁻¹²
NO2	0.0000E+00	0.0000E+00	1.2852E-19	2.6598E-19	NO2	1.19576956 · 10 ⁻¹⁰		HCN	0.0000E+00	0.0000E+00	4.7866E-08	5.8195E-08	HCN = 1 · 10 ⁻¹²

Рис. 1. Сверка результатов моделирования с данными JANAF в идентичных условиях

Система веществ «CO – O₂ – H₂ – N₂ – CO₂ – O – H – N – NO – N₂O – NO₂ – OH – HO₂ – H₂O – H₂O₂ – CH – CH₂ – CH₄ – C₂H₂ – C₂H₄ – C₂N₂ – HCN» моделировалась при давлении 1 атм в температурном диапазоне 900 – 1500 К, диапазоне коэффициента избытка воздуха α 0.7 – 1.3 при соотношении массовой подачи пара и топлива β в

диапазоне 0 – 0.3 [10,11]. Результаты расчетов обобщались по формуле результирующей токсичности, учитывающей различную вредность окислов азота и углеводородов по отношению к угарному газу:

$$R_T = [\text{CO}] + 500 \cdot [\text{NO}_x] + 50 \cdot [\text{C}_n\text{H}_m] , \quad (16)$$

в которой множители $500 = \left(\frac{\text{ПДК}_{\text{CO}}}{\text{ПДК}_{\text{NO}_x}}\right)$ и $50 = \left(\frac{\text{ПДК}_{\text{CO}}}{\text{ПДК}_{\text{C}_n\text{H}_m}}\right)$ отвечают токсичности NO_x и C_nH_m по отношению к базовому яду CO. Сведенные по этой формуле результаты моделирования для классической горелки без подачи пара ($\beta = 0$) приведены на рис. 2. Их можно обобщить посредством аппроксимирующей формулы:

$$R_T(\alpha, T) = -\frac{\frac{1.26 \cdot 10^8}{T^{2.44}}}{\cosh(21.5 \cdot \alpha - 21.3)} - 1.08 - \left(\frac{1.34 \cdot 10^7}{T^{2.44}}\right) \cdot \text{th}(21.5 \cdot \alpha - 21.3) . \quad (17)$$

Структура (17) выбрана в соответствии с характером сечений $R_T(\alpha, T)$, отображенных на рис. 2, а значения коэффициентов рассчитаны методами математического программирования.

Достоверность (17) оценивалась по корреляции расчетных данных и исходных (0.99), а также по среднеквадратичной (6 %) и максимальной (24 %) погрешности. Так средняя погрешность (17) составляет 17 %, а максимальная – 70 %.

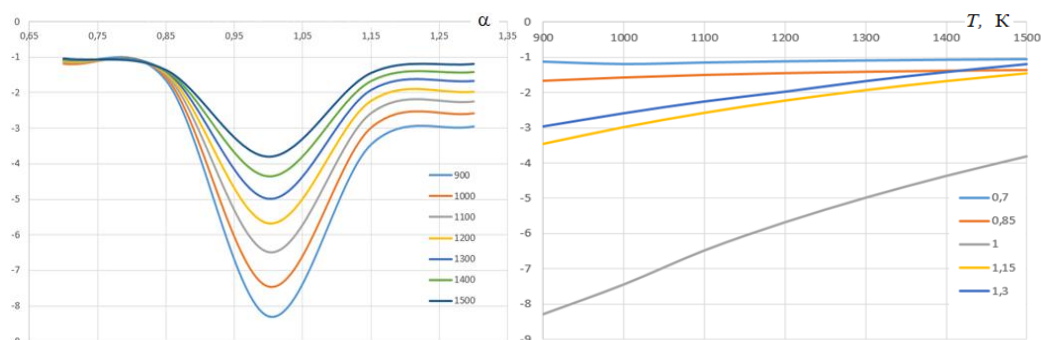


Рис. 2. Зависимость токсичности РОДГ ГУ от коэффициента избытка воздуха α (слева) и температуры T (справа): на оси ординат приведен $\lg R_T$ согласно (16)

Крайне важно, что результаты расчета РОДГ разрабатываемого в ДГТУ горелочного устройства (ГУ) сопоставлялись с данными технических испытаний. Поскольку газоанализаторы (АНКАТ-7664М и ПГА-М-31) определяют состав исключительно охлажденного ниже 60 °C газа, использовалось смешение РОДГ с окружающим воздухом. Соответствующая зависимость и точка забора смеси «РОДГ + воздух» показана на рис. 3. Зафиксировано, что расчетная токсичность РОДГ ГУ совпадает с (косвенно) измеренной в эксперименте до множителя ~ 2 . Расхождение объясняется как использованными допущениями, так и ограниченными возможностями технических измерений.

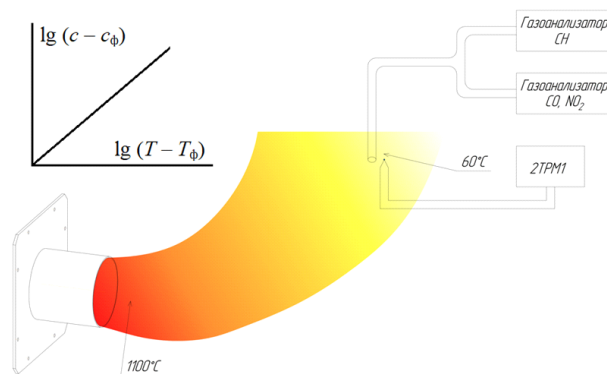


Рис. 3. Схема забора РОДГ ГУ, разбавленных воздухом до температуры 60 °C

6. Расчет состава отработавших газов ДВС

Результатом сжигания моторных топлив ДВС служат как продукты полного сгорания CO_2 и H_2O , так и некоторые промежуточные (CO , C_xH_y , O , OH , H) и побочные (NO) компоненты, образующиеся в т.ч. в результате диссоциации конечных продуктов. К вредным для человека и природы относятся угарный газ, углеводороды и оксиды азота.

Поскольку горение в ДВС быстрый процесс, протекающий при очень высоких температурах, для оценки химического состава ОГ можно использовать надлежаще модифицированную модель химического равновесия.

Особенность такой модели состоит в том, что неоднородный по химическому составу заряд делят на три зоны: в первой соотношение топливо – воздух соответствует расчетному, во второй несколько обогащенной, а в третьей – несколько обедненной смеси.

Степень неоднородности заряда при этом следует рассматривать как эмпирический параметр модели, который отвечает качеству организации рабочего процесса. Соответственно стандартную модель химического равновесия следует применить трижды – для зон с обедненной, нормальной и обогащенной смесью, после чего результаты усреднить.

Важным моментом в таких расчетах является удачный выбор «химического базиса» – учитываемых в модели веществ.

Предварительный анализ термохимических показателей вероятных при горении в ДВС веществ позволяет остановиться в первом приближении на следующем составе продуктов сгорания: CO – O – CO_2 – O_2 – NO – OH – H – H_2O – H_2 – N_2 – C_2H_2 , среди которых вредные для человека и окружающей среды выделены жирным шрифтом. И использованные числовые параметры модели приведены в табл. 3 [12].

Система CO – O – CO_2 – O_2 – NO – OH – H – H_2O – H_2 – N_2 – C_2H_2 моделировалась при температуре и давлении, характерных для горения в ДВС.

При этом коэффициент избытка воздуха выбирался равным 0.7, 1 и 1.3. При выбранных параметрах эта система актуальна для оценки содержания всех нормируемых вредных веществ в ОГ автотранспорта. Отметим, что в этой модели пренебрежем зависимостью термохимических параметров C_p , H и S от температуры.

Для моторного топлива уравнения сжигания (1), (4)-(5) конкретизируются и позволяют однозначно задать материальные ограничения.

Поскольку бензин описывается условной формулой C_7H_{13} , а воздух формулой N_4O , после нормировки они принимают «дробный» вид – $\text{C}_{0.35}\text{H}_{0.65}$ и $\text{N}_{0.8}\text{O}_{0.2}$. Условиям стехиометрического сжигания соответствует величина $k = 1.281$, а доли элементов в

смеси равны: С – 0.153, Н – 0.285, N – 0.449, О – 0.112.

Аналогично по формулам (1), (4)-(5) рассчитывается элементный состав горючей смеси для нестехиометрических условий $\alpha \neq 1$. При $\alpha = 0.7$ (недостаток окислителя или переобогащенная смесь) доли элементов составляют: С – 0.185, Н – 0.343, N – 0.378, О – 0.095, а при $\alpha = 1.3$ (обедненная смесь) – С – 0.131, Н – 0.244, N – 0.5, О – 0.125.

Таблица 3. Термохимические параметры веществ составляющих систему РОДГ ДВС

N пп.	Химическая формула вещества	H, кДж/моль	S, Дж/моль·К	C _p , Дж/моль·К
1	CO	-110.6	197.7	29.1
2	O	249.2	161.0	21.9
3	CO ₂	-393.8	213.8	37.1
4	O ₂	0	205.0	29.4
5	NO	90.3	210.7	29.9
6	ОН	33.5	183.9	29.8
7	H	218.3	114.8	20.8
8	H ₂ O	-242	190.0	33.5
9	H ₂	0	130.6	28.8
10	N ₂	0	191.5	20.1
11	C ₂ H ₂	227.1	201.0	44.0

В табл. 4 приведены результаты расчета состава РОДГ автотранспорта при различном коэффициенте избытка воздуха. Сопоставление результатов моделирования с известными экспериментальными данными касательно токсичности ОГ ДВС свидетельствуют об эффективности выбранного подхода и аккуратной его реализации в рамках классического вычислительного эксперимента «модель – алгоритм – программа» [13].

Таблица 4 Содержание компонентов в РОДГ автомобиля при различном коэффициенте избытка воздуха

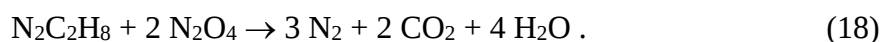
α	С	Н	N	О	CO	C ₂ H ₂	NO
0.7	0.185	0.343	0.378	0.095	0.012	0.23	$9.7 \cdot 10^{-5}$
1	0.153	0.285	0.449	0.112	0.006	0.17	$1.3 \cdot 10^{-5}$
1.3	0.131	0.244	0.5	0.125	0.007	0.12	$2.5 \cdot 10^{-4}$

7. Моделирование химического состава реактивной ракетной струи

Решение этой задачи получим с помощью модели предыдущего параграфа, заменив лишь термодинамические параметры расчета (T и P) и параметры материальных ограничений. Рассмотрим распространенную отечественную ракету «Протон» с парой «топливо – окислитель» = «N₂C₂H₈ – N₂O₄».

Система веществ CO – O – CO₂ – O₂ – NO – OH – H – H₂O – H₂ – N₂ – C₂H₂ моделировалась при температуре и давлении, характерных для горения в ЖРД ($50 \text{ атм} \leq P \leq 175 \text{ атм}$, $2200 \text{ К} \leq T \leq 3000 \text{ К}$). При этом коэффициент избытка кислорода выбирался на уровне $\alpha \approx 0.7$.

Оценка воздействия гептиламильных ракет типа «Протон» требует рассмотреть процесс горения по схеме:



Здесь, кроме вредного для озоносферы ОН, образуется также другой разрушитель Оз – окись азота NO, причем в значительном количестве.

Поэтому расчетную модель модифицируем, чтобы атомы азота в составе выхлопных реактивных газов составляли $\frac{1}{4}$, кислорода и азота – по $\frac{1}{3}$, а углерода – $\frac{1}{12}$ всех атомов. Коэффициент избытка воздуха положим равным единице, поскольку возможно полное догорание в земной стратосфере. Соответствующие результаты сценарного моделирования показаны на рис. 4-5.

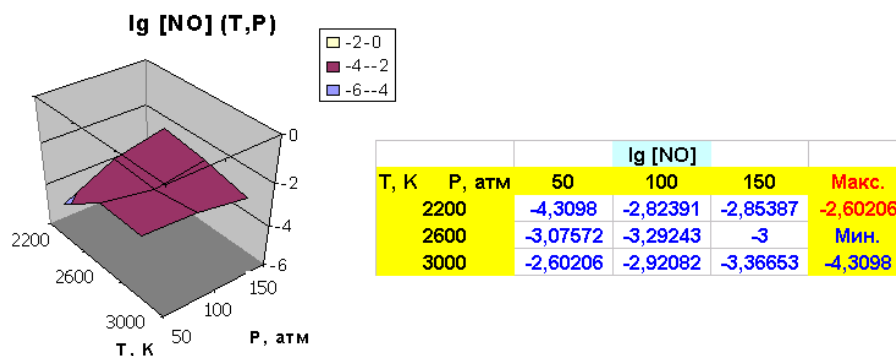


Рис. 4. Графическое представление результатов сценарного моделирования содержания NO в реактивной струе ракеты «Протон»

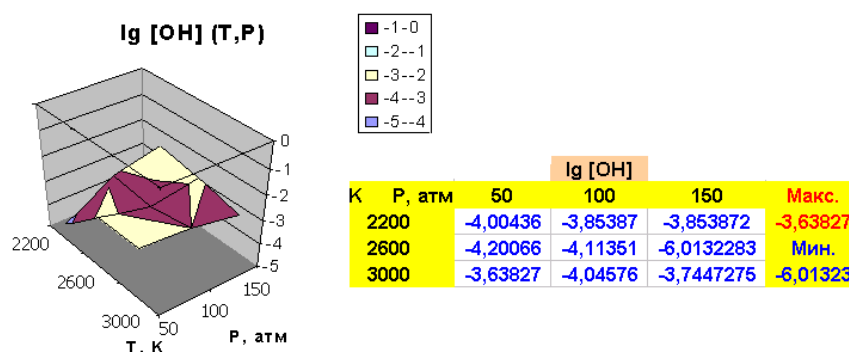


Рис. 5. Графическое представление результатов сценарного моделирования содержания ОН в реактивной струе ракеты «Протон»

Данные этих расчетов удобно обобщить посредством аппроксимирующих формул вида:

$$[\text{NO}] = 10^{-11.82+0.070504 \cdot P+0.00324 \cdot T-0.0000279 \cdot P \cdot T}. \quad (19)$$

Как свидетельствуют результаты этого расчета, содержание NO в реактивной струе на порядок превышает содержание ОН, что усугубляет экологические издержки.

Заключение

Разработана универсальная математическая модель для расчета токсичности РОДГ. При помощи ее программной реализации рассчитан состав РОДГ спроектированного в университете ГУ, а также токсичность отработавших газов ДВС и содержание разрушающих озон радикалов в реактивном следе ракет-носителей. Сопоставление результатов с данными технического эксперимента подтвердили надежность предлагаемых научных и алгоритмических решений.

Список литературы: 1. Щетинков Е.С. Физика горения газов. – М.: Наука, 1965. – 739 с. 2. Mascitti V.R. A simplified equilibrium hydrocarbon-air combustion gas model for use in air-breathing engine cycle computer programs / NASA TN D-4747. – 1968. – 47 p. 3. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение: Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Пер. с англ. – М.: Физматлит, 2003. – 352 с. 4. Ануфриев И.С. Экспериментальное исследование процессов при сжигании жидких углеводородов в горелочных устройствах с подачей перегретого водяного пара / Диссертация доктора техн. наук. – Новосибирск, 2019. – 254 с. 5. Алемасов В.Е., Тишин А.П., Дрегаллин А.Ф. Общий математический метод расчета и исследования горения при высокой температуре // Физика горения и взрыва. – 1971. – Т. 7, № 1. – С. 77-84. 6. Степанов Н.Ф., Ерлыкина М.Е., Филиппов Г.Г. Методы линейной алгебры в физической химии. – М.: Изд-во МГУ, 1976. – 360 с. 7. Stull D., Prophet H. JANAF Thermochemical Tables, second edition. – National Institute of Standards and Technology: 1971. – 1139 p. 8. Gordon S., McBride B.J. Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications: I. Analysis / NASA Reference Publication 1311. – 1994. 9. McBride B.J., Gordon S. Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications: II. Users Manual and Program Description / NASA Reference Publication 1311. – 1996. 10. ГОСТ 27824-2000. Горелки промышленные на жидком топливе. Общие технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 12 с. 11. ГОСТР 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. – М.: Изд-во стандартов, 2021. – 11 с. 12. Азимова Н.Н., Бараниченко В.В., Ладоса Е.Н. и др. Алгоритм выявления химизма и ведущие химические реакции в горелках, использующих углеводородные и спиртовые топлива // Навигатор в мире науки и образования. – 2023. – № 1 (58)'. – Свид-во о рег-ции ОФЭРНиО № 25103 от 28.02.2023 г. 13. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.

