



УДК 629.7.02:621.865.8:667.6
МРНТИ 55.47.29; 73.37.61
https://doi.org/10.53364/24138614_2026_41_2_5

К.Т. Кошекoв^{1*}, М.Е. Қалекеева¹

¹Академия гражданской авиации, Алматы, Казахстан

*E-mail: k.koshekov@agakaz.kz

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ПО НАНЕСЕНИЮ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОБРАЗЦЫ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ С ПОМОЩЬЮ ГИБКОГО РОБОТА

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы повышения эффективности операций по нанесению лакокрасочных покрытий на образцы авиационной техники с использованием гибкого промышленного робота. Предметом исследования являются технологические процессы автоматизированного нанесения лакокрасочных материалов на поверхности авиационных конструкций сложной геометрической формы, а также методы повышения качества покрытия и производительности окрасочных работ за счет применения роботизированных комплексов.

Целью исследования является разработка и оценка метода управления гибким роботом, обеспечивающего повышение эффективности операций окраски авиационной техники путем оптимизации траектории движения рабочего инструмента, поддержания требуемого расстояния до окрашиваемой поверхности и равномерного распределения лакокрасочного материала по всей площади обработки.

Разработанный метод базируется на использовании цифровой модели объекта окраски, алгоритмов адаптивного планирования траектории движения манипулятора и математического аппарата пространственного позиционирования, позволяющего учитывать сложную конфигурацию авиационных поверхностей. В основу метода положены принципы роботизированного управления технологическими процессами, компьютерного моделирования и автоматизированного контроля параметров нанесения покрытия в режиме реального времени.

В отличие от классической модели ручного нанесения лакокрасочных покрытий, разработанный метод обеспечивает более высокую точность позиционирования распылительного оборудования, снижение влияния человеческого фактора, повышение стабильности толщины покрытия и уменьшение расхода лакокрасочных материалов. Кроме того, применение гибкого робота позволяет сократить продолжительность технологического цикла, повысить безопасность выполнения работ и обеспечить обработку труднодоступных участков авиационных конструкций с сохранением требуемых показателей качества покрытия. Полученные результаты подтверждают перспективность внедрения роботизированных технологий в процессы производства и технического обслуживания авиационной техники.

Ключевые слова: гибкий робот, лакокрасочные покрытия, авиационная техника, роботизированная окраска, автоматизация технологических процессов, оптимизация траектории движения, цифровая модель поверхности.

Введение.

Лакокрасочные и антикоррозионные покрытия авиационной техники выполняют не только декоративную, но прежде всего защитную функцию. В процессе эксплуатации воздушные суда подвергаются воздействию атмосферной влаги, ультрафиолетового излучения, перепадов температур, абразивных частиц, агрессивных химических веществ и аэрозольных загрязнений [1]. Повреждение или неравномерность покрытия приводит к развитию коррозионных процессов, снижению усталостной прочности конструкции, нарушению аэродинамических характеристик и увеличению эксплуатационных затрат [2, 3]. Самым опасным явлением считается образование локальных провалов покрытия, через которые влага и агрессивные вещества проникают к металлической поверхности, вызывая очаговую коррозию.

В соответствии с требованиями международных авиационных стандартов ICAO [4], EASA [5] и нормативных документов в области эксплуатации авиационной техники, все технологические процессы по восстановлению защитных и лакокрасочных покрытий авиационной техники должны обеспечивать антикоррозионную защиту конструкции, равномерность распределения покрытия, соблюдение нормативной толщины слоя, стабильность технологических параметров и контроль качества нанесения покрытий [1–3, 6–10]. При подготовке поверхности объекта к покраске повреждения должны быть сведены к минимальному значению. Также должно соблюдаться основные требования безопасности и экологических норм при распылении покрытий. По поверхности конструкции лакокрасочное покрытие должно распределяться равномерно и предотвращены локальные непрочасы и слои утолщений [6].

В процессах ТОиР реализация восстановления ЛКП выполняются применением методов обработки поверхности и технологических процессов распыления лакокрасочных материалов [8]. Общая процедура включает в себя нанесение распылителем на всю поверхность компонента с одновременным распылением заданного материала. После покрытия поверхности этот материал затвердевает, образуя дополнительный слой. Двумя наиболее распространенными технологиями на основе распыления являются химическое покрытие и термическое распыление [11]. Типичными областями применения этой технологии обработки поверхности являются эстетические модификации (например, изменение цвета поверхности), улучшение функциональности и характеристик детали (например, теплоизоляция, биосовместимость, адгезия или электропроводность), а также увеличение срока службы компонента (например, защита от износа, истирания, эрозии, коррозии или окисления) [7, 8]. Широко распространенным техническим решением для повышения эффективности процесса распыления является использование промышленных роботов [12].

На сегодняшний день роботизированное распыление самый распространенный производственный процесс для эффективного и экономичного нанесения покрытий на множество механических компонентов АТ. Основные преимущества применения роботизированных систем при нанесении лакокрасочных покрытий заключаются в обеспечении высокой повторяемости и стабильности технологического процесса [11, 12]. Также в повышении безопасности персонала за счёт снижения воздействия высоких температур, паров и аэрозольных испарений лакокрасочных материалов, а также в повышении экономической эффективности производства благодаря увеличению производительности обработки [1–3, 7–10]. Они способны выполнять технологические операции с более высокой скоростью, точностью и продолжительностью непрерывной работы по сравнению с ручным трудом оператора [13].

Вследствие эксплуатации в сложных климатических и пылевых условиях покрытия пылезащитного устройства (ПЗУ) авиационной техники часто подвергаются износу и образованию микротрещин с дальнейшим образованием коррозий в конструкции. ПЗУ представляет собой специальную систему очистки входящего воздушного потока,

устанавливаемую перед воздухозаборниками двигателей и предназначенную для защиты газотурбинных двигателей от попадания пыли, песка, мелких абразивных частиц и посторонних предметов при взлёте, посадке и эксплуатации на неподготовленных площадках. Они существенно снижают эрозионный износ компрессорных лопаток двигателя и увеличить ресурс силовой установки [14].

В данной части диссертационного исследования представлены основные результаты экспериментального исследования эффективности применения гибкого робота при выполнении операций нанесения лакокрасочных покрытий

Основной целью проведения экспериментальных исследований является оценка эффективности применения гибкого робототехнического комплекса при выполнении операций нанесения лакокрасочных покрытий на элементы авиационной техники сложной геометрии.

В результате проведения экспериментов предполагается подтвердить возможность эффективного применения гибкого робота для автоматизации операций нанесения лакокрасочных покрытий. При реализации сравнительного анализа различных способов нанесения покрытий (автоматизированное/ручное) осуществляется оценка равномерности покрытия, разброса толщины лакокрасочного слоя, количества локальных провалов и превышений толщины, а также объем расхода лакокрасочных материалов. В конечном итоге ожидается повышение стабильности технологического процесса и улучшение повторяемости результатов при обработке поверхностей сложной пространственной геометрии без участия персонала.

Материалы и методы исследования.

Экспериментальные исследования были проведены в производственных условиях АО «Авиаремонтный завод №405» при выполнении операций ремонта и восстановления лакокрасочных покрытий авиационной техники. В качестве объекта исследования использовано пылезащитное устройство (ПЗУ) вертолета Ми-8, имеющее сложную криволинейную форму поверхности.

ПЗУ вертолётa Ми-8 характеризуется сложной пространственной геометрией, наличием криволинейных поверхностей, переходных радиусов и цилиндрических элементов. Конструктивные особенности ПЗУ усложняет процессы нанесения лакокрасочных покрытий ручным способом. При традиционной ручной покраске возникают проблемы поддержания постоянного расстояния распыления, стабильного угла подачи материала и равномерности перемещения распылителя по поверхности. Это способствует к локальным утолщениям и неравномерным распределением покрытия вдоль краев конструкции, включая перерасход лакокрасочных материалов и увеличение трудоёмкости технологического процесса. Чрезмерное превышение толщины покрытия увеличивает массу конструкции и ухудшает эксплуатационные характеристики, тогда как недостаточная толщина снижает защитные свойства покрытия и ускоряет развитие коррозии. Поэтому обеспечение равномерного распределения покрытия на поверхностях сложной геометрии является одной из сложных процессов ТОиР авиационной техники. Общий вид объекта исследования представлена на рисунке 1.

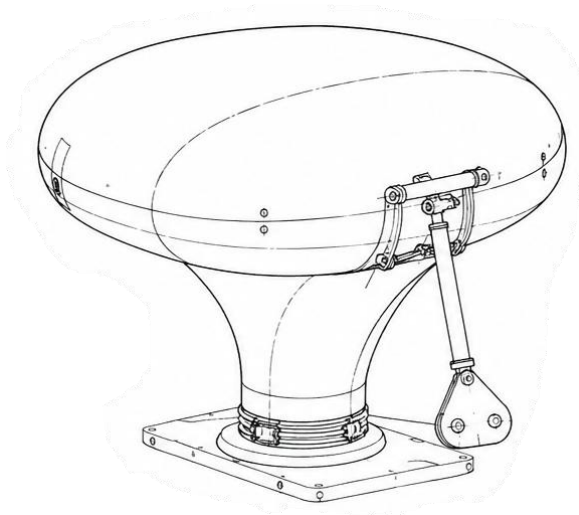


Рисунок 1 – Общий вид пылезащитного устройства вертолѐта Ми-8

Работы выполнены в условиях покрасочного участка в соответствии с требованиями технологической рекомендации ТР 1.2.2519-2016 по нанесению полиуретановых авиационных покрытий.

Для проведения эксперимента используется аппаратная модель роботизированной системы управления нанесением лакокрасочных и антикоррозионных покрытий с гибким исполнительным механизмом. Измерение толщины покрытия выполняется с использованием многофункционального прибора «Константа К6». Статистическая обработка результатов осуществляется средствами Microsoft Excel. В ходе проведения исследования анализируются показатели толщины покрытия в контрольных точках, диапазон измерений, среднее арифметическое значение, дисперсия, стандартное отклонение, коэффициент вариации, локальные провалы и локальные превышения толщины покрытия.