УДК 681.5

**РОБОТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА С ГИБКИМИ СВЯЗЯМИ
ДЛЯ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА**

Дромиади К. Д., Савранский К. А., Тринц Д. В., Филимонов М. Н.
(кафедра ЭиЭ, ФГБОУ ВО «ДГТУ», Ростов-на-Дону)

Аннотация. Спроектирована роботизированная система с гибкими связями для, предназначенная для автоматизации перемещения сельскохозяйственной продукции. Применение гибких связей дает возможность использовать мобильную платформу, выполнять задачи по перемещению нескольких грузов одновременно с сохранением их целостности. Предложенное решение также повышает точность позиционирования при малых перемещениях как линейных, так и угловых.

Ключевые слова: робототехника, мехатроника, агроматика, гибкие связи.

1. Введение

Сегодня в России, особенно на Юге страны, активно развивается сельское хозяйство. Растет производство сельскохозяйственной продукции, которую необходимо хранить в определенных условиях. Для этого строятся специальные мультитемпературные склады. Например, первый в Ростове-на-Дону мультитемпературный склад класса А (см. схему на рис. 1) находится в финальной стадии готовности: проводятся технические запуски и тестирование оборудования. Общая площадь комплекса составляет 23 тыс. кв. м. Мультитемпературный склад класса А имеет следующие технические характеристики: высота хранения – более 10 м, нагрузка на пол – не меньше 5 т/м², большая площадь камер (шаг колонн 12 м), пожарная сигнализация, автоматическая вентиляция, площадки для разворота крупнотоннажного транспорта и др. [1].



Рис. 1. 3D–модель мультитемпературного склада в Ростове–на–Дону

В связи с возросшим оборотом грузов необходимо повысить эффективность транспортно–логистических комплексов складских помещений агропромышленного комплекса. Ниже предлагается использовать устанавливаемую на подвижную платформу роботизированную систему с технологией гибких связей (РСГС).

2. Обоснование концепции системы

Во-первых, для выполнения большинства складских операций таких как сортировка и перемещение товаров достаточно грузоподъемности в 700 кг.

Во-вторых, в условиях склада выгодно использовать систему с относительно небольшой автономностью, так как есть возможность организовать зарядные станции на территории склада.

В-третьих, можно установить двигатели малой мощности, которые ограничат скорость передвижения и увеличит контроль над движением при перемещении дорогих или хрупких предметов.

В результате низкая себестоимость РСГС обеспечится экономией затрат на батареи высокой емкости, мощные двигатели и крепкую раму [2–4].

3. Постановка задачи

Первичным этапом проектирования является создание математической модели манипуляционной системы РСГС и решение обратной задачи динамики для изучения целевого соответствия результата исходному техническому заданию. Он предшествует следующим стадиям проектирования:

1. Созданию аппаратной части для управления манипуляционной системой РСГС;
2. Разработке ПО для манипуляционной системой РСГС;
3. Реализации экспериментального образца;
4. Конструированию и отладке автоматизированной системы управления РСГС;
5. Испытаниям экспериментального образца в производственных условиях.

Новизна проекта. Новизна проекта заключается в применении пространственного механизма с четырьмя степенями свободы. Это позволяет создать мобильность конструкции, которая обеспечивает простоту установки, охват больших площадей разной формы и широкую возможность применения.

Также предполагается автоматизация процесса погрузки/разгрузки автотранспорта. Оператору необходимо ввести данные в систему управления, а далее весь процесс полностью автоматизируется, позволяя сократить персонал и операционное время. Предлагаемое улучшение логистики упрощает доставку продуктов в магазины.

4. Преимущество гибких связей

Применение гибких связей дает возможность использовать мобильную платформу, выполнять задачи по перемещению сразу нескольких грузов, позволяет сохранить в целостность груза. Также данное техническое решение позволяет выполнять точные перемещения груза на малое расстояние. Спроектированная транспортная система работает при помощи 4 электродвигателей и 4 канатов, что позволяет осуществлять как линейные перемещения, так и повороты в трех плоскостях.

Управление движением рабочего органа происходит благодаря согласованной работе моторных лебедок, обеспечивающих наматывание или вытравливание тросов. Натяжение тросов, исключаяющее их провисание, осуществляется через шкивы, размещенные на опорных стойках [1]. Кинематическая схема предлагаемой РСГС показана на рис. 2.

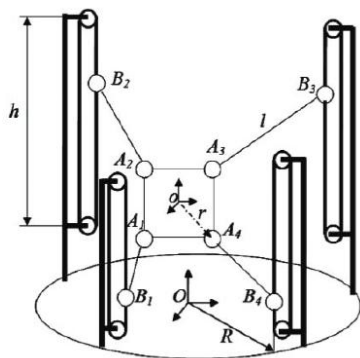


Рис. 2. Модель пространственного механизма с четырьмя степенями свободы

Ходовой прототип. Опытный образец представляет из себя подвижную платформу с четырьмя колесами, вращающимися вокруг вертикальных осей на 360° и приводимыми в движение при помощи четырех электродвигателей. Конструкция адаптирована для манипуляций в узких складских помещениях при разгрузке широкой номенклатуры грузов. Ее внешний вид и функциональные особенности приведены на рис. 3.

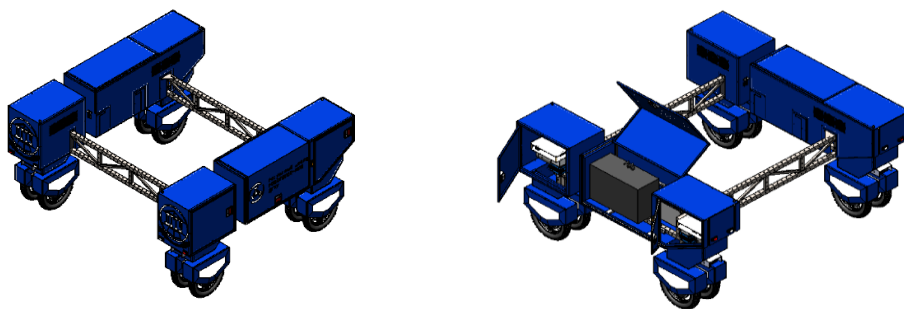


Рис. 3. Модель подвижной платформы для РСГС: слева – общий вид; справа – размещение электропривода и системы электропитания

На платформе рис. 3 крепится надстройка в виде пространственного механизма с четырьмя степенями свободы, имеющая электродвигатели для натягивания стропильных канатов. Также на ней размещено грузовое отделение, грузоподъемностью 700 кг. В собранном виде устройство показано на рис. 4.

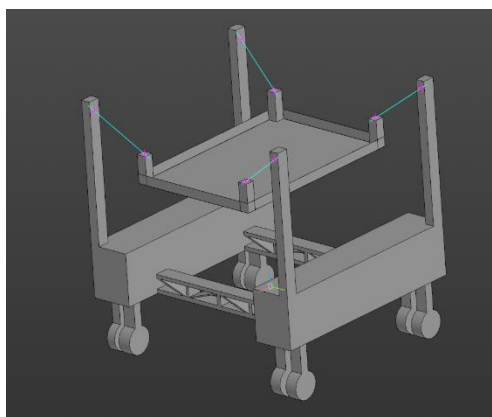


Рис. 4. Модель ходового прототипа РСГС

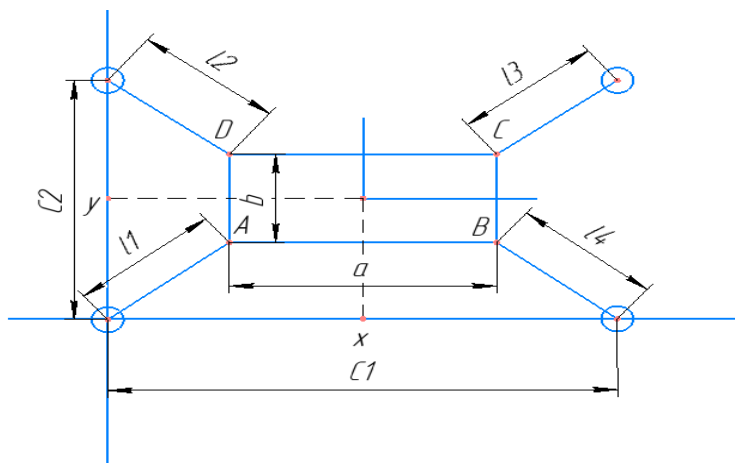
Произведен поиск отечественных и зарубежных аналогов спроектированной РСГС. Конструктивно и функционально идентичных систем не существует, поскольку на рынке представлены грузовые платформы, которые требуют постоянного участия оператора в погрузке/разгрузке и перемещении платформы. Также ни в одном из аналогов не реализована обрабатываемая в данном проекте технология гибких связей.

Соответственно, предлагаемая РСГС адля агропромышленного комплекса обладает следующими преимуществами:

- высокая степень автоматизации;
- расширенная функциональность в части номенклатуры грузов, а также условий и качества складирования.

5. Решение задачи кинематики для опытного образца

Рассмотрим решение задачи кинематики для системы с гибкими связями, схематизированной на рис. 5. Как видно из этого рисунка, $C1$, $C2$ – расстояния между стойками, на которых крепятся электромоторы. a , b – длина и ширина груза, $l1$, $l2$, $l3$, $l4$ – длина канатов, необходимая для фиксации груза.



6. Заключение

Предлагаемая авторами РСГС для логистических задач агропромышленного комплекса позволяет повысить эффективность транспортно-логистических комплексов, что приведет к сокращению сопутствующих затрат и соответствующему снижению стоимости сельскохозяйственной продукции.

Технология гибких связей может применяться не только для логистических задач в агропромышленном комплексе, но и для логистических задач разного уровня, от склада маркетплейса и автомобильного завода до военной промышленности и тяжелых кранов в портах.

Список литературы: 1. «Ростовский деловой портал Город N» – URL: https://gorodn.ru/razdel/novosti_kompaniy/investproekty/zamorozyat-i-sokhranyat-po-ysshe-tu-razryadu/ (дата обращения 27.08.2024). 2. Мир робототехники и мехатроники. Механизмы перспективных робототехнических систем / В. А. Глазунова, С. В. Хейло, Москва 2020. 3. Разработка научных основ создания манипуляционных механизмов параллельной структуры для робототехнических систем предприятий текстильной и легкой промышленности / С. В. Хейло, 2014 – 292 с. 5. Новые механизмы в современной робототехнике. / В. А. Глазунов, 2018. – 316 с.

УДК621.002.5

СТРУКТУРНОЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ МАССОВОГО ПРОИЗВОДСТВА НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИЙ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ**Зуйков И. А., Лахин А. М. (кафедра ТМ, ДонНТУ, г. Донецк)**

Аннотация. исследование направлено на решение проблемы повышения эффективности массового производства в условиях растущих требований к гибкости и снижению издержек. В статье разрабатывается комплексное структурное и технологическое обеспечение изготовления изделий на базе технологий непрерывного действия. Методология исследования включает системный анализ принципов массового и непрерывного производства, а также интеграцию инструментов бережливого производства (Lean Production) для устранения операционных потерь. В результате определены ключевые принципы организации производственного процесса, доказана синергия массового и непрерывного производства, обоснована перспективность гибридных моделей, сочетающих непрерывный и периодический режимы. Разработанные принципы позволяют создать высокоэффективную производственную систему, обеспечивающую массовый выпуск продукции с минимальной себестоимостью и повышенным адаптационным потенциалом

Ключевые слова: массовое производство; технологии непрерывного действия; бережливое производство; структурное обеспечение; технологическое обеспечение; гибридные производственные системы; операционная эффективность

1. Введение

Современные промышленные предприятия в условиях глобальной конкуренции сталкиваются с необходимостью постоянного повышения эффективности, снижения издержек и обеспечения стабильно высокого качества продукции. Одним из ключевых направлений решения этих задач является переход к массовому производству на базе технологий непрерывного действия. Данная статья посвящена разработке комплексного структурного и технологического обеспечения для таких производственных систем. Актуальность темы обусловлена растущими требованиями к производительности и гибкости одновременно, что находит отражение в развитии гибридных решений, сочетающих в себе преимущества как непрерывных, так и периодических процессов [1].

Целью исследования является систематизация принципов построения и инструментов оптимизации структурного и технологического обеспечения для массового производства, основанного на непрерывных технологиях. В работе рассматриваются теоретические основы данных концепций, анализируются методы их интеграции, а также формулируются практические рекомендации по внедрению.

2. Основное содержание и результаты работы

Массовое производство определяется как форма организации производства, специализированного на выпуске в больших объемах в течение длительного периода однородной по назначению, конструкции и технологическим признакам продукции [2]. Его отличительными чертами являются:

Высокая степень специализации рабочих мест, за которыми закреплена узкая номенклатура операций [3].

Непрерывность производственного процесса и автоматизация технологического процесса, что минимизирует простои и ручной труд [2, 3].

Стандартизация и унификация деталей, узлов и агрегатов, что позволяет добиться стабильности качества и снизить затраты [3].

Минимальная себестоимость продукции по сравнению с единичным и серийным типами производства, достигаемая за счет эффекта масштаба и оптимизации использования ресурсов [2].

Экономическая целесообразность массового производства наступает при наличии устойчивого и значительного спроса на продукцию, поскольку данная система характеризуется низкой гибкостью при смене номенклатуры [3].

Непрерывное производство характеризуется организацией процесса без остановок, связанных со сменой партий продукции или очисткой оборудования. В контексте массового выпуска его ключевые преимущества включают:

Воспроизводимое качество продукции: Отсутствие остановок и постоянство параметров процесса обеспечивают стабильные характеристики выпускаемых изделий.

Высокий уровень эффективности: Непрерывная линия производства позволяет достичь чрезвычайно высокой производительности за счет минимизации непроизводительных потерь времени [1].

Снижение операционных издержек: Автоматизация и оптимизация потоков приводят к уменьшению затрат на единицу продукции.

Примером передовой непрерывной технологии является система Glatt MicroPx, используемая для производства сферических частиц (пеллет) в фармацевтической промышленности. Данная технология, основанная на принципах псевдооживленного слоя, позволяет получать продукт с высоким содержанием активного вещества (90-95%) и очень узким гранулометрическим составом, что является критически важным для последующих операций, таких как нанесение функциональных покрытий [1].

Интеграция принципов бережливого производства в непрерывные системы

Концепция бережливого производства (Lean Production), которая представлена на рис. 1, выступает ключевым элементом для разработки технологического обеспечения, так как нацелена на системное устранение потерь во всех процессах [4–6].

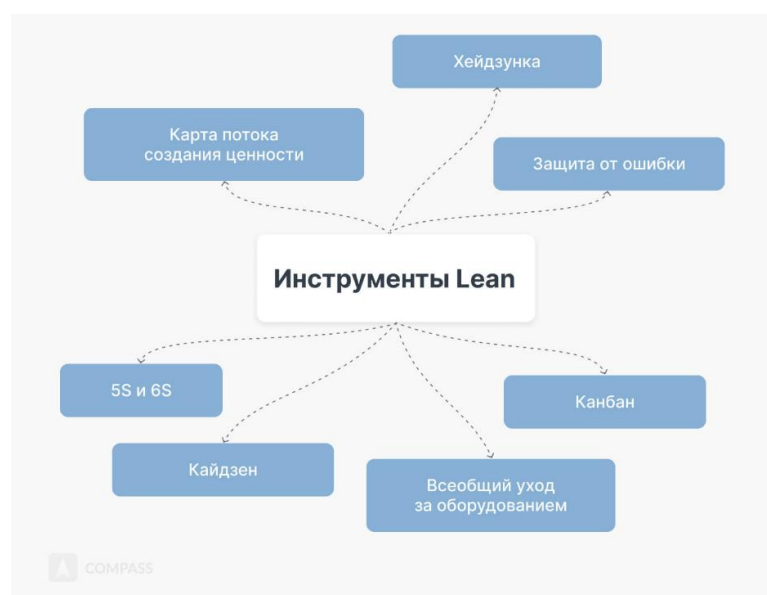


Рис. 1. Визуальная схема принципов Lean Production

Идентификация и устранение потерь (Muda)

В непрерывном массовом производстве особую актуальность приобретают следующие виды потерь, идентифицированные в производственной системе Toyota, которые представлены на рис. 2. [5, 6]:

- Перепроизводство: производство продукции сверх существующего спроса нивелирует преимущества непрерывного потока, создавая избыточные запасы.
- Ожидание: простои оборудования или персонала между операциями нарушают ритм непрерывного процесса.
- Транспортировка: неоптимизированное перемещение материалов увеличивает время цикла и риск повреждения продукции.
- Излишняя обработка: выполнение операций, не добавляющих ценности для конечного потребителя, повышает трудоемкость и затраты.