На первом этапе экспериментального исследования в целях обеспечения стабильности технологического процесса, равномерности распределения покрытия и автоматизированного управления параметрами распыления необходима разработка математической модели нанесения лакокрасочных и антикоррозионных покрытий гибким роботом.

В настоящее время известен ряд математических моделей нанесения покрытий, удобных в реализации процессов ремонта вертолетной техники:

- конвективно-диффузионная на основе распределения концентрации частиц краски в пространстве, коэффициентов турбулентной диффузии и осаждения [15];
- оптимизации траектории распылителя, где толщина покрытия – интегральная величина от изменяющихся параметров плотности потока распыла, коэффициента осаждения и траектории робота [16].

Применение данных методов качественно повысит процесс нанесения покрытий, однако они очень сложны в алгоритмической и программной реализации из-за сложностей описания физического обоснования и требуют сложных конструкций распылителя. С учетом особенностей конструкций разработанной роботизированной системы, описанной в предыдущем разделе, предлагается кинематическая модель нанесения покрытий, особенность которой заключается в учете геометрических особенностей объектов покраски.

Средняя толщина покрытия \bar{H} определяется следующим выражением

$$\bar{H} = \frac{Q(t) \cos \alpha}{d \bar{V}}, \quad (1)$$

где Q – расход покрасочного материала, $\text{м}^3/\text{сек}$;

$d = (0.5 \div 0.7)b$ – расстояние между соседними траекториями распыления при многократных проходах;

b – ширина полосы эффективного распыления, мм;

$\vec{V} = [V_x(t), V_y(t), V_z(t)]$ – вектор скорости линейных перемещений распылителя в трехмерной системе координат;

$\vec{\psi} = [\psi_x(t), \psi_y(t)]$ – вектор скорости угловых перемещений;

α – угол распыления.

При проведении технологического процесса покраски возможны случаи применения дополнительных устройств, например, при нанесении покрытий на конструктивные элементы цилиндрической формы требуется платформа вектор скорости линейных перемещений распылителя в трехмерной системе координат

$$\vec{V}^1(t) = [V_x^1(t), V_y^1(t), \psi_x^1(t)]. \quad (2)$$

Предложенная модель (1) совместно с (2) представляет полную интерпретацию процесса нанесения лакокрасочных и антикоррозионных покрытий. Изменения входных параметров позволяют полностью оптимизировать технологический процесс и применимы для объектов покраски со сложными геометрическими конструкциями. Но, самое главное – позволяют реализовывать алгоритмы управления роботизированными системами в режиме реального времени.

На рисунке 2 представлена структурная схема роботизированной системы управления нанесением лакокрасочных и антикоррозионных покрытий.



Рисунок 2 – Структурная схема роботизированной системы управления нанесением лакокрасочных и антикоррозионных покрытий

В структурной схеме, представленной на рисунке 2, персональный компьютер (ПК) с технологиями машинного зрения и CAD/CAM системой создает 3D-модели, геометрические размеры, формирует законы изменения векторов скоростей линейных и угловых перемещений в соответствии особенностями конструкций объекта покраски (ОП) с дополнительной вращающейся платформой позиционирования. Робототехнический комплекс (РК) управляет пространственным перемещением распылителя (Рп) по соответствующим законам изменения векторов скоростей. Также в структуре

роботизированной системы включена система контроля (СК) – это комплекс приборов и автоматизированных для измерения толщины лакокрасочных и антикоррозионных покрытий.

Алгоритм управления роботизированной системой нанесения лакокрасочных и антикоррозионных покрытий по шаговой реализации выглядит следующим образом.

М1: Алгоритм управления роботизированной системой нанесения лакокрасочных и антикоррозионных покрытий.

Шаг 1. Начало.

Шаг 2. Ввод исходных данных технологического процесса:

Q – расход покрасочного материала, $\text{м}^3/\text{сек}$;

$d = (0.5 \div 0.7)b$ – расстояние между соседними траекториями;

b – ширина полосы эффективного распыления, мм;

$\vec{V}(0) = [V_x(0) = 0, V_y(0) = 0, V_z(0) = 0]$ – начальный вектор скорости линейных перемещений распылителя в трехмерной системе координат;

$\vec{\psi}(0) = [\psi_x(0), \psi_y(0)]$ – начальный вектор скорости угловых перемещений

α – угол распыления;

$\vec{V}^1(0) = [V_x^1(0), V_y^1(0), \psi_x^1(0)]$.

Шаг 3. Ввод 3D-модели объекта покраски с применением программных продуктов инженерного профиля. Далее определяются его геометрические размеры, на основании которых с участием оператора формируются законы динамических изменений вектора скорости линейных $\vec{V}(t)$ и угловых $\vec{\psi}(t)$ перемещений.

Шаг 4. Разбиение технологического процесса на временные этапы $T = [t_0, t_1, \dots, t_i, \dots, t_N]$, при этом на каждом этапе определяются Q – расход покрасочного материала, скорости линейных $\vec{V}(t)$ и угловых перемещений $\vec{\psi}(t)$. Главным критерием для определения численных значений является эталонная толщина покрытия, установленная технологическим регламентом, $\bar{H}_э$.

Шаг 5. Реализация ПО «START» - модуля управления технологическим процессом нанесения лакокрасочных и антикоррозионных покрытий.

Шаг 6. Периодический контроль качества покрытия: непосредственное измерение толщины покрытия $\bar{H}_и$ и сравнение с эталонным значением $\bar{H}_э$. В случае, $\bar{H}_и \leq \bar{H}_э$, то дополнительное покрытие толщиной $+\Delta H$, в противном случае - уменьшение покрытия на $-\Delta H$. Переход на *Шаг 1*.

Шаг 6. Конец.

На рисунке 3 представлена блок-схема алгоритма управления роботизированной системой нанесения лакокрасочных и антикоррозионных покрытий.

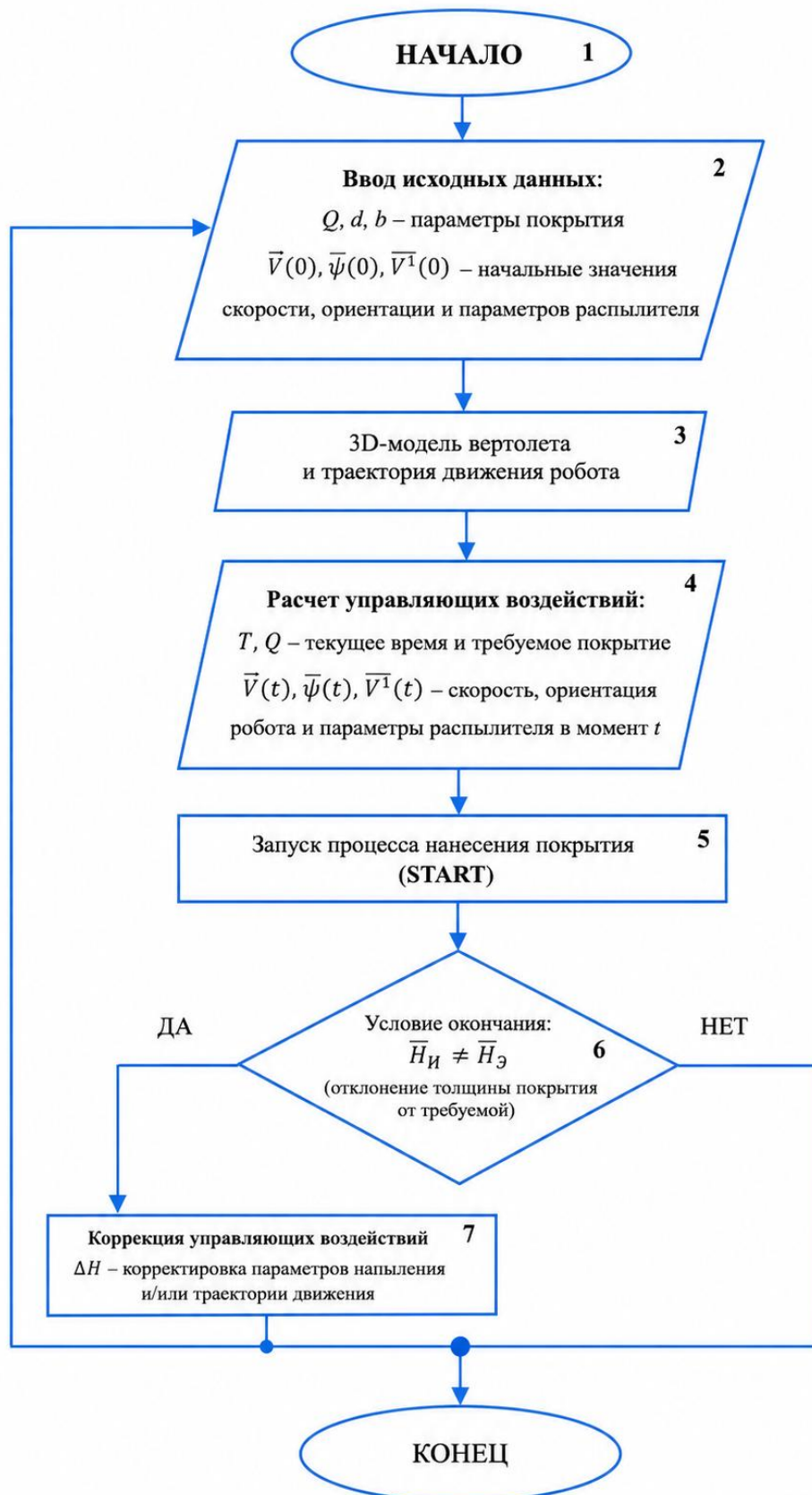


Рисунок 3 – Блок схема алгоритма управления роботизированной системой нанесения покрытий

Особенность алгоритма, представленного на рисунке 3, заключается в том, что законы динамических изменений вектора скорости линейных $\overrightarrow{V}(t)$ и угловых $\overrightarrow{\psi}(t)$ перемещений определяются на основе геометрических размеров трехмерных объектов покраски. Разработка более эффективной конструкции роботизированной системы с большими степенями свободы и возможностями перемещения позволит эффективно реализовывать законы управления, а следовательно, обеспечить более точное нанесение лакокрасочных и антикоррозионных покрытий в соответствии с эталонным значением \overline{H}_3 технологического регламента.