Для массового производства Вумек и Джонс также выделяют восьмую долю потерь – недостаточное использование человеческого потенциала, что особенно касается нереализованных идей и творческих способностей сотрудников [6].



Рис.2. Схема потерь (Muda)

Инструменты бережливого производства для технологического обеспечения

Для минимизации потерь и обеспечения бесперебойного потока в массовом производстве применяется ряд специализированных инструментов:

Карта потока создания ценности (Value Stream Mapping): Этот инструмент позволяет визуализировать весь материальный и информационный поток – от поступления сырья до отгрузки готового продукта. Анализ карты текущего состояния помогает диагностировать узкие места и потери, а разработка карты будущего состояния – заложить основы для совершенствования технологического процесса [6].

Система быстрой переналадки оборудования (SMED): хотя массовое производство характеризуется неизменной номенклатурой, необходимость переналадки может возникать при плановом обслуживании или редкой смене продукта. SMED направлен на радикальное сокращение времени этих операций, что увеличивает продуктивное время работы оборудования. Схема SMED изображена на рис. 3. [6].



Рис. 3. Инфографика реализации SMED

Система 5С (5S), представленная на рис. 4, обеспечивает организацию и стандартизацию рабочего пространства, что является фундаментом для всех остальных улучшений. Четкая организация потоков, стандартные процедуры и немедленная визуализация отклонений значительно сокращают потери времени и повышают безопасность [6].



Рис. 4. Схема главных принципов системы 5С

Разработка структурного обеспечения производства

Структурное обеспечение охватывает проектирование производственной системы, включая организацию потоков, планировку оборудования и систему управления.

Принципы организации производственного процесса

Для массового производства, основанного на непрерывных технологиях, наиболее эффективными являются следующие принципы:

Предметная специализация: Цехи и производственные участки организуются по принципу изготовления конкретного изделия или группы однородных изделий, что минимизирует маршруты перемещения и упрощает управление [3].

Параллельный вид движения предметов труда: Изделия изготавливаются одновременно и параллельно на различных стадиях, что радикально сокращает длительность производственного цикла [3].

Непрерывность потока: обеспечивается синхронизацией операций и устранением межоперационных заделов и простоев. Идеалом является создание однопоточной системы, в которой продукция передается с одной операции на следующую непосредственно по завершении обработки.

Гибридные решения как современный тренд

В условиях неопределенности рыночного спроса и необходимости освоения новых продуктов перспективным направлением является разработка гибридных систем. Такие системы сочетают в себе возможности как непрерывного, так и периодического (пакетного) режимов работы на одной установке [1].

Ярким примером является опыт компании SternMaid, которая использует многофункциональную установку с псевдооживленным слоем Glatt AGT. Это оборудование позволяет контрактному производителю проявлять максимальную гибкость: в зависимости от требований заказа обрабатывать продукты отдельными партиями или переводить систему в непрерывный режим с постоянной подачей сырья и выгрузкой продукта. Для смены режима используются быстросменные технологические вставки [1]. Данный подход позволяет нивелировать основной недостаток классического массового производства – его ригидность.

3. Заключение

Разработка комплексного структурного и технологического обеспечения для массового производства на базе технологий непрерывного действия представляет собой многоаспектную задачу, требующую системного подхода. Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

Синергия технологий — Эффективная система основывается на синергии между принципами массового производства (специализация, стандартизация, эффект масштаба) и преимуществами непрерывных процессов (стабильное качество, высокая производительность, низкие операционные издержки).

Необходимость интеграции Lean — Технологическое обеспечение не может быть полным без интеграции инструментов и философии бережливого производства, направленных на постоянное выявление и устранение всех видов потерь потока создания ценности.

Перспективность гибридных моделей — Для повышения устойчивости бизнеса в условиях изменчивой рыночной конъюнктуры при проектировании новых производственных систем целесообразно рассматривать гибридные решения,

позволяющие сочетать эффективность непрерывного производства с гибкостью периодического.

Внедрение разработанных принципов позволяет создать высокоэффективную, конкурентоспособную производственную систему, способную не только обеспечивать массовый выпуск стандартизированной продукции с минимальной себестоимостью, но и обладающую определенным адаптационным потенциалом для реагирования на вызовы глобального рынка. Дальнейшие исследования могут быть сфокусированы на оптимизации алгоритмов управления гибридными системами и детализации цифровых моделей таких производств.

Список литературы: 1. Непрерывное, периодическое или все-таки гибридное производство? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sfera.fm/articles/ingredienty/nepreryvnoe-periodicheskoe-ili-vse-taki-gibridnoe-proizvodstvo>. 2. Массовое производство [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://investfuture.ru/articles/massovoe-proizvodstvo>. 3. Характеристики типов производства в сравнении [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://stanovlenie.org/news/articles/poleznaya-statya-kharakteristiki-tipov-proizvodstva-v-sravnenii/?srsId=AfmBOoqOw0uz6UGuO9IsnolrL5yXA31zuJbaGqipkC6-tvyvodJHd4_X. 4. Роль бережливого производства в современном мире [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://science-economy.ru/ru/article/view?id=1021>. 5. Д. П. Вумек, Д. Т. Джонс Бережливое производство. Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании 2008г. – 292с. 6. Применение Бережливого производства для повышения производительности труда мире [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.lean-consult.ru/blog/primenenie-berezhlivogo-proizvodstva-dlya-povysheniya-proizvoditelnosti/>

УДК 621.923.1

РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА
ШЛИФОВАНИЯ ПРИРОДНОГО КАМНЯ

Горобец И. А., Поляков В. Ю. (каф. ТМ, ФГБОУ ВО «ДонНТУ», Донецк)

Аннотация. Рассмотрены особенности процесса шлифования природного камня. Составлена расчетная модель процесса шлифования с учетом упругости элементов и принятых допущений. Предложена математическая модель процесса шлифования с учетом возникающих сил при обработке заготовки.

Ключевые слова: шлифование, модель, динамика, параметры.

Вопросы качества поверхностного слоя при обработке природного камня являются важными и злободневными в современной обрабатывающей индустрии [1]. Поскольку основные затраты времени при обработке камня приходится на многократное шлифование поверхностного слоя с удалением значительного припуска [2, 3], то целесообразно проведение дополнительных исследований особенностей именно этого процесса обработки. Шлифование природного камня является, кроме прочего, динамически не однородным и влияющим на последующие стадии обработки полированием, поэтому, изучение динамики процесса обработки в настоящее время является актуальным.

Для разработки динамической модели процесса шлифования природного камня рассмотрим плоскошлифовальный станок с приспособлением для крепления заготовки природного камня, рис. 1. В упругой системе плоскошлифовального станка выделим: станину 7, стойку 1 со шпинделем 2 и шлифовальной головкой, приспособление 3 для крепления обрабатываемой заготовки, стол 4 с салазками 5, расположенные на консоли 6.

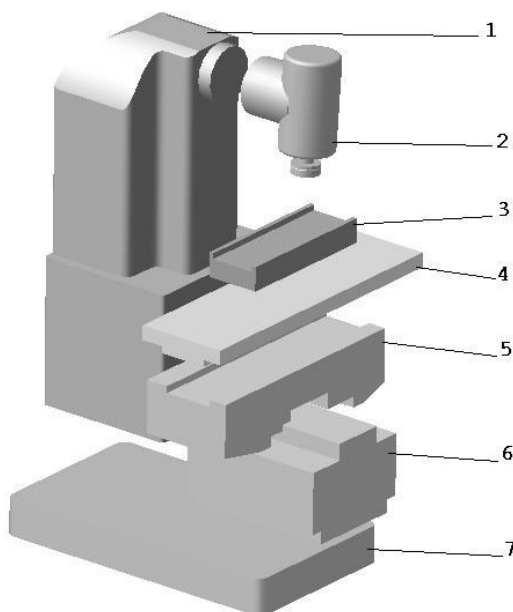


Рис. 1. Элементы расчетной схемы упругой системы плоско-шлифовального станка

Заменив элементы упругой динамической системы на массы, соединенные упругими и диссипативными элементами, получим расчетную схему многомассовой системы, рис. 2.

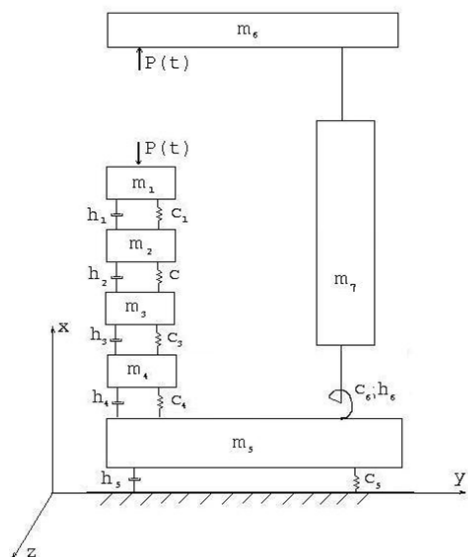


Рис. 2. Расчетная схема плоскошлифовального станка

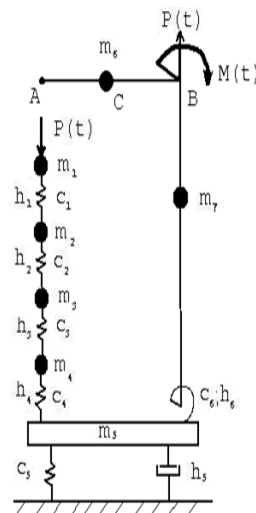


Рис. 3. Расчетная схема плоской колебательной системы

В расчетной схеме обозначено:

m_1, m_2, m_3, m_4, m_5 – массы, соответственно, приспособления и обрабатываемой заготовки, стола, салазок, консоли и станины;

m_6 – масса головки, шпинделя и верхней части станка;

m_7 – масса вертикальной части станка;

c_i – коэффициент жесткости соответствующих стыков в направлении вертикальной оси X;

c_6 – Изгибная жесткость стойки, приведенная к точке 0;

h_i – коэффициенты диссипации энергии в соответствующих стыках системы;

$P(t)$ – усилия в зоне шлифования.

При проведении динамических расчетов были приняты следующие допущения: станина, подвижный стол, салазки, консоль в расчетах принимаются абсолютно жесткими. Тогда расчетная схема примет вид плоской колебательной системы, рис.3.

Для разработки математической модели процесса шлифования природного камня воспользуемся следующими описаниями потенциальной Π , кинетической K энергии и диссипации Φ системы [4]:

$$\Pi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (c_i x_i^2 + c_{0i} \varphi_i^2); \quad (1)$$

$$K = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (m_i \ddot{x}_i^2 + I_i \ddot{\varphi}_i^2) \quad (2)$$

$$\Phi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (h_i \dot{x}_i^2 + h_{0i} \dot{\varphi}_i^2). \quad (3)$$

Подставив выражения (1-3) в уравнения Лагранжа и продифференцировав их, получим систему уравнений (4), которая описывает движение упругой системы станка:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + h_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + c_1(x_1 - x_2) = -P(t); \\ m_2 \ddot{x}_2 + h_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + c_1(x_2 - x_1) + h_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + c_2(x_2 - x_3) = 0; \\ m_3 \ddot{x}_3 + h_2(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + c_2(x_3 - x_2) + h_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_4) + c_3(x_3 - x_4) = 0; \\ m_4 \ddot{x}_4 + h_3(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) + c_3(x_4 - x_3) + h_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_5) + c_4(x_4 - x_5) = 0; \\ (m_5 + m_7) \ddot{x}_5 + h_5 \dot{x}_5 + c_5 x_5 + h_4(\dot{x}_5 - \dot{x}_4) + c_4(x_5 - x_4) + h_6(\dot{\varphi}_5 - \dot{\varphi}) + c_6(\varphi_5 - \varphi) = P(t); \\ I \ddot{\varphi} + h_6(\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_5) + c_6(\varphi - \varphi_5) = M(t), \end{cases} \quad (4)$$

где $M(t) = P(t)l$ - момент силы изгиба P , приложенной в точке B ; φ - поворот верхней части станины под действием изгибающего момента $M(t)$; φ_5 - поворот верхней части станины при перемещении массы m_5 ; I - приведенный момент инерции системы к точке O , учитывающий массу m_6 и приведенную массу нижней части изгибаемой станины. Приведение массы m_7 осуществлялось как для консольной балки:

$$m_{np} = \frac{1}{3} m_7 \quad (5)$$

где m_{np} расположена в точке B .

Однако,

$$\phi = \frac{1}{l} x_6 \quad (6)$$

где $l = AB$, x_6 - перемещение точки A в вертикальном направлении,

Тогда система уравнений (4) примет вид:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + h_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + c_1(x_1 - x_2) = -P(t); \\ m_2 \ddot{x}_2 + h_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + c_1(x_2 - x_1) + h_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + c_2(x_2 - x_3) = 0; \\ m_3 \ddot{x}_3 + h_2(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + c_2(x_3 - x_2) + h_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_4) + c_3(x_3 - x_4) = 0; \\ m_4 \ddot{x}_4 + h_3(\dot{x}_4 - \dot{x}_3) + c_3(x_4 - x_3) + h_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_5) + c_4(x_4 - x_5) = 0; \\ (m_5 + m_7) \ddot{x}_5 + h_5 \dot{x}_5 + c_5 x_5 + h_4(\dot{x}_5 - \dot{x}_4) + c_4(x_5 - x_4) + \frac{1}{l} h_6(\dot{x}_5 - \dot{x}_6) + \frac{1}{l} c_6(x_5 - x_6) = P(t); \\ \frac{1}{l} (I \ddot{x}_6 + h_6(\dot{x}_6 - \dot{x}_5) + c_6(x_6 - x_5)) = M(t). \end{cases} \quad (7)$$

Таким образом, система уравнений (7) является математической моделью динамической системы процесса шлифования природного камня, которая описывает колебания элементов технологического оборудования в принятой системе координат в зависимости от усилий шлифования.

Заключение

Предложенная расчетная схема процесса шлифования природного камня учитывает особенности обработки заготовок. Составленная математическая модель процесса обработки изделий из камня учитывает упругие и диссипативные свойства технологического оборудования и действующие усилия шлифования. Использование разработанной математической модели процесса шлифования природного камня позволит учесть динамический характер процесса обработки и изучить их влияние на макронеровности поверхностного слоя изделия.

Список литературы: 1. Горобец, И.А. Управление макрогеометрией поверхности при шлифовании изделий из природного камня/ И.А.Горобец, Н.В.Голубов // Международный сборник научных трудов Прогрессивные технологии и системы машиностроения - Донецк, ГОУВПО «ДОННТУ», выпуск № 3(74)' 2021, С.3-10 2. Горобец, И.А. Повышение качества шлифования заготовок из камня / И.А.Горобец, А.Н.Михайлов, Н.В.Голубов / Научные технологии в машиностроении – Брянск: ФГБОУ ВО «БГТУ», №5, 2017. С. 31-44 3. Орлов А. Н. Добыча и обработка природного камня. М.: Стройиздат, 1977-352 с. 4. Якимов А.В., Управление динамикой процесса шлифования / А. В. Якимов, А. Н. Паршаков, В. И. Свирщев, В.П. Ларшин - К.: Техника, 1983 – 184 с.

УДК004.8:681.5

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА
ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В
МАШИНОСТРОЕНИИ**

Ковалёв А. Ю., Черепяхин А. Ю., Буленков Е. А. (кафедра ТМ, ФГБОУ ВО
«Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, Российская Федера-
ция)

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема повышения эффективности разработки технологических процессов (ТП) в машиностроении в условиях перехода к концепции «Индустрия 4.0». Проанализированы ограничения традиционных, основанных на опыте технолога, методов проектирования ТП, такие как субъективность, длительные сроки подготовки и неоптимальность решений. В качестве решения предложено применение технологий искусственного интеллекта (ИИ). В работе систематизированы ключевые направления интеграции ИИ, включающие генеративное проектирование технологических маршрутов, интеллектуальную оптимизацию режимов резания, проектирование оснастки, прогнозное обслуживание и создание цифровых двойников. **Ключевые слова:** искусственный интеллект, машиностроение, технологический процесс, проектирование, оптимизация, цифровой двойник, машинное обучение, Индустрия 4.0.

1. Введение

Современное машиностроение функционирует в условиях глобальной конкуренции и растущего спроса на кастомизированную продукцию, что требует внедрения принципов «Индустрии 4.0». Ключевым элементом производственного цикла является этап разработки технологического процесса (ТП), от оптимальности которого напрямую зависят себестоимость, качество и сроки выпуска изделий. Традиционные методы проектирования ТП, опирающиеся преимущественно на опыт технолога, устаревшие нормативы и литературные источники, зачастую приводят к субъективным ошибкам, недостаточной оптимизации режимов обработки и, как следствие, к перерасходу ресурсов и повышенному проценту брака.

2. Основное содержание и результаты работы

В настоящее время проблеме оптимизации ТП посвящено значительное количество работ. Ряд исследователей [1, 2] фокусируются на использовании CAD/CAM/CAE-систем для автоматизации проектирования. Другие [3] исследуют вопросы оптимизации режимов резания с применением математического моделирования. Однако данные подходы часто требуют ручного вмешательства и не обладают способностью к самообучению и адаптации. В последние годы наметился тренд на интеграцию интеллектуальных систем в производство. Работы таких ученых, как [4, 5], демонстрируют возможности нейросетей для прогнозирования износа инструмента и управления качеством. Тем не менее, комплексный анализ применения ИИ именно на этапе разработки ТП, а не только в процессе его выполнения, представлен в научной литературе недостаточно полно.

Целью данной статьи является систематизация и анализ потенциальных направлений применения технологий искусственного интеллекта для совершенствования и автоматизации разработки технологических процессов в машиностроении.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Выявить и охарактеризовать ключевые проблемные места традиционной методологии разработки ТП.

2. Классифицировать и детально описать основные направления применения ИИ на различных этапах проектирования технологического процесса.

3. Проанализировать преимущества и выгоды от внедрения ИИ-решений для машиностроительных предприятий.

4. Обозначить существующие трудности и перспективные векторы для дальнейших исследований в данной области.

В рамках анализа полного жизненного цикла разработки технологического процесса ключевыми этапами, наиболее перспективными для автоматизации с помощью искусственного интеллекта, являются генеративное проектирование технологических маршрутов, интеллектуальная оптимизация режимов резания, проектирование оснастки в связке с прогнозным обслуживанием и создание цифровых двойников.

При генеративном проектировании маршрутов применение методов машинного обучения, в частности обучения с учителем на исторических данных, в сочетании с технологиями экспертных систем позволяет алгоритму на основе анализа 3D-модели детали, ее материала и технических требований автоматически генерировать последовательность технологических операций. Входными данными для этого служат геометрические признаки изделия, такие как наличие отверстий, пазов и резьбы, а на выходе формируется, например, маршрут "токарная черновая -> токарная чистовая -> фрезерная -> сверлильная", что в перспективе позволяет радикально сократить время на подготовку технологического процесса и минимизировать влияние человеческого фактора.

Интеллектуальная оптимизация режимов резания базируется на использовании предиктивных моделей, включая регрессионный анализ и нейронные сети, а также методов многокритериальной оптимизации. Концепция подобной системы предполагает, что на основе данных о материале заготовки, геометрии инструмента и параметрах станка вычисляются оптимальные скорости, подачи и глубина резания, где критериями служат минимизация времени цикла, максимизация стойкости инструмента и снижение энергопотребления, что, согласно имеющимся данным, может повысить эффективность обработки.

В области проектирования оснастки и прогнозного обслуживания алгоритмы топологической оптимизации позволяют создавать конструкции станочных приспособлений с оптимальным соотношением массы и жесткости, при этом система на основе рекуррентных нейронных сетей, анализируя данные с вибродатчиков и датчиков силы резания, демонстрирует высокую точность в прогнозировании остаточного ресурса режущего инструмента, что направлено на предотвращение брака и внеплановых простоев.

Наконец, при создании цифровых двойников технологических процессов комплексное имитационное моделирование, обогащенное AI-модулями, позволяет рассматривать искусственный интеллект как ядро системы, которое обеспечивает не просто имитацию, а активную оптимизацию всего процесса в виртуальной среде, где алгоритмы способны проводить тысячи итераций для поиска глобального оптимума по параметрам загрузки оборудования, последовательности операций и длительности производственного цикла еще до начала физической реализации производства.

Проведенное исследование подтвердило высокую потенциальную эффективность применения технологий искусственного интеллекта для коренной трансформации процесса разработки ТП в машиностроении. Внедрение ИИ позволяет перейти от субъективных, основанных на опыте решений к объективным, data-driven подходам.

Ключевыми результатами являются:

1. Доказана возможность значительного сокращения временных и материальных затрат на подготовку производства.
2. Систематизированы направления воздействия ИИ, от синтеза маршрута до контроля качества в реальном времени.
3. Выявлен синергетический эффект от интеграции ИИ в концепцию цифровых двойников.

Несмотря на очевидный потенциал искусственного интеллекта, его широкому и повсеместному внедрению в практику машиностроительных предприятий сегодня мешает ряд существенных трудностей. Эти барьеры не только замедляют процесс цифровой трансформации, но и четко обозначают приоритетные цели для ученых и инженеров в ближайшем будущем. Одной из ключевых проблем является качество и количество данных. ИИ для эффективной работы нуждается в огромных массивах достоверной и структурированной информации, однако на многих производствах данные либо не собираются системно, либо хранятся в разрозненных форматах, что делает их непригодными для обучения моделей. Другая серьезная сложность заключается в так называемом «эффекте черного ящика», когда даже создатели алгоритма не могут доступно объяснить, как именно он пришел к тому или иному решению.

В отрасли, где на кону безопасность и высочайшее качество продукции, слепое доверие к непрозрачной рекомендации компьютера неприемлемо для технологов. Кроме того, сохраняется высокий порог входа, связанный со значительными финансовыми затратами на внедрение сложных систем и острую нехватку специалистов, которые обладали бы одновременно глубокими знаниями в области машиностроения и Data Science. Эти вызовы требуют консолидированных усилий. Будущие исследования должны быть направлены на разработку методов работы с малыми данными, создание понятных и интерпретируемых моделей ИИ, а также на формирование новых образовательных программ, готовящих универсальных специалистов для промышленности. Успех в этих направлениях позволит перейти от точечных экспериментов к массовому и уверенному использованию интеллектуальных систем в реальном производстве.

3. Заключение

Таким образом, интеграция ИИ в технологическую подготовку производства является необратимой и стратегически важной тенденцией, открывающей новые горизонты для повышения конкурентоспособности машиностроительной отрасли.

Список литературы: 1. Suhel, Suhel. (2025). The Role of Artificial Intelligence in Modern Manufacturing // International Journal Of Scientific Research In Engineering And Management. 09. 1-9. 10.55041/IJSREM50323. 2. Ayozie, Emmanuel & Uzoma, Chukwue-meka & Udokwu, Nnamdi. (2025). Artificial intelligence, robotics and employment in manufacturing firms // International Journal of African Research Sustainability Studies. 10.70382/caijarss.v8i2.027. 3. Jay Lee, Behrad Bagheri, Hung-An Kao. (2014). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems // Manufacturing Letters.- Volume 3.- 2015.- Pages 18-23. -ISSN 2213-8463. 4. Wang, Lei & Liu, Zhengchao & Liu, Ang & Tao, Fei. (2021). Artificial intelligence in product lifecycle management. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 114. 10.1007/s00170-021-06882-1. 5. Wu, Mingming. (2024). The Application of Artificial Intelligence Technology in Mechanical Manufacturing and Automation // Scalable Computing: Practice and Experience. 25. 10.12694/scpe.v25i6.3382.

УДК 004.056

НЕСТАНДАРТНЫЕ ПРОТОКОЛЫ СВЯЗИ И «ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ»

*Макаров К. В.¹, Петрова Ю. Н.¹, Бобров Н. В.².*¹ - Негосударственное образовательное частное учреждение высшего образования*«Московский университет «Синергия», г. Москва*² - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный лингвистический университет», г. Москва

Аннотация. В работе рассмотрен подход к обеспечению безопасности сетей «Интернета вещей» (IoT), основанный на использовании нестандартных (и потому заведомо неизвестных злоумышленникам) протоколов связи. Проанализированы связанные с этим практические трудности. Предложено компромиссное решение, позволяющее их преодолеть и при этом не подвергнуть систему серьёзному риску несанкционированного вмешательства.

Ключевые слова: Интернет вещей, нестандартные протоколы связи, информационная безопасность

1. Введение

Ни для кого не секрет, что при разработке систем в концепции «Интернет вещей» (IoT) обычно используются стандартные средства передачи информации без серьёзной защиты. Объясняется это просто: бытовая техника и осветительные приборы не несут конфиденциальной информации, сами по себе, как правило, не представляют очень большой ценности и не являются объектами повышенной опасности, в отличие от, например, технологического оборудования опасных производств. Последнее, впрочем, не совсем верно: микроволновая печь или электрочайник, взломанные удалённо и намеренно выведенные на неэксплуатационные режимы работы, могут стать причиной пожара, что делает их источниками повышенной опасности в случае несанкционированного доступа как из шалости, так и при совершении диверсий. Поэтому сети IoT нуждаются в особых, ориентированных именно на них способах защиты.

В нашей предыдущей статье «К проблеме обеспечения безопасности бытовых информационно-управляющих систем» [3] мы уже рассматривали суть данной проблемы и анализировали разные подходы к её решению. В этот раз остановимся на способе, связанном с использованием нестандартных протоколов внутри сетей «Интернета вещей».

2. Основное содержание работы

Известно, как минимум, 70 различных протоколов, применяемых в IoT [1], из которых в других источниках наиболее часто упоминаются MQTT и CoAP (рис. 1) [4, 9, 10]. Столь большое разнообразие объясняется относительной новизной данного направления: как это часто случается в подобных ситуациях, каждая группа разработчиков, создающих своё решение, проанализировав имеющиеся варианты протоколов связи, или соглашается принять один из них, или же создаёт свой, сочтя существующие неудобными по тем или иным причинам (например, потому, что устройства IoT часто обладают лишь очень ограниченными ресурсами памяти и вычислительной мощности, и существующие решения кажутся «тяжёлыми», или потому что хотят ввести в протокол свой необходимый функционал). Об обеспечении безопасности связи при этом обычно либо не говорится ничего, либо делается отсылка к

стандартным решениям, реализация которых на практике часто оказывается неосуществимой в силу всё той же ограниченности ресурсов на устройствах. В частности, в связи с этим упоминаются такие решения, как использование PSK (Pre-Shared Key) или (D)TLS ((Datagram) Transport Layer Security) [4].

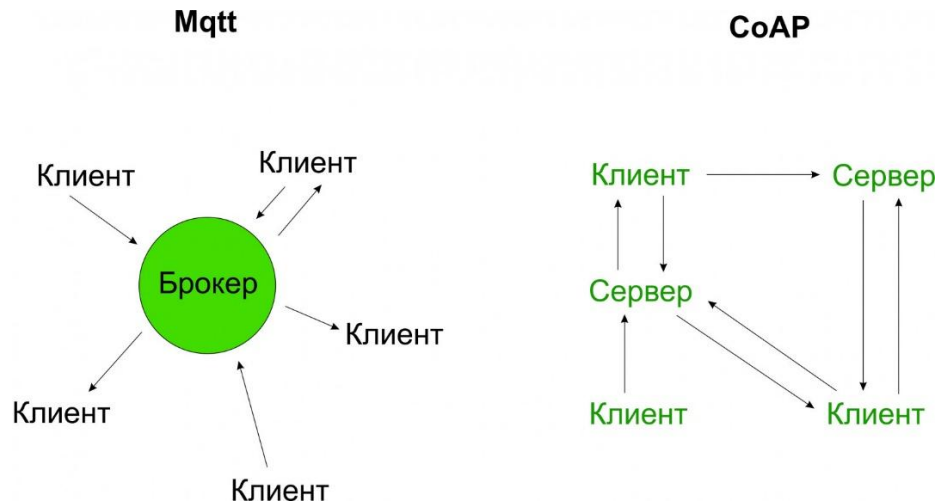


Рис. 1. Схема организации сетей IoT с использованием протоколов MQTT и CoAP

Таким образом, защита сетей IoT оказывается в неутешительном положении в силу трёх проблем: первая — уже упомянутая — что ей изначально не было отведено достойного места, вторая — технические ограничения устройств, третья — тот факт, что возможные злоумышленники в вычислительных ресурсах, как правило, практически ничем не ограничены. Если первая проблема начала более или менее решаться, так как у многих появилось понимание важности защиты данных в IoT, то в отношении второй и третьей некоторые идеи будут представлены ниже.

Наибольший эффект защиты данных достигается тогда, когда скрывается сам факт их передачи. Этот подход находится в центре внимания особой дисциплины — стеганографии [2]. Чуть меньшую, но тоже очень хорошую степень защиты даёт ситуация, когда факт передачи данных известен, но они зашифрованы с использованием нетривиального ключа и нетривиального же алгоритма, который неизвестен злоумышленникам [5, 6]. Последнее особенно важно, так как знание алгоритма делает подбор ключа вопросом времени и вычислительных ресурсов, которые у злоумышленников, как уже говорилось выше, как правило, имеются в достатке. Из всего только что сказанного следует, что самую большую степень защиты информации может дать комбинация обоих перечисленных вариантов: должен быть скрыт сам факт передачи данных, при этом сами передаваемые данные должны быть зашифрованы нестандартным алгоритмом с использованием надёжного ключа. Вопрос — как это применить в IoT?

Можно выделить две больших проблемы, которые этому препятствуют. Вторая по важности — та, которая уже была упомянута: недостаточные вычислительные ресурсы устройств. Главной же проблемой является то, что сети IoT создаются, как правило, из уже выпущенных промышленно устройств, в которых «защиты» определённые наборы стандартных протоколов. Ниже предлагается решение, которое поможет обойти обе сформулированные проблемы.

Существуют устройства — универсальные контроллеры, например, на базе STM32, AVR Atmega128, ESP, которые при минимальной стоимости обладают

достаточно большими вычислительными ресурсами, чтобы поддерживать серьёзные протоколы шифрования, в том числе основанные на алгоритмах «Магма», «Кузнечик» [7], включающие при этом ещё и алгоритмы компрессии данных. Эти же устройства поддерживают и стандартные протоколы связи как по WiFi, так и по Bluetooth. Таким образом, сами эти устройства между собой вполне могут образовать сеть на основе любого как стандартного, так нестандартного протокола. В то же время, такое устройство может поддерживать связь с любым промышленно выпускаемым устройством по тем протоколам, которые поддерживает оно. Таким образом, усовершенствованную сеть IoT, можно представить следующим образом (рис. 2):

- на внешнем уровне сеть IoT состоит из узлов — контроллеров, связывающихся с сервером (CoAP) или брокерами (MQTT) по нестандартному защищённому протоколу (сами серверы или брокеры — такие же контроллеры или компьютеры);
- на внутреннем уровне каждое конечное устройство создаёт локальную микросеть с использованием стандартного слабезащищённого протокола, при этом устанавливается минимальная мощность сигнала, так что эта сеть физически не будет обнаруживаться (а следовательно, и взламываться) извне.

При радиусе охвата сигнала внешнего уровня 30-50 м (WLAN) радиус действия передающих антенн контроллеров может составлять 3-5 м и менее в открытой радиовидимости, что и будет обеспечивать необходимый физический уровень защиты. Для определения степени надёжности такой защиты от несанкционированного доступа, например, из соседнего помещения необходимо проведение экспериментальных исследований.

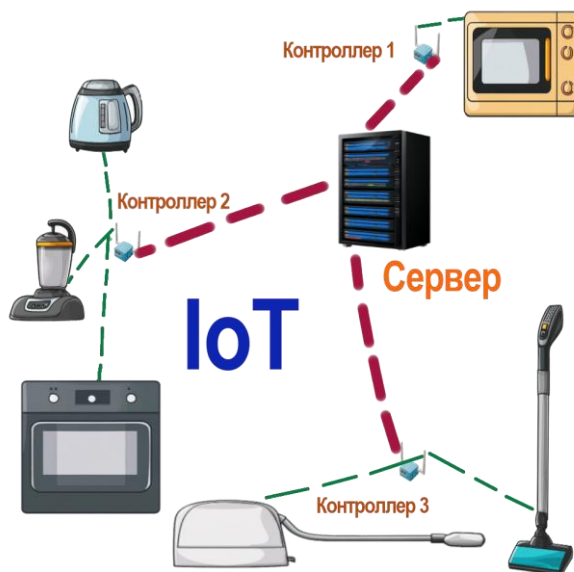


Рис. 2. Концептуальная схема усовершенствованной сети IoT (CoAP+)

Красными пунктирными линиями показана передача данных по нестандартному протоколу между сервером и контроллерами, зелёными — между контроллером и устройствами по стандартным протоколам.