Результаты и их обсуждение.

Для экспериментального подтверждения эффективности разработанной роботизированной системы управления нанесением лакокрасочных и антикоррозионных покрытий были проведены сравнительные исследования ручного и автоматизированного способов выполнения технологического процесса покраски пылезащитного устройства (ПЗУ) вертолета Ми-8. Основной задачей исследования являлась оценка качества нанесения покрытия, равномерности распределения толщины слоя и стабильности технологического процесса при использовании гибкого робототехнического комплекса.

Исследования проводились в три последовательных этапа, включающих выполнение технологического процесса нанесения лакокрасочных покрытий ручным и автоматизированным способами, а также последующий сравнительный статистический анализ полученных результатов.

На первом этапе были подготовлены и покрашены три ПЗУ ручным методом в соответствии технологией нанесения систем покрытий на основе полиуретановой эмали Eclipse фирмы Акзонобель на внешнюю поверхность изделий авиационной техники в серийном производстве в условиях АО «Авиаремонтный завод №405», т.е. по технологической рекомендации ТР 1.2.2519-2016 [17]. В соответствии с данным документом допустимая величина толщины покрытия для ПЗУ должна соответствовать числовому промежутку $\overline{H}_{\text{доп}} = [45 \div 115]$ мкм. Далее была проведена техническая оценка толщины нанесенного покрытия при помощи прибора измерения геометрических параметров многофункциональный «Константа К6» в 50 контрольных точках, выбор которых определялся геометрическими особенностями испытуемого объекта, в том числе цилиндрической формой конструкции ПЗУ.

На втором этапе были подготовлены и покрашены три ПЗУ при помощи аппаратной модели роботизированной системы управления нанесением лакокрасочных и антикоррозионных покрытий в соответствии с алгоритмом. При этом были определены экспертным путем и введены в программное обеспечение следующие значения исходных параметров $Q = \dots, \text{м}^3/\text{сек}$; $d = (0,5 \div 0,7)b$; $b = \dots, \text{мм}$; $\alpha = \dots$. Далее также была проведена техническая оценка толщины нанесенного покрытия при помощи прибора измерения геометрических параметров многофункциональный «Константа К6» в тех же 50 контрольных точках ПЗУ.

На третьем этапе проводится статистический анализ результатов измерений толщины покрытия по количественным оценкам [18]:

- диапазон измеренных значений:

$$R = [H_{\text{и}}^{\text{min}}, H_{\text{и}}^{\text{max}}], \quad (3)$$

где $H_{\text{и}}^{\text{min}}$ – минимальное значение измеренного ряда,
 $H_{\text{и}}^{\text{max}}$ – максимальное значение;

- среднее арифметическое значение измерительного ряда толщины покрытия:

$$\overline{H_{И}} = \frac{\sum_{i=1}^N H_{Иi}}{N}, \quad (4)$$

где $H_{Иi}$ – измеренная толщина покрытия в определенной точке i ;
 N – общее количество точек измерения;

- разброс измерительного ряда:

$$L = H_{И}^{max} - H_{И}^{min}, \quad (5)$$

- локальные провалы:

$$Q_{ПО} = [H_{доп}^{min} - H_{И}^{min}], \quad (6)$$

где $H_{доп}^{min}$ – минимальное допустимое значение;

- локальные превышения:

$$Q_{ПЕ} = [H_{И}^{max} - H_{доп}^{min}], \quad (7)$$

где $H_{доп}^{max}$ – максимальное допустимое значение;

- концентрированность относительно средних значений:

$$C = [0.95\overline{H_{И}}, 1.05\overline{H_{И}}]; \quad (8)$$

- дисперсия – степень изменчивости относительно средней величины:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^N (H_{Иi} - \overline{H_{И}})^2}{N}; \quad (9)$$

- стандартное отклонение – степень разброса данных относительно среднего арифметического:

$$\sigma = \sqrt{D}; \quad (10)$$

- коэффициент вариации – мера оценки разброса измеренных данных:

$$V = \frac{\sigma}{\overline{H_{И}}} 100\%. \quad (11)$$

После проведения экспериментальных исследований и измерения толщины лакокрасочного покрытия в контрольных точках был выполнен сравнительный анализ результатов для ручного и автоматизированного способов нанесения покрытия. Оценка качества покрытия осуществлялась на основе количественных измерений толщины слоя, равномерности распределения покрытия и стабильности технологического процесса.