Представленное решение имеет некоторые аналогии с получившей большой успех в последние годы военной технологией УМПК (универсальных модулей планирования и коррекции), давшей «вторую жизнь» фугасным авиабомбам и другим неуправляемым боеприпасам. Оказалось ненужным во всех случаях обязательно производить принципиально новые боеприпасы: достаточно к уже давно произведённым

присоединить УМПК, чтобы они получили многие из тех преимуществ, которыми пользуются современные управляемые крылатые ракеты. Так и здесь: не нужно организовывать выпуск целых линеек светильников, утюгов, пылесосов и т. п., поддерживающих новый, нестандартный и супер-защищённый протокол. Достаточно любое из уже имеющихся на рынке и зарекомендовавших себя устройств включить в локальную микросеть к своему контроллеру (исполняющему роль микросервера), и оно включится в защищённую усовершенствованную сеть IoT CoAP+ (или MQTT+). Следуя вышеупомянутой аналогии, такие контроллеры можно называть «Универсальными модулями подключения к...».

Необходимо сделать некоторое дополнение в связи с упоминавшимся ранее принципом стеганографии. В данном случае он может принести пользу следующим образом. Представим себе, что в качестве нестандартного протокола связи между сервером и контроллерами используется на самом деле вполне обычный протокол связи с беспроводными принтерами (не всякий раз, когда нужно ради обеспечения безопасности применить нестандартное решение, нужно в действительности изобретать нечто новое). Тогда информация, которую необходимо передать, к примеру, кофеварке может быть упакована в фотографическое изображение или в изображение скан-копии какого-либо документа и отправлена нужному контроллеру «на печать», тот извлекает её и отправляет кофеварке в том виде, в котором она готова её принять. Конкретные стеганографические решения (метод LSB, спектральных коэффициентов плавных переходов изображения и т. п.) можно выбирать из любых соображений — в том числе и менять их время от времени. Как, впрочем, и подвергать данные предварительному шифрованию с использованием криптографических алгоритмов, что даст дополнительное усиление защиты. Со стороны — для прослушивающего трафик беспроводных сетей злоумышленника — картина будет выглядеть так, будто это не дом, а офис или фотоателье, где постоянно что-то печатают. Злоумышленник может даже попытаться взломать соединение с «принтером» и отправить туда на печать что-либо запрещённое; но и из этого у него по понятной причине ничего не выйдет.

3. Заключение

В настоящей статье была предложена новая концепция защиты сетей IoT. Она нуждается в конкретизации и опытной проверке, в частности, должны быть поставлены эксперименты по аудиту безопасности сети IoT, построенной по описанному принципу. Аудит должен включать проверку обнаружимости устройств в локальных микросетях извне на разных расстояниях, за преградами разных типов (стены из различных материалов, стекла, корпус автомобиля и др.). В качестве отдельной перспективной темы для исследования может рассматриваться случай сети имплантируемых устройств — от нейроинтерфейсов до управляемых протезов и устройств, регулирующих отдельные функции организма при различных хронических заболеваниях. В этом случае вопрос безопасности сети по большей части перейдёт уже из плоскости защиты от взлома и несанкционированного управляющего воздействия в плоскость обеспечения устойчивости, в том числе в условиях работы средств РЭБ. Данный аспект будет рассмотрен в дальнейших публикациях.

Список литературы: 1. Протоколов IoT с краткими описаниями. URL: <https://sofiot.ru/blog/protokoly/70-protokolov-iot-s-kratkimi-opisaniyami/> Дата доступа: 30.07.2025. 2. Грибунин, В. Г. Стеганографические системы. Критерии и методическое обеспечение / В. Г. Грибунин, В. Е. Костюков, А. П. Мартынов, Д. Б. Николаев, В. Н. Фомченко : Учебн.-метод. пособие / Под ред. д-ра техн. наук В. Г.

Грибунина. - Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016. 3. Макаров, К. В. К проблеме обеспечения безопасности бытовых информационно-управляющих систем / К.В. Макаров, Ю.Н. Петрова, Н.В. Бобров // Инновационные направления интеграции науки, образования и производства. Сборник материалов IV научно-практической конференции. Керчь: КГМТУ, 2025. - С. 213-218. 4. Один из альтернативных протоколов для интернета вещей — CoAP (2022). URL: <https://habr.com/ru/companies/first/articles/685184/> Дата доступа: 30.07.2025. 5. Пахомов, С. Беспроводные сети: ломаем, чтобы защищать /С. Пахомов, М. Афанасьев // Компьютер пресс — 2008. — №6. URL: ссылка, дата доступа 29.03.2025 6. Хоуи, Дж. Защита беспроводной сети /Дж. Хоуи // Windows IT Pro/Re. — 2002. — №2. URL: ссылка, дата доступа 29.03.2025 7. Шнайер Б. 14.1 Алгоритм ГОСТ 28147-89 // Прикладная криптография. Протоколы, алгоритмы, исходные тексты на языке Си (Applied Cryptography. Protocols, Algorithms and Source Code in C). — М.: Триумф, 2002. 8. IoT Security: Advances in Authentication. Wiley, 2020. 9. Physical Design of IoT. URL: <https://www.c-sharpcorner.com/article/physical-design-of-iot-part-2/> Дата доступа: 30.07.2025. 10. Practical CoAP Security" (IoT For All, 2022). URL: <https://www.iotforall.com/coap-security> Дата доступа: 21.02.2022.

УДК 621.91.04

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПУТЕЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

Михайлов Н.В., Лахин А.М. (ФБГОУ ВО ДонНТУ, каф. ТМ, г.
Донецк)

***Аннотация.** В статье проведен анализ современного состояния вопроса. В процессе эксплуатации зубчатые колеса подвергаются различным видам износа. Определены основные пути совершенствования технологии обработки авиационных зубчатых колес.*

***Ключевые слова:** вакуумные ионно-плазменные покрытия, зубчатые колеса, принцип концентрации, покрытия, дефект поверхностного слоя, функционально-ориентированная технология.*

1. Введение

Зубчатые передачи в газотурбинных двигателях (ГТД) современного поколения эксплуатируются в условиях воздействия предельных механических, термических и динамических нагрузок. Проектирование и изготовление этих компонентов справедливо считаются одними из наиболее наукоемких задач в области двигателестроения. В этой связи достижение высочайших показателей качества, надежности и долговечности зубчатых колес становится критически важным условием для создания конкурентоспособных силовых установок.

Опыт восстановления авиационных редукторов показывает, что в ходе эксплуатации зубчатых зацеплений неизбежно возникают дефекты, ограничивающие их потенциальный ресурс. Продолжительность эффективной службы передач в решающей степени зависит от характера рабочих нагрузок, а также от совокупности конструкторских и производственных решений.

Являясь ключевыми элементами силовых передач в машиностроении, зубчатые колеса должны соответствовать строгим нормативам точности и безотказности, которые определяются их функциональным назначением. Наибольшую сложность в производстве представляет формирование зубчатого венца, поскольку этот процесс требует многоступенчатой механической и термохимической обработки для достижения заданных эксплуатационных характеристик.

Следовательно, разработка как конструкторской, так и технологической документации должна базироваться на моделировании реальных условий работы этих ответственных узлов.

2. Основное содержание работы

Целью данной работы является исследовать основные методы совершенствования технологии обработки зубчатых колес для обеспечения повышения их эксплуатационных свойств.

Основные пути совершенствования технологии обработки авиационных зубчатых колёс включают развитие методов обработки, модификацию зубьев и использование компьютерного моделирования при проектировании и анализе условий работы.

Повышение качества зубчатых колёс вертолётных трансмиссий возможно с помощью функционально-ориентированного подхода, который позволяет адаптировать

изделие при изготовлении к особенностям его эксплуатации в машине или технологической системе.

Некоторые методы, которые используются для обеспечения функционально-ориентированных свойств рабочих поверхностей зубьев[2]:

– Термическая обработка. Применяется термическое упрочнение поверхностного слоя зубчатого профиля на переменную глубину. Это позволяет увеличить износостойкость участков с наибольшим взаимным скольжением в местах головки и у ножки зуба.

– Обкатка. Рабочие поверхностные слои зубчатого профиля подвергаются наклепу разной степени за счёт воздействия обкатного инструмента с различной силой обката. Усилие обката имеет максимальное значение в местах головки и ножки зуба, что обеспечивает им наибольшую прочность и износостойкость.

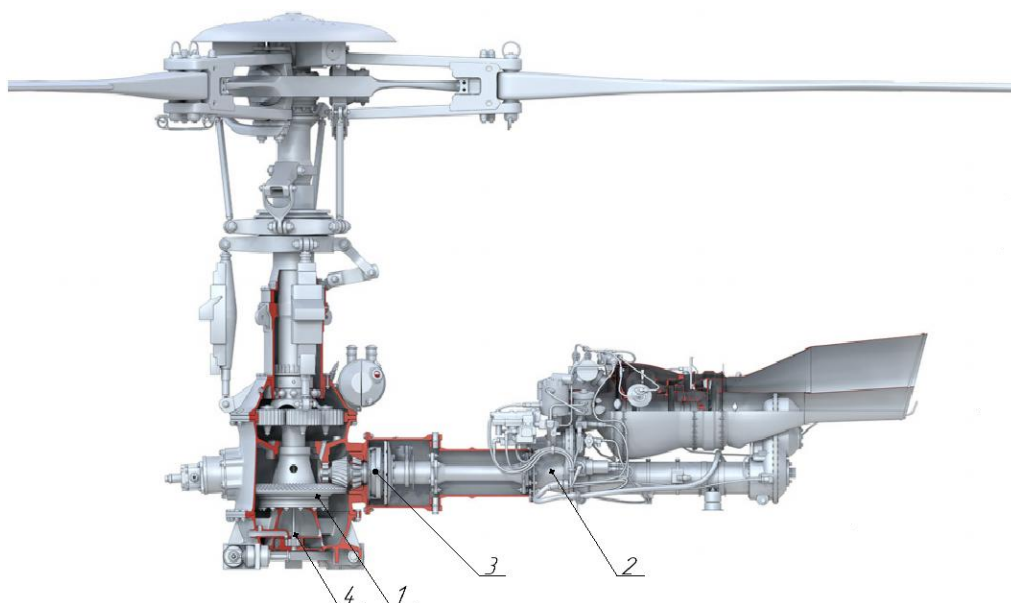


Рис. 1. Общий вид трансмиссии: 1 – главный редуктор; 2 – редукторы двигателей; 3 – муфты включения сцепления и свободного хода; 4 – опоры валов с амортизаторами.

Нанесение покрытий. Свойства наносимых покрытий определяются скоростью взаимного скольжения в местах контакта пар зубьев. В местах с наибольшим взаимным скольжением, свойства наносимых покрытий должны обеспечить высокую стойкость к абразивному изнашиванию и иметь низкий коэффициент трения.

В первом случае используется термическое упрочнение поверхностного слоя зубчатого профиля на переменную глубину. Этот вариант позволяет увеличить износостойкость участков с наибольшим взаимным скольжением в местах головки и у ножки зуба. В полюсе зацепления упрочненный слой имеет наименьшую глубину – достаточную для компенсации контактных напряжений. Для возможности термообработки зубчатых колес, изготовленных из низкоуглеродистых сталей, необходимо насыщение поверхностного слоя углеродом, что достигается цементацией. При этом, в местах зубчатого профиля с наибольшими скольжениями профилей, требуется более интенсивное насыщение поверхностного слоя углеродом, что позволит увеличить стойкость к абразивному изнашиванию.

Во втором случае, рабочие поверхностные слои зубчатого профиля подвергаются наклепу разной степени за счет воздействия обкатного инструмента с различной силой обката. Регулировка усилия обката позволяет создавать различную степень наклепа где

пиковые значения приходятся на зоны максимального скольжения (головка и ножка зуба), что обеспечивает им максимальную прочность. Кинематика и силовое воздействие инструмента задаются посредством копира.

В третьем случае используется нанесение покрытий, в том числе многослойных, на зубчатые поверхности. Свойства наносимых на зубья покрытий должны определяться скоростью взаимного скольжения в зоне контакта. Это требует дифференцированного подхода:

1. В зонах с максимальным скольжением (головка и ножка зуба) необходимы покрытия с высокой стойкостью к абразивному износу и низким коэффициентом трения.

2. В полюсе зацепления, где преобладают контактные напряжения, основным требованием является высокая контактная выносливость (износостойкость).

Наиболее эффективным методом является вакуумное ионно-плазменное напыление. Эта технология обеспечивает требуемые свойства покрытий при относительно низкой себестоимости, не нарушая размерной точности зубьев и параметров зацепления. Для селективного нанесения покрытий на целевые зоны предлагается использовать предохранительные маски, которые защищают поверхности, не подлежащие обработке [3].

В работе [4] рассмотрены основные положения производства зубчатых колес на базе функционально-ориентированных технологий. Представлена классификация зубчатых колес и их элементов по функциональному назначению. Представлены схемы технологического воздействия для рабочих поверхностных слоев зубчатых колес, а также способы реализации данных схем на основе нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий. Рассмотрен способ управления свойствами рабочих поверхностных слоев зубчатых колес на основе нанесения вакуумных ионно-плазменных покрытий, с обеспечением требуемой ориентации и кинематики движений в процессе нанесения покрытий. Данные наработки позволят в дальнейшем улучшить методику нанесения функционально-ориентированных покрытий на рабочие поверхности зубьев по зонам.

Процесс осаждения функциональных покрытий предъявляет два ключевых требования: обеспечение направленного доступа потока напыляемого материала к целевым поверхностям и защиту смежных зон, не предназначенных для обработки.

При нанесении вакуумных ионно-плазменных покрытий на зубчатые колёса для достижения однородности и заданной толщины слоя необходима такая ориентация детали, при которой рабочие поверхности зубьев обращены к источнику потока. Равномерность осаждения по всему зубчатому венцу обеспечивается вращением заготовки.

Технология подразумевает ко-осаждение материала с четырёх катодов, поэтому кинематика движения заготовки должна быть организована таким образом, чтобы обеспечить взаимодействие её поверхности с потоком от каждого источника.

Возможные схемы движения заготовок при этом будет иметь следующий вид (рис. 2). Угол наклона оси заготовки ϕ , определяется в зависимости от положения заготовки относительно боковых катодов и варьируется в процессе нанесения покрытий.

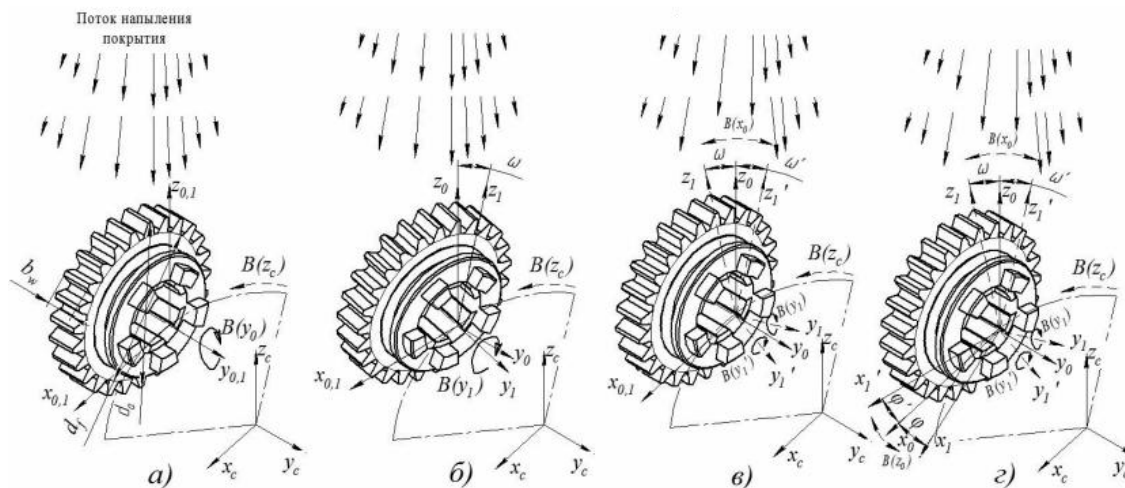


Рис. 2. Варианты движений зубчатого колеса при нанесении покрытия на рабочие элементы: а – вращение вокруг горизонтальной оси; б – вращение вокруг наклонной оси; в – вращение вокруг качающейся оси, г – вращение вокруг двух качающихся осей.

На основе выполненных исследований, можно представить следующие этапы синтеза технологического обеспечения производства зубчатых колёс на базе функционально-ориентированного подхода: [3].

1. Анализ эксплуатационных условий и производственных методов. На данном этапе изучаются условия работы зубчатых передач, причины снижения их эксплуатационных характеристик, а также существующие методы изготовления и повышения качества зубчатых колёс.

2. Функциональная классификация и параметризация. Проводится классификация зубчатых колёс по функциональному признаку, на основании которой определяются необходимые параметры их элементов в соответствии с целевым назначением.

3. Разработка системы технологических воздействий. Для каждой функциональной зоны зубчатых колёс определяется вид, тип, характер и структура технологического воздействия на основе принципов ориентации технологических воздействий и требуемых свойств.

4. Проектирование технологического процесса. Формируется маршрут изготовления зубчатых колёс и разрабатываются операции функционально-ориентированного технологического процесса с использованием как известных, так и новых технологических методов.

5. Внедрение процесса и оценка эксплуатационных характеристик. Осуществляется реализация функционально-ориентированного технологического процесса. Основные эксплуатационные показатели изготовленных зубчатых колёс определяются путём моделирования их работы в условиях, приближенных к реальной эксплуатации в машинах.

6. Сравнительный анализ эффективности. Проводится сравнение технико-экономических показателей зубчатых колёс, изготовленных по функционально-ориентированному подходу, с колёсами, произведёнными по традиционным технологиям.

7. Разработка внедренческих рекомендаций. Формируются практические рекомендации по внедрению технологических процессов производства зубчатых колёс на базе функционально-ориентированного подхода.

8. Внедрение результатов исследования. Реализация полученных результатов включает применение разработанного подхода на машиностроительных предприятиях и использование рекомендаций по проектированию зубчатых колёс в соответствии с их эксплуатационными требованиями.

3. Заключение

Таким образом, в работе выполнено исследование основных методов совершенствования технологии обработки, а также разработаны этапы синтеза технологического обеспечения производства зубчатых колес на базе функционально-ориентированного подхода.

Список литературы: 1. Дудник В. В. Конструкция вертолетов. – Ростов н/Д: Издательский дом ИУИ АП, 2005. – 158 с. 2. К.В. Кобелева, В. Р. Туктамышев Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия ОБЗОР МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АВИАЦИОННЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ [Электронный ресурс] // – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-metodov-povysheniya-dolgovechnosti-aviatsionnyh-zubchatyh-peredach>. 3. Лахин А. М., Михайлов А. Н., Фомин И. А. (ДонНТУ, Донецк, Украина) ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС НА БАЗЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА [Электронный ресурс] // – Режим доступа: http://ea.donntu.ru:8080/bitstream/123456789/8035/1/108-115_%D0%9B%D0%B0%D1%85%D0%B8%D0%BD.pdf. 4. А. Н. Михайлов, А.М Лахин, В. А. Соосар СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС НА БАЗЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА [Электронный ресурс] // – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sintez-tehnologicheskogo-obespecheniya-proizvodstva-zubchatyh-koles-na-baze-funktsionalno-orientirovannogo-podhoda>.

УДК 621.77.04

ВНЕДРЕНИЕ НЕТРАДИЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАССИВНОЙ И АКТИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОМОБИЛЯ

Мищенко А. А., Анастасьев А. В., Михайлов А. Н. (кафедра АТР, АДИ ДонНТУ, г. Горловка, кафедра ТМ, ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, РФ)

***Аннотация.** Рассмотрены инновационные технологические подходы к созданию композитных материалов, ориентированных на обеспечение пассивной и активной безопасности транспортных систем. Приведён анализ нетрадиционных методов формообразования и модификации композитов, включая аддитивные, гибридные, наноструктурированные и интеллектуальные технологии. Отдельное внимание уделено внедрению встроенных сенсорных элементов, управляемых структур и процессов функционализации матриц. Показано, что современные технологические решения в области композитов формируют основу для создания адаптивных, конструкций нового поколения.*

***Ключевые слова:** композиты, аддитивные технологии, наномодификация сенсорные структуры, безопасность.*

1. Введение

Современная тенденция в автомобилестроении, как отрасли машиностроения, это переход от традиционных металлов к композиционным материалам с регулируемыми свойствами. Однако сама по себе замена материала не обеспечивает должного технологического и функционального эффекта. Ключевым фактором становится внедрение нетрадиционных технологий обработки, сборки и модификации композитов, которые формируют новое поколение материалов с интегрированными функциями прочности, энергоёмкости, адаптивности и диагностики.

2. Основное содержание и результаты работы

Целью данной работы является исследование и анализ возможности применения аддитивных технологий в автомобильной промышленности, их влияние на процесс проектирования, производства и эксплуатации автомобилей. Также будет рассмотрен потенциал этих технологий для повышения эффективности, сокращения затрат и улучшения качества продукции.

Аддитивные технологии представляют собой процесс создания трехмерных объектов путем последовательного наложения слоев материала. Эти технологии включают в себя различные методы, такие как FDM (Fused Deposition Modeling), SLS (Selective Laser Sintering), SLA (Stereolithography) и другие. В последние годы аддитивные технологии находят все более широкое применение в различных отраслях машиностроения, включая автомобильную промышленность. Одним из основных преимуществ аддитивных технологий является сокращение времени, необходимого для разработки и производства деталей. Благодаря возможности быстрого прототипирования инженеры могут быстро создавать и тестировать новые конструкции, что позволяет значительно ускорить процесс вывода новых моделей на рынок.

Аддитивные технологии позволяют значительно сократить затраты на производство, особенно при малосерийном производстве и индивидуальных заказах. Отсутствие необходимости в сложных инструментах и формах делает процесс более

экономичным. С помощью аддитивных технологий можно создавать сложные геометрические формы, которые невозможно или крайне сложно произвести традиционными методами. Это открывает новые горизонты для дизайнеров и инженеров, позволяя им реализовывать самые смелые идеи.



Рис. 1. Кузов автомобиля с использованием композитных материалов

В условиях быстро меняющегося рынка автомобильной промышленности способность быстро адаптироваться к изменениям в спросе является критически важной. Применение таких технологий позволяет производителям оперативно реагировать на изменения, производя только те детали, которые необходимы. Наиболее распространенное применение аддитивных технологий — это создание прототипов автомобилей и их компонентов. Использование 3D-печати позволяет быстро и экономично создавать прототипы для тестирования форм и функций.

Многие автопроизводители начали использовать аддитивные технологии для производства запасных частей, особенно для устаревших моделей автомобилей, где традиционные методы производства могут быть нецелесообразны.

С развитием технологий и изменением потребительских требований автомобильная промышленность начинает активно внедрять аддитивные технологии, или 3D-печать, в процесс производства запасных частей. Это особенно актуально для устаревших моделей автомобилей, где традиционные методы производства могут оказаться нецелесообразными. Аддитивные технологии представляют собой инновационный подход к созданию деталей, позволяющий формировать объекты путем последовательного наложения слоев материала. В отличие от традиционных методов, требующих создания дорогостоящих оснасток и форм, аддитивное производство позволяет сократить затраты и время на изготовление деталей [1].

В условиях растущего спроса на запчасти для устаревших моделей автомобилей, многие автопроизводители начали использовать 3D-печать как эффективное решение проблемы нехватки компонентов. Традиционные методы производства часто становятся экономически невыгодными из-за высоких затрат на инструменты и необходимость хранения больших запасов деталей. Аддитивные технологии позволяют производить необходимые запчасти по мере необходимости, что минимизирует затраты на хранение и обеспечивает более гибкое управление производственными процессами [2, 3].

Одним из значительных преимуществ аддитивных технологий является возможность быстрого прототипирования. Автопроизводители могут оперативно разрабатывать и тестировать новые детали, что позволяет им адаптироваться к требованиям рынка и быстро реагировать на изменения. Этот подход особенно важен для компаний, которые стремятся поддерживать конкурентоспособность в условиях динамичного рынка. Кроме того, аддитивные технологии открывают возможности для персонализации и индивидуализации деталей, что позволяет производителям предлагать уникальные решения, соответствующие специфическим требованиям клиентов [4, 5].



Рис. 2. печать прототипа из пластика

Некоторые автопроизводители, такие как BMW и Ford, уже активно используют аддитивные технологии для производства запасных частей. Они начали внедрять 3D-печать как способ создания компонентов, которые больше не производятся традиционными методами. Это позволяет владельцам устаревших автомобилей поддерживать свои транспортные средства в рабочем состоянии без необходимости поиска редких оригинальных деталей. Также стоит отметить, что стартапы и небольшие компании начали предлагать услуги по 3D-печати запасных частей, что дополнительно способствует доступности необходимых компонентов для владельцев устаревших автомобилей.

Тем не менее, использование аддитивных технологий в производстве запасных частей сталкивается с рядом вызовов. Качество материалов, доступных для аддитивного производства, должно соответствовать высоким стандартам прочности и долговечности. Необходима разработка стандартов и норм для обеспечения качества напечатанных деталей, а также преодоление ограничений по масштабам производства. Несмотря на эти вызовы, аддитивные технологии продолжают развиваться и открывают новые горизонты для автомобильной промышленности.

С помощью аддитивных технологий возможно создание индивидуальных деталей и аксессуаров для автомобилей, что отвечает растущему спросу на персонализацию транспортных средств [6, 7].

Использование аддитивных технологий позволяет создавать легкие конструкции, что способствует снижению массы автомобиля и, как следствие, улучшению топливной эффективности.

Несмотря на множество преимуществ, аддитивные технологии сталкиваются с рядом ограничений:

- не все материалы подходят для аддитивного производства, а некоторые из них могут быть дорогостоящими;
- для массового производства аддитивные технологии пока не могут конкурировать с традиционными методами по скорости;
- необходимы дополнительные исследования и стандартизация для обеспечения высокого качества печатаемых деталей.

Аддитивное формообразование позволяет создавать сложные пространственные структуры без традиционной оснастки. Гибридные технологии совмещают металлы и композиты, образуя адаптивные конструкции с высоким отношением прочности к массе. Используются металлокомпозиты (FRP/Al, CFRP/Ti) и сэндвич-структуры с пенными и сотовыми наполнителями.

Современные композиты интегрируются со встроенными сенсорными элементами — оптоволоконными, пьезоэлектрическими и нанопроводящими датчиками. Это обеспечивает самоконтроль состояния конструкции. Электропроводящие наноуглеродные композиты выполняют функции измерения, подогрева и статического экранирования [8].

Использование CAD/CAE/CAM систем и цифровых двойников позволяет моделировать поведение композита, прогнозировать зоны разрушения и контролировать качество. Роботизированные комплексы с адаптивным управлением обеспечивают стабильность параметров и воспроизводимость свойств материала.

Нетрадиционные технологии композитов позволяют повысить энергоёмкость на 70%, сократить массу на 40% и увеличить долговечность за счёт самовосстановления. Безопасность конструкции становится результатом технологической интеграции и интеллектуализации производственного процесса. Аддитивные технологии представляют собой значительный шаг вперед для автомобильной промышленности, открывая новые возможности для проектирования, производства и индивидуализации автомобилей. Несмотря на существующие ограничения и вызовы, их потенциал для повышения эффективности и снижения затрат не может быть недооценен. В будущем ожидается дальнейшее развитие этих технологий, что приведет к еще более широкому их применению в автомобильной отрасли и улучшению качества продукции.

3. Заключение

Таким образом, аддитивные технологии не только меняют подход к производству автомобилей, но и формируют будущее всей отрасли, подчеркивая важность инноваций в стремлении к устойчивому развитию и повышению конкурентоспособности производителей автомобилей на глобальном рынке.

Список литературы: 1. Кушнир, И. С. Обзор системы производства деталей аддитивного производства из переработанных пластмассовых отходов / И. С. Кушнир, Т. А. Левина, А. П. Адылина // СМИС-2024. Технологии управления качеством:

Материалы Международной научно-технической конференции, Москва, 22–24 мая 2024 года. – Москва: Московский Политех, 2024. – С. 105-114. 2. Иванов В. П. Нетрадиционные технологии композитных материалов. — М.: Машиностроение, 2023. 3. Петров А. Н., Кузнецов Д. В. Аддитивные процессы в создании функционально-градиентных структур // Вестник технологий материалов. — 2024. — № 2. — С. 15–28. 4. Федоренко В. Ф., Голубев И. Г. «Аддитивные технологии при производстве и техническом сервисе сельскохозяйственной техники: учебное пособие для вузов» (2-е изд.) — Москва: Издательство «Юрайт», 2025. 5. Тарасова Т. В. «Аддитивное производство: учебное пособие для вузов» — Москва: ИНФРА-М, 2019. 6. Подкопаев С. А., Демишкевич Э. Б. «Аддитивные технологии и прототипирование: учебно-методическое пособие» — Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. 7. Гейко М. А., Леушин И. О., Нищенков А. В. и др. «Основы аддитивных технологий и производств: учебное пособие для бакалавриата и магистратуры» — Москва: Вологда, 2024. 8. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. «Аддитивные технологии: монография» — Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2025.

УДК 621.791

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЁТА СВАРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ИЗ СТАЛИ P91 ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В LS-DYNA**Филиппов М. Н.** (кафедра ПМСиТМ, БНТУ, г. Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. В статье представлена методика численного моделирования процесса сварки трубопроводов из жаропрочной стали P91 с использованием программного комплекса ANSYS/LS-DYNA с целью определения остаточных напряжений и деформаций. Рассматриваются особенности формирования температурных полей, остаточных напряжений и деформаций при кольцевой сварке, а также влияние фазовых превращений, досварочной и послесварочной термической обработки на напряжённно-деформированное состояние конструкции.

Ключевые слова: сварка, остаточные напряжения, деформации, P91, LS-DYNA, численное моделирование, термомеханический анализ.

1. Введение

Современные энергетические и трубопроводные установки работают в условиях высоких температур и давлений, что требует применения жаропрочных сталей, таких как P91 (X10CrMoVNb9-1). Сварка таких материалов сопровождается сложными термомеханическими процессами, приводящими к образованию остаточных напряжений и деформаций, влияющих на долговечность и работоспособность конструкции. Для оценки этих эффектов целесообразно использовать методы численного моделирования, позволяющие прогнозировать распределение температур и напряжений в процессе сварки и последующей термической обработки.

Сталь P91 (9Cr-1Mo-V) – это высокохромистая мартенситная жаропрочная сталь, широко используемая в энергетике для производства труб, коллекторов и других элементов, работающих при высоких температурах и давлениях.

Для расчёта сварного трубопровода из стали P91 выбран программный комплекс ANSYS/LS-DYNA, поскольку он имеет развитые возможности для моделирования нестационарных тепловых процессов и фазовых превращений.

Цель работы — разработка методики численного моделирования сварки трубопроводов из стали P91 с определением температурных полей, остаточных напряжений и деформаций, а также оценкой влияния фазовых превращений, досварочной и послесварочной термической обработки.

Расчёты проводились для ручной аргонодуговой сварки с неплавящимся электродом при $\eta_{\text{и}} = 0,65$; $I = 100\text{ A}$; $U = 13\text{ В}$, $v_{\text{св}} = 2\text{ мм/с}$ и погонной энергией сварки $q = 4,225\text{ кДж/мм}$. Справочные данные по теплофизическим и механическим свойствам стали P91, которые использовали при расчёте, взяты из [1]. Моделирование сварки трубопровода проводили в четыре прохода с V-образной разделкой кромок при максимальных температурах источника тепла корневого шва 2000°C , а источника тепла облицовочных швов – 2500°C .

Методика моделирования (поэтапно):

1. Создание геометрической модели и сетки

В пакете LS-DYNA была построена геометрическая модель трубопровода (рис. 1) с конечно-элементной сеткой и шагом в 0,5 мм. Размеры трубы: 48,5х5,08 мм. Сетка мелкая в зоне шва, крупнее - по основному металлу. Количество элементов сетки – 1029063.