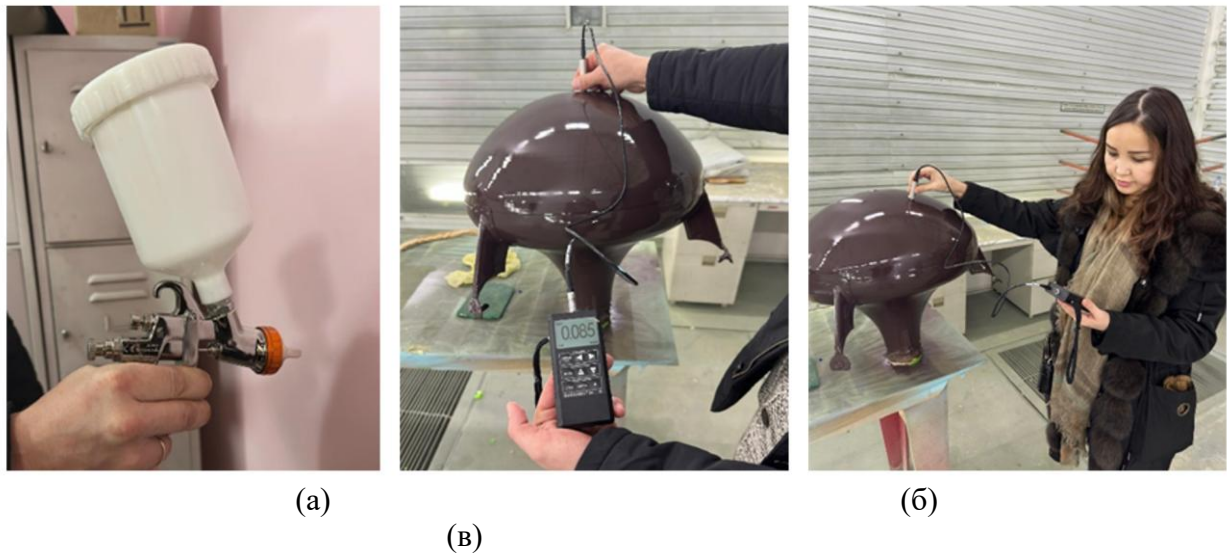


Рисунок 3 – Процесс ручного нанесения лакокрасочного покрытия и контроль толщины покрытия пылезащитного устройства вертолета Ми-8: а – ручной распылитель для нанесения покрытия; б – контроль толщины лакокрасочного покрытия; в – проведение измерений толщины покрытия на поверхности ПЗУ

Результаты измерений толщины лакокрасочного покрытия для пылезащитных устройств вертолета Ми-8, покрашенных ручным способом, представлены на рисунке 4.

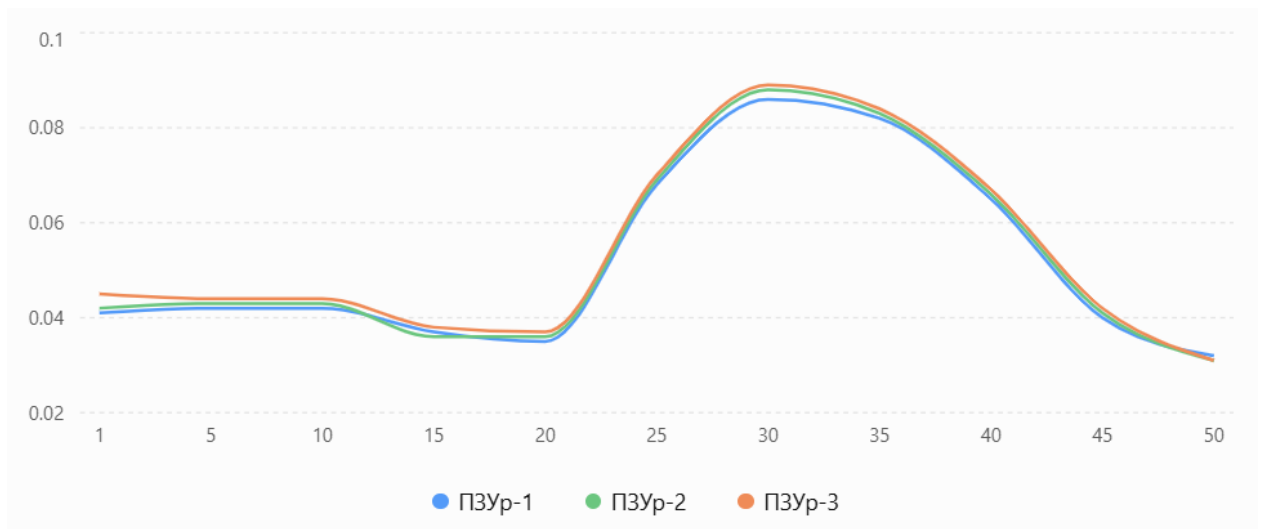
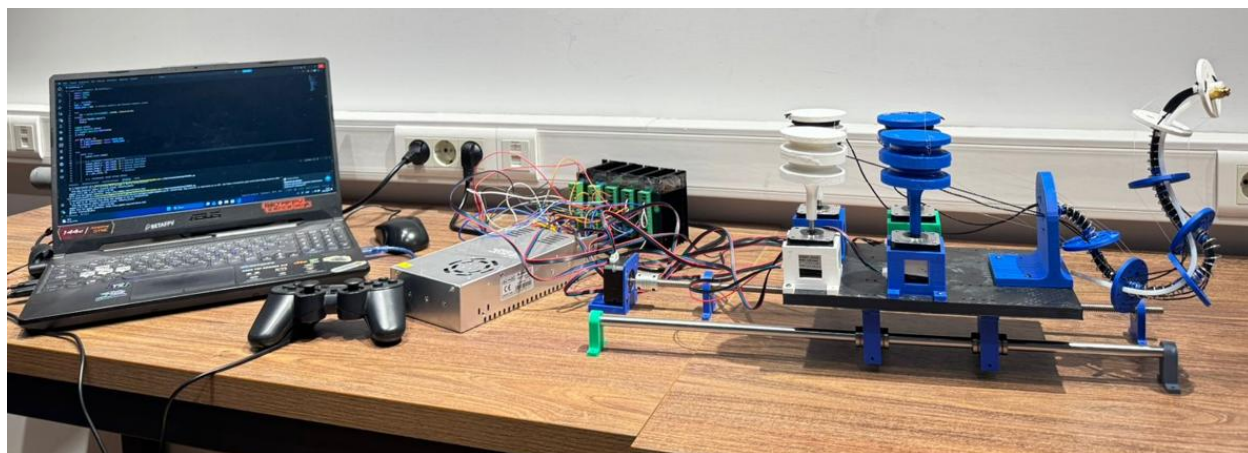


Рисунок 4 – Результаты измерений для ПЗУ, покрашенных ручным способом

Распределение толщины лакокрасочного покрытия по 50 точкам измерения для трех образцов ПЗУ. Измерения показывают значительную неравномерность толщины покрытия. Минимальные значения наблюдаются в точках 14, 48–50 и составляют 0,030–0,032 мм, тогда как максимальная толщина покрытия достигает 0,086–0,089 мм в областях 29–30. Разброс значений превышает 180%, что свидетельствует о существенной зависимости качества покрытия от квалификации оператора и пространственного положения распылителя относительно поверхности изделия. Наибольшая толщина покрытия наблюдается в центральной зоне ПЗУ, тогда как на периферийных участках фиксируется недокрас. Полученные результаты подтверждают необходимость применения

роботизированной системы нанесения покрытий для повышения равномерности распределения лакокрасочного материала по поверхности авиационных деталей.

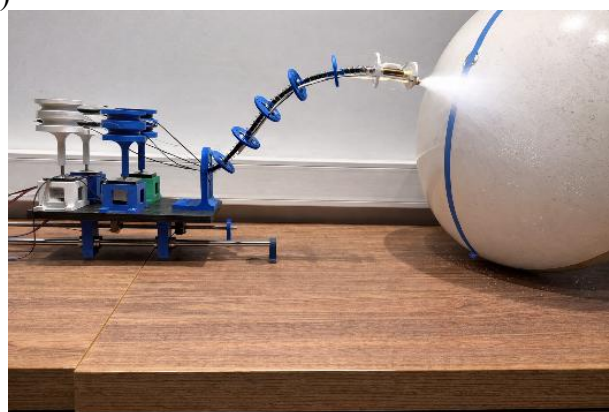
После выполнения технологического процесса с применением разработанной роботизированной системы управления нанесением лакокрасочных и антикоррозионных покрытий были проведены повторные измерения толщины покрытия в аналогичных контрольных точках пылезащитного устройства вертолета Ми-8. Полученные результаты позволили оценить степень равномерности распределения покрытия и стабильность автоматизированного процесса нанесения лакокрасочного материала.



(a)



(б)



(в)

Рисунок 5 – Экспериментальная роботизированная система нанесения лакокрасочных покрытий: а – аппаратная модель роботизированной системы управления нанесением лакокрасочных и антикоррозионных покрытий

б – работа гибкого исполнительного механизма при нанесении покрытия; в – процесс автоматизированного распыления покрытия на криволинейную поверхность

Результаты измерений толщины покрытия для ПЗУ, покрашенных с применением автоматизированных технологий, представлены на рисунке 6.

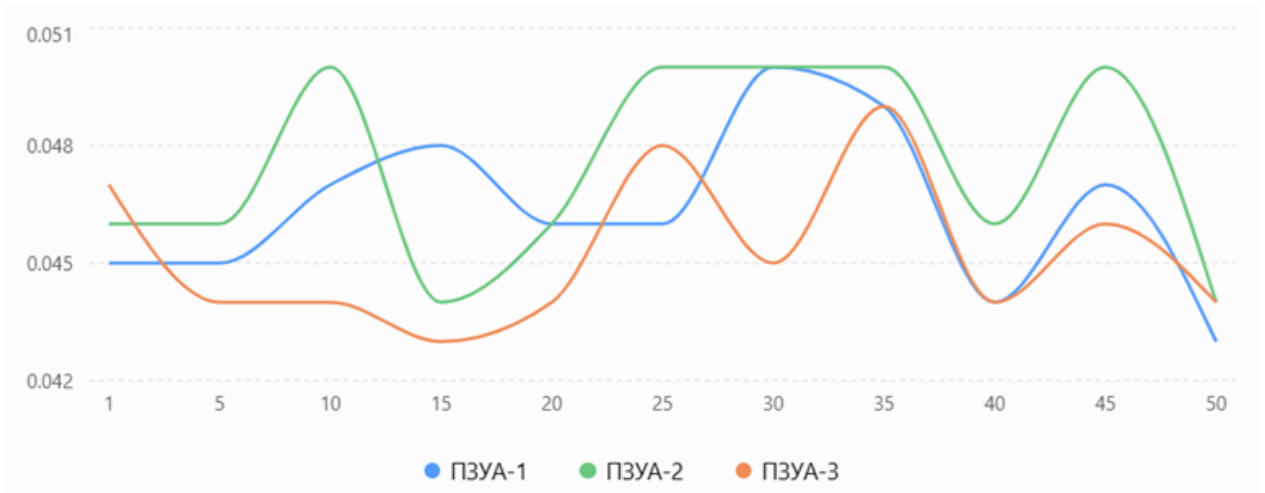


Рисунок 6 – Результаты измерений толщины покрытия для ПЗУ, покрашенных с применением автоматизированных технологий, представлены на