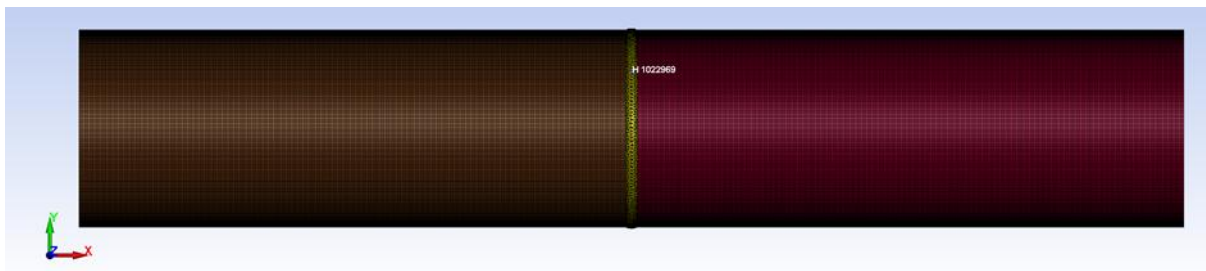


Рис. 1. Геометрическая модель сварного трубопровода с элементом для исследования.

2. Введение исходных данных в программе в LS-PrePost

2.1 Материалы

Существуют различные модели материала *MAT. Основной металл *MAT_ELASTIC_PLASTIC_THERMAL (тепловые свойства - *THERMAL_ISOTROPIC) – с помощью этого материала можно задавать температурно зависимые коэффициенты материала. Для сварного шва *MAT_CWM (тепловые свойства - *THERMAL_CWM) - это термо-упруго-пластическая модель с кинематическим упрочнением, которая позволяет как создавать материал, так и проводить отжиг, вызванный температурой. Модель предназначена для использования при моделировании многоступенчатых сварочных процессов. Эта модель доступна для твердотельных и оболочечных элементов [2].

2.2 Граница

Ключевое слово *BOUNDARY предоставляет способ определения навязанных движений на граничных узлах. Ключ *BOUNDARY_SPC_SET предназначен для закрепления концов трубы. Имитация сварного прохода по ключу *BOUNDARY_THERMAL_WELD_TRAJECTORY с указанием скорости, мощности, траектории. Определяет перемещаемый источник тепла для моделирования сварки твердых или оболочечных конструкций. Движение источника описывается узловым путем и заданной скоростью вдоль этого пути. Это ключевое слово применимо в комбинированных термомеханических и исключительно термических моделированиях [3].

2.3 Контроль

Тепловой и механический шаг решаются совместно. Передача температур в механическую часть (ключ *CONTROL_THERMAL_SOLVER) *CONTROL_ACCURACY – параметры управления, которые могут повысить точность расчёта; *CONTROL_IMPLICIT – имплицитный режим; *CONTROL_SOLUTION – для указания процедуры решения анализа, если проводится только тепловой анализ или комбинированный тепловой анализ; *CONTROL_THERMAL_SOLVER – установите параметры для теплового решения в анализе только тепла или совместном структурно-тепловом анализе; *CONTROL_THERMAL_TIMESTEP – управление временным шагом для теплового решения в тепловом или совместном структурно-тепловом анализе; *CONTROL_TERMINATION – окончание работы).

Следующий шаг – добавление ключа на фазовые превращения в материале *MAT_GENERALIZED_PHASE_CHANGE, досварочной и послесварочной термической обработки с помощью *DEFINE_CURVE; также не мало важно добавлять ключ *INITIAL_TEMPERATURE_SET – определение начальных температур узловых точек, используя идентификаторы наборов узлов или номера узлов. Эти начальные температуры используются в анализе только теплового состояния или в совместном

тепловом/структурном анализе и *LOAD_BODY – назначение оси для ускорения свободного падения.

3. Постпроцессинг. Результаты моделирования и анализа сварного трубопровода

Для анализа результатов использовался модуль LS-PrePost, позволяющий построить распределения температуры, напряжений и деформаций по времени. Постпроцессинг результатов позволяет визуализировать поля температур, напряжений, деформаций и фазовых превращений, а также провести количественную оценку остаточных напряжений и перемещений после сварки. Происходит вывод температурных полей (d3plot), напряжений (von Mises), деформаций.

Распределение температуры в момент максимального тепловложения показало локализацию тепла в зоне сварочного шва. Максимальная температура в исследуемом элементе достигала $\sim 1870^\circ\text{C}$ в оси источника и снижалась до $300\text{--}400^\circ\text{C}$ в ЗТВ, что обеспечивает полное плавление присадочного материала (рис. 2). Графики изменения температуры в характерных точках позволили определить скорость охлаждения и интервалы фазовых превращений, которые оказывают решающее влияние на образование мартенсита в стали P91.

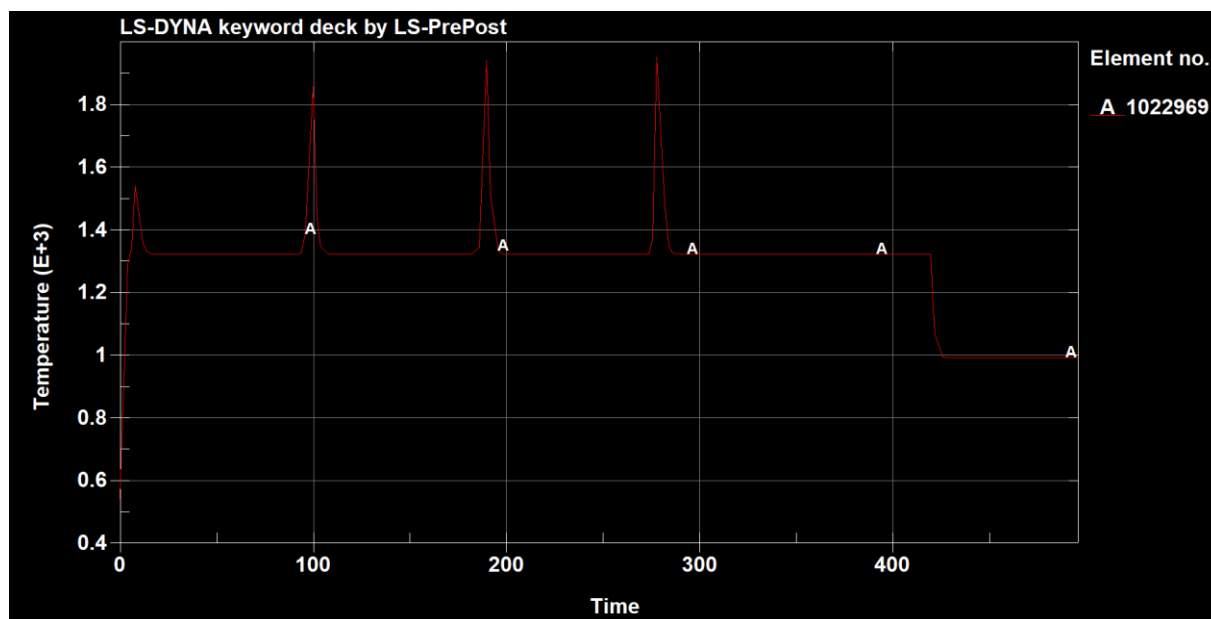


Рис. 2. Распределение температуры в элементе со временем

После завершения процесса охлаждения в зоне шва и ЗТВ сформировались значительные растягивающие остаточные напряжения, достигающие $500\text{--}600\text{ МПа}$, компенсированные сжимающими в основном металле. Максимальные значения наблюдаются на границе шва и зоны термического влияния (рис. 3).

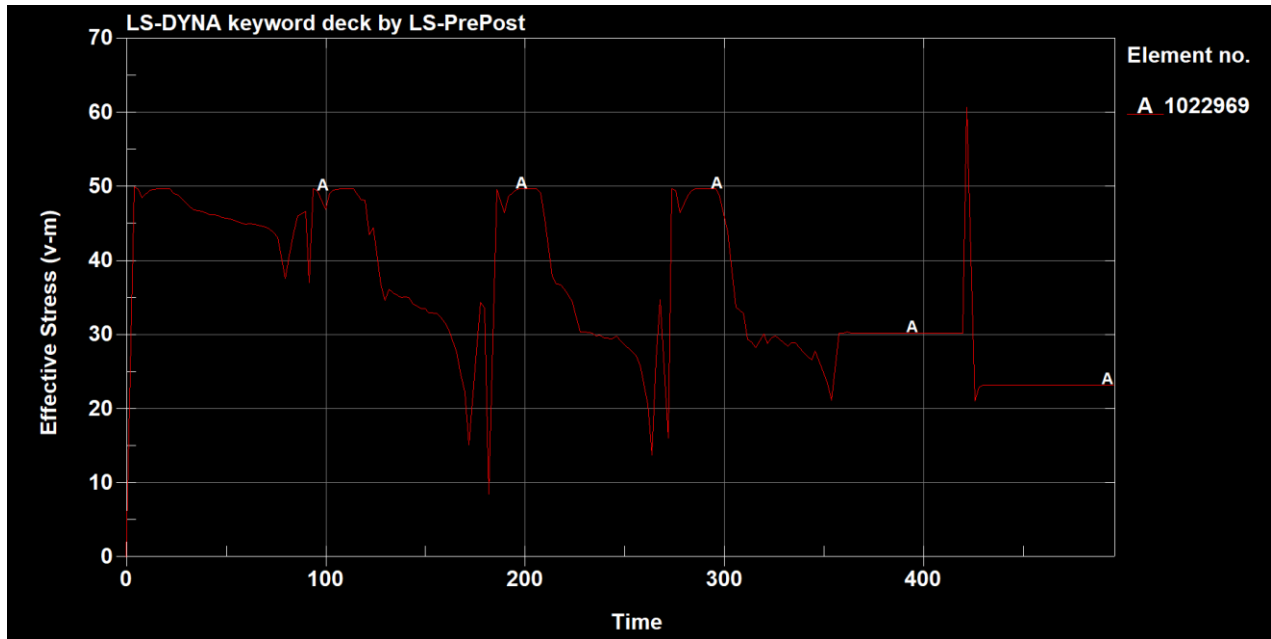


Рис. 3. Распределение напряжения в элементе со временем

В результате сварки наблюдается овальность сечения трубы, а также продольный изгиб с максимальной величиной до 1,4 мм. Эти деформации могут привести к несоосности при сборке и должны учитываться при проектировании.

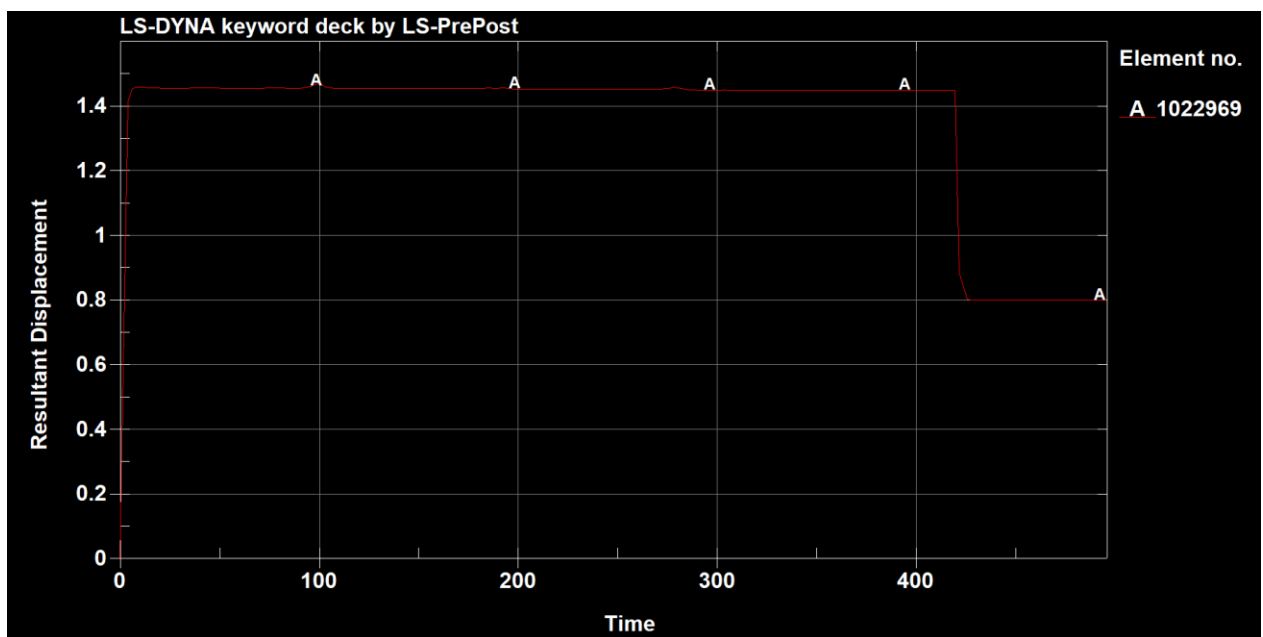


Рис. 4. Распределение результирующих деформаций в элементе со временем

4. Заключение

1. Разработана методика численного моделирования сварки трубопроводов в LS-DYNA;
2. Учтены тепловые и механические процессы, фазовые превращения, досварочная и послесварочная термическая обработка;
3. Получены распределения температур, остаточных напряжений и деформаций;

4. Установлено, что в результате сварки формируются значительные растягивающие остаточные напряжения, требующие обязательного проведения термической обработки;

5. После проведения моделирования отпуска (720 °С) уровень остаточных напряжений снизился на 40–60%, что подтверждает эффективность термической обработки;

6. Результаты расчёта могут быть использованы при проектировании сварных соединений трубопроводов и выборе технологических режимов сварки.

7. Разработанная методика позволяет прогнозировать распределение напряжений в сварных соединениях и оптимизировать режимы термической обработки для повышения надёжности трубопроводных систем

Список литературы: 1. Yang, K.; Zhang, Y.; Zhao, J. Elastoplastic fracture analysis of the P91 steel welded joint under repair welding thermal shock based on XFEM. *Metals* 2020, 10, 1285. 2. LS-DYNA Keyword User's Manual, Volume II — Material Models, LSTC, 2024. 3. LS-DYNA Keyword User's Manual, Volume I, LSTC, 2024. 4. Klöppel, T. et al. An LS-DYNA Material Model for the Consistent Simulation of Welding, Forming and Heat Treatment, 2023. 5. DYNAmore GmbH. Recent Developments for Welding Simulation in LS-DYNA, 2024.

УДК621.793.2

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ ЗА СЧЕТ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОТСШунякова О. Ф., Василенко А. Н., Петряева И. А. (кафедра «Технология
машиностроения», ДонНТУ, г. Донецк)

Аннотация. В представленной статье разработаны критерии интенсификации режимов резания и повышения эффективности токарной обработки за счет использования СОТС. Установлена возможность повышения производительности и снижения себестоимости токарной обработки с использованием СОТС.

Ключевые слова: производительность, себестоимость, оптимизация, СОТС.

Использование современных инструментов сопровождается повышением производительности за счет интенсификации режимов резания, что приводит к существенному увеличению сил и температур резания и требует мероприятий по их снижению.

Достаточно высокую эффективность в направлении интенсификации процессов резания показало использование современных смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС). Хорошо изучены возможности СОТС по снижению интенсивности изнашивания режущего инструмента за счет уменьшения сил и температур резания при лезвийной обработке деталей машин в т.ч. при точении. Особенно актуально использование СОТС при обработке труднообрабатываемых материалов, обладающих высокой прочностью и низкой теплопроводностью [1, 2].

Большое разнообразие современных СОТС и способов их подачи в зону резания ставит актуальную задачу разработки методов количественной оценки эффективности их применения не только по критериям повышения стойкости, снижения сил, температур резания, шероховатости обработанной поверхности, но и критериям интенсификации режимов резания, повышения производительности и снижения себестоимости обработки.

Целью представленных в статье результатов исследования является повышение эффективности токарной обработки за счет определения оптимальных режимов резания при использовании СОТС.

В представленной работе эффективность токарной обработки достигается за счет оптимизации режимов резания по критериям повышения производительности и снижения себестоимости. Критерии оптимизации – переменная часть производительности обработки P и переменная часть себестоимости C обработки детали режущим инструментом за один проход, зависящие от режимов резания:

$$P = 1/t_o = nS/\pi DL, \quad C = At_o + At_c t_o/T + A_u t_o/T, \quad (1)$$

где, t_o - основное время обработки; t_c - время смены инструмента; T - период стойкости инструмента, D - диаметр обрабатываемой поверхности; L – длина; n – частота вращения; S – подача; A - себестоимость станко - минуты; A_u - стоимость одного периода стойкости инструмента.