Полученные данные демонстрируют высокую повторяемость процесса нанесения покрытия. Толщина покрытия для образцов ПЗУА-1, ПЗУА-2 и ПЗУА-3 изменяется в пределах 0,043–0,051 мм, при этом максимальное отклонение не превышает $\pm 0,004$ мм относительно среднего значения. В отличие от ручного способа окраски, где наблюдались локальные зоны переизбытка и недостатка покрытия, автоматизированная технология обеспечивает практически равномерное распределение лакокрасочного материала по всей поверхности изделия. Это подтверждает эффективность применения роботизированной системы для повышения качества антикоррозионной защиты авиационных конструкций и снижения влияния человеческого фактора на результат окраски.

Статистический анализ результатов нанесения лакокрасочных покрытий ручным и автоматизированным способом для оценки их качества показал следующее.

1. Диапазон результатов измерений при ручной обработке и нанесении лакокрасочных покрытий $R_P = [0,030; 0,089]$ мм показывает, что разброс измерительного ряда данных $L_P = 0,059$ мм достаточно высокий. Имеются существенные локальные провалы $Q_{\text{ПОР}} = 0,015$ мм и превышения $Q_{\text{ПЕР}} = 0,044$ мм. Наблюдается недостаточное качество технологического процесса из-за неравномерности покрытия.

2. С применением аппаратной модели роботизированной системы управления нанесением лакокрасочных и антикоррозионных покрытий, количественные и качественные показатели существенно улучшаются. В частности, диапазон результатов измерений $R_A = [0,041; 0,051]$ мм существенно сокращается, а разброс измерительного ряда $L_A = 0,010$ мм уменьшается почти в шесть раз. Локальные провалы уменьшились $Q_{\text{ПОА}} = 0,004$ мм в 3 раза, а локальные превышения $Q_{\text{ПЕА}} = 0,006$ мм – в 7 раз, т.е. практически отсутствуют. Следовательно, покрытие стало более стабильным, равномерным и однородным.

3. Сравнивая значения дисперсий $D_P = 0,00036062 \text{ мм}^2$ и $D_A = 0,0000603667 \text{ мм}^2$, а также стандартных отклонений $\sigma_P = 0,01899$ м и $\sigma_A = 0,007769$ м, можно наблюдать их снижения в 6 и 2.5 раза соответственно, что показывает на уменьшение количества случайных отклонений и повышение стабильности технологического процесса.

4. В инженерной практике коэффициент вариации характеризует качество технологического процесса, поскольку оценивает стабильность и однородность выпускаемой продукции или точность процессов независимо от масштабов при контроле состояния. Анализируя данные показатели $V_P = 35,08\%$ и $V_A = 16,66\%$, можно заключить, что качество технологического процесса при автоматизации улучшается в 2 раза.

5. Среднее арифметическое значение толщины покрытия при ручном методе составило $\overline{H_{ИР}} = 0,054$ мм с промежутком концентрированности $C_p = [0,051; 0,057]$ мм, в который вошли 17 измеренных значений, т.е. их распределение широкое и неравномерное. В тоже время в автоматизированном режиме $\overline{H_{ИА}} = 0,046$ мм уменьшилось, а отрезок концентрированности составил $C_A = [0,044; 0,049]$ мм, в который вошли 111 измеренных значений, т.е. их распределение более равномерное, что также подтверждает стабильность и однородность покрытия, а также повышение соответствия технологическому регламенту.

6. Зоны с недостаточной толщиной покрытия приводят к коррозиям, а с повышенным – к перерасходу материала. В результате эксперимента при автоматизированном процессе покраски ПЗУ наблюдается до 10% экономии лакокрасочных материалов.

Технологический процесс нанесения лакокрасочных покрытий ручным способом на ПЗУ характеризуется неравномерностью, недостаточной и избыточной толщиной, рискам ранней коррозии и перерасхода материала.

Автоматизация благодаря применению аппаратной модели роботизированной системы управления нанесением лакокрасочных и антикоррозионных покрытий существенно повышает эффективность технологического процесса, что подтверждается значительным снижением количественных характеристик (диапазон измерений, дисперсией, коэффициентом вариации) статистического анализа по причине формирования стабильного и однородного покрытия в геометрически сложных и уязвимых местах. Алгоритм управления роботизированной системой нанесения покрытий и статистический анализ результатов эксперимента подтверждает высокую технологическую и экономическую эффективность автоматизации технологического