Целевые функции, выражающие зависимость критериев оптимизации от режимов резания:

$$P = n \cdot s \rightarrow \max; \quad C = C_{01} V^{-1} S^{-1} + M V^{k_v} S^{k_s}, \quad (2)$$

где $M = (t_c + A_u/A)t^{x_v/m} / C_V^{1/m} K_V^{1/m} K_\Theta^{1/mn_t}$; $K_V = 1/m - 1$; $K_S = y_v/m - 1$ $K_\Theta = \Theta/\Theta_P$

коэффициент необходимого снижения температуры резания Θ_P при превышении ею допустимого уровня Θ ; V – скорость резания; t – глубина резания; C_V , K_V – коэффициенты, x_v , y_v , m_v – показатели, характеризующие степень влияния глубины, подачи и стойкости T на скорость резания; n_t – показатель, характеризующий степень влияния скорости на температуру резания.

При обработке приняты следующие ограничения: 1) по возможностям режущего инструмента; 2) по предельно допустимой мощности резания; 3) по предельно допустимой температуре резания Θ ; 4) по прочности режущей пластины инструмента. Параметры в ограничениях по возможностям режущего инструмента, по предельно допустимой мощности резания, по прочности режущей пластины инструмента принимаются в соответствии со справочно-нормативной литературой [2].

Независимо от критерия оптимизации, оптимальные подачи при черновой и чистовой обработке определяются:

$$S_{o1} = \left[34c^{1.35} K_\varphi^{0.8} / C_p K_p K_{PC} t^{(x_p - 0.77)} \right]^{1/y_p} \quad S_{o2} = \left(R_a / C_R K_R K_{RC} t^{x_r} \right)^{1/y_r} . \quad (3)$$

Оптимальные по критерию производительности скорости резания при черновой и чистовой обработках определяются:

$$V_{oP1} = \begin{cases} \left(\Theta / C_\Theta K_\Theta K_{\Theta C} t^{x_t} S_{o1}^{y_t} \right)^{1/n_t}, & K_{\Theta oP1} \leq 1 \\ C_V K_V K_{TC}^m / T^m t^{x_v} S_{o1}^{y_v}, & K_{\Theta oP1} \geq 1 \end{cases} , \quad (4)$$

$$K_{\Theta oP1} = \Theta / C_\Theta K_\Theta t^{x_t} \left(C_V K_V / T^m t^{x_v} \right)^{n_t} \left[34c^{1.35} K_\varphi^{0.8} / C_p K_p t^{(x_p - 0.77)} \right]^{(y_v n_t - y_t)/y_p} , \quad (5)$$

$$V_{oP2} = \begin{cases} \left(\Theta / C_\Theta K_\Theta K_{\Theta C} t^{x_t} S_{o2}^{y_t} \right)^{1/n_t}, & K_{\Theta oP2} \leq 1 \\ C_V K_V K_{TC}^m / T^m t^{x_v} S_{o2}^{y_v}, & K_{\Theta oP2} \geq 1 \end{cases} , \quad (6)$$

$$K_{\Theta oP2} = \Theta / C_\Theta K_\Theta t^{x_t} \left(C_V K_V / T^m t^{x_v} \right)^{n_t} \left[R_a / C_R K_R t^{x_r} \right]^{(y_v n_t - y_t)/y_r} . \quad (7)$$

Оптимальные по критерию себестоимости скорости резания при черновой и чистовой обработках определяются:

$$V_{oC1} = \begin{cases} \left(\Theta / C_\Theta K_\Theta K_{\Theta C} t^{x_t} S_{o1}^{y_t} \right)^{1/n_t}, & K_{\Theta oC1} \leq 1 \\ M_V C_V K_V K_{TC}^m / T^m t^{x_v} S_{o1}^{y_v}, & K_{\Theta oC1} \geq 1 \end{cases} , \quad (8)$$

$$K_{\Theta oC1} = \Theta / C_{\Theta} K_{\Theta} t^{x_t} \left(M_V C_V K_V / T^m t^{x_v} \right)^{n_t} \left[34 c^{1.35} K_{\varphi}^{0.8} / C_p K_p t^{(x_p - 0.77)} \right]^{(y_v n_t - y_t) / y_p},$$

$$V_{oC2} = \begin{cases} \left(\Theta / C_{\Theta} K_{\Theta} K_{\Theta C} t^{x_t} S_{o2}^{y_t} \right)^{1/n_t}, & K_{\Theta oC2} \leq 1 \\ M_V C_V K_V K_{TC}^m / T^m t^{x_v} S_{o2}^{y_v}, & K_{\Theta oC2} \geq 1 \end{cases}, \quad (9)$$

$$K_{\Theta oC2} = \Theta / C_{\Theta} K_{\Theta} t^{x_t} \left(M_V C_V K_V / T^m t^{x_v} \right)^{z_t} \left[R_a / C_R K_R t^{x_r} \right]^{(y_v n_t - y_t) / y_r}, \quad (10)$$

где $K_{\Theta oC1} = \Theta / \Theta(V_{oC1}, S_{o1})$, $K_{\Theta oC2} = \Theta / \Theta_P(V_{oC2}, S_{o2})$ - граничные значения коэффициентов снижения температуры резания, свидетельствующие о необходимости учета температурного ограничения при черновой и чистовой обработке;

$M_V = (m / (1 - m) (t_c + A_u / A))^m$ - коэффициент, учитывающий отличие режимов резания, оптимальных по критерию себестоимости от режимов резания, оптимальных по критерию производительности.

Закономерности изменения и результаты определения температуры резания в зависимости от режимов токарной обработки труднообрабатываемых материалов с применением СОТС, устанавливаются на основании теоретических исследований в соответствии с известной методикой [3].

На основании установленных аналитических зависимостей оптимальных подач S_o и скоростей резания V_o от параметров процесса обработки определены коэффициенты интенсификации режимов резания при использовании СОТС. Коэффициенты повышения оптимальных подач при черновой $K_{S1} = S_{o1COTC} / S_{o1\delta ezCOTC}$ и чистовой $K_{S2} = S_{o2COTC} / S_{o2\delta ezCOTC}$ токарной обработке конструкционных сталей с использованием СОТС:

$$K_{S1} = K_{PC}^{-1/y_P}; \quad K_{S2} = K_{RC}^{-1/y_R}. \quad (11)$$

Коэффициенты повышения оптимальных по производительности скоростей резания при черновой $K_{VP1} = V_{o1COTC} / V_{o1\delta ezCOTC}$ и чистовой $K_{VP2} = V_{o2COTC} / V_{o2\delta ezCOTC}$ обработке с использованием СОТС:

$$K_{VP1} = \begin{cases} K_{\Theta}^{-1/n_t} K_{PC}^{y_t/y_P n_t}, & \text{при } K_{\Theta oP1} \leq 1; \\ K_T^m K_{PC}^{y_v/y_P}, & \text{при } K_{\Theta oP1} \geq 1. \end{cases}$$

$$K_{VP2} = \begin{cases} K_{\Theta}^{-1/n_t} K_{RC}^{y_t/y_R n_t}, & \text{при } K_{\Theta oP2} \leq 1; \\ K_T^m K_{RC}^{y_v/y_R}, & \text{при } K_{\Theta oP2} \geq 1. \end{cases}$$

С увеличением коэффициентов повышения стойкости инструмента K_T и уменьшением коэффициентов снижения температуры K_{Θ} оптимальная по

производительности скорость резания возрастает в той же степени, что и коэффициент снижения шероховатости K_R .

Коэффициенты снижения оптимальных по себестоимости скоростей резания при черновой K_{VC1} и чистовой K_{VC2} обработке с использованием СОТС:

$$K_{VC1} = \begin{cases} K_{\Theta}^{1/n_t} K_{PC}^{-y_t/y_P n_t}, & \text{при } K_{\Theta o C1} \leq 1; \\ K_T^{-m} K_{PC}^{-y_v/y_P}, & \text{при } K_{\Theta o C1} \geq 1. \end{cases}$$

$$K_{VC2} = \begin{cases} K_{\Theta}^{1/n_t} K_{RC}^{-y_t/y_r n_t}, & \text{при } K_{\Theta o C2} \leq 1; \\ K_T^{-m} K_{RC}^{-y_v/y_r}, & \text{при } K_{\Theta o C2} \geq 1. \end{cases}$$

При увеличении коэффициентов повышения стойкости инструмента K_T и снижения температуры K_{Θ} возрастает оптимальная по себестоимости скорость резания в той же степени, что и коэффициент снижения шероховатости K_R .

Установленные коэффициенты интенсификации режимов резания позволяют определять коэффициенты повышения производительности $K_P = P(V, S)_{СОТС} / P(V, S)_{безСОТС}$ и снижения себестоимости $K_C = C(V, S)_{СОТС} / C(V, S)_{безСОТС}$ за счет применения СОТС.

Коэффициенты повышения производительности при черновой K_{P1} и чистовой K_{P2} обработке с использованием СОТС:

$$K_{P1} = \begin{cases} K_{\Theta}^{-1/n_t} K_{PC}^{(y_t - n_t)/y_P n_t}, & \text{при } K_{\Theta o P1} \leq 1; \\ K_T^m K_{PC}^{(y_v - 1)/y_P}, & \text{при } K_{\Theta o P1} \geq 1. \end{cases}$$

$$K_{P2} = \begin{cases} K_{\Theta}^{-1/n_t} K_{RC}^{(y_t - n_t)/y_r n_t}, & \text{при } K_{\Theta o P2} \leq 1; \\ K_T^m K_{RC}^{(y_v - 1)/y_r}, & \text{при } K_{\Theta o P2} \geq 1. \end{cases}$$

Коэффициенты снижения себестоимости при черновой K_{C1} и чистовой K_{C2} обработке с использованием СОТС:

$$K_{C1} = \begin{cases} K_{\Theta}^{1/n_t} K_{PC}^{(n_t - y_t)/y_P n_t}, & \text{при } K_{\Theta o C1} \leq 1; \\ K_T^{-m} K_{PC}^{(y_v - 1)/y_P}, & \text{при } K_{\Theta o C1} \geq 1. \end{cases}$$

$$K_{C2} = \begin{cases} K_{\Theta}^{1/n_t} K_{RC}^{(n_t - y_t)/y_r n_t}, & \text{при } K_{\Theta o C2} \leq 1; \\ K_T^{-m} K_{RC}^{(1 - y_v)/y_r}, & \text{при } K_{\Theta o C2} \geq 1. \end{cases}$$

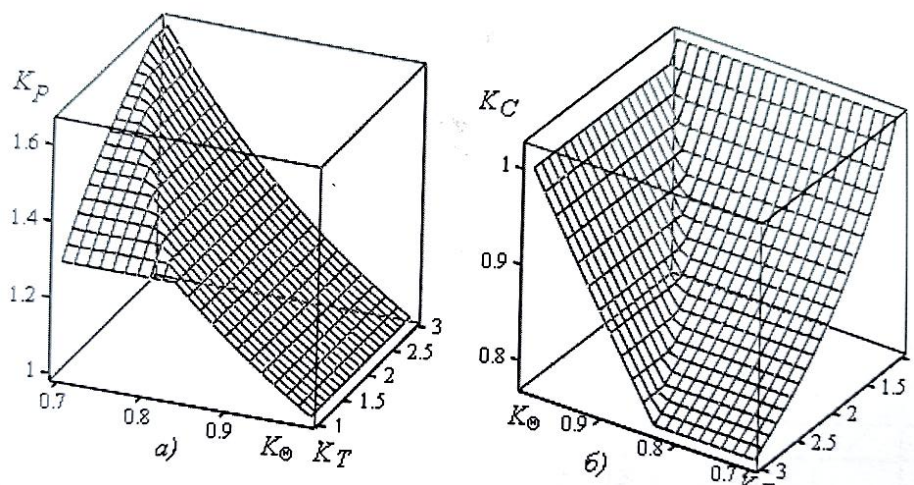


Рис. 1. Графики зависимости коэффициентов повышения производительности K_P - а) и снижения себестоимости K_C - б) от коэффициентов снижения температуры резания K_Θ и повышения стойкости режущего инструмента K_T при обработке с использованием СОТС

На рис. 1 представлены графики зависимостей коэффициентов повышения производительности K_P и снижения себестоимости K_C от коэффициентов снижения температуры резания K_Θ и повышения стойкости режущего инструмента K_T при следующих значениях коэффициентов снижения силы резания и шероховатости обработанной поверхности: $K_{P_z} = K_R = 1$. При выполнении расчетов в качестве примера рассмотрена чистовая обработка коррозионно-стойкой жаропрочной стали X18H9T.

При чистовой токарной обработке указанного материала с использованием СОТС при оптимальных режимах резания можно достичь повышения стойкости режущего инструмента до 3 раз, снижения температуры резания в 1,5 раза, что в свою очередь обеспечивает возможность роста производительности и снижения себестоимости до 1,6 раза.

Список литературы 1. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: Справочник / Л. В. Худобин, А. П. Бабищев, Е. М. Булыжев и др. – М.: Машиностроение, 2006. – 544с. 2. Гуревич В.Я. Режимы резания труднообрабатываемых материалов / В. Я. Гуревич. – М.: Машиностроение, 1986. - 240с. 3. Резников, А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – Москва: Машиностроение, 1981. – 279 с. 4. Ивченко Т. Г. Учет температурных ограничений при оптимизации режимов резания труднообрабатываемых материалов / Т. Г. Ивченко, О. В. Пащук // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2018. Вып. 3 (62) . – С. 30-35.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.;
Абаза Е. В., Анастасьев А. В., Михайлов А. Н. СТРУКТУРА И ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА АВТОМОБИЛЬНЫХ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ: ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ	3
Бедоидзе М. В., Богданец Д. А., Джедиров Д. А., Кругликова М. А., Степаницын А. С. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРАКТИКА ДИСПЕРСНОГО АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЫЛИ СИТОВЫМ МЕТОДОМ	7
Богомоленко Д. В., Баранов И. В., Братищенко Я. А., Холодова С. Н. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО МАШИННОГО ПРОИЗВОДСТВА С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛЕЙ М/М/1 ИЗ ТЕОРИИ ОЧЕРЕДЕЙ	18
Гончаров А. М., Матвиенко С. А. РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ СИНТЕЗА КОМБИНИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ	24
Грищенко В. И., Калмыкова К. Ф., Степаницын А. С., Цымбалов Д. С., Яценко О.В. РАСЧЕТ ТОКСИЧНОСТИ РЕАКТИВНЫХ, ОТРАБОТАВШИХ И ДЫМОВЫХ ГАЗОВ: МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ	29
Дромиади К. Д., Савранский К. А., Тринц Д. В., Филимонов М. Н. РОБОТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА С ГИБКИМИ СВЯЗЯМИ ДЛЯ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА	33
Зуйков И. А., Лахин А. М. СТРУКТУРНОЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ МАССОВОГО ПРОИЗВОДСТВА НА БАЗЕ ТЕХНОЛОГИЙ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ	38
Горобец И. А., Поляков В. Ю. РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ ПРИРОДНОГО КАМНЯ	44
Ковалёв А. Ю., Черепяхин А. Ю., Буленков Е. А. ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ	48
Макаров К. В., Петрова Ю. Н., Бобров Н. В. НЕСТАНДАРТНЫЕ ПРОТОКОЛЫ СВЯЗИ И «ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ»	51

Михайлов Н. В., Лахин А. М. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПУТЕЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ	56
Мищенко А. А., Анастасьев А. В., Михайлов А. Н. ВНЕДРЕНИЕ НЕТРАДИЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАССИВНОЙ И АКТИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОМОБИЛЯ	61
Филиппов М. Н. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЁТА СВАРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ИЗ СТАЛИ Р91 ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В LS-DYNA	66
Шунякова О. Ф., Василенко А. Н., Петряева И. А. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОТС	71

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**Студенческий
научно-технический журнал**

«ИНЖЕНЕР»

№ 1 (39)' 2025

ISSN 2073-5804

Главный редактор
д-р техн. наук, проф. А.Н. Михайлов
E-mail: tm@fimm.donntu.ru
Технический редактор *Д. С. Жарких*

*Учредитель и издатель – ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ*

Адрес издателя: ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ФГБОУ ВО «ДонНТУ»,
тел. +7 (856) 337-17-33, 335-75-62

Адрес редакции: ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, тел.+ 7 949 306-08-79,
+7 (856) 301-08-05. E-mail: tm@fimm.donntu.ru . Сайт: <http://engineer.donntu.ru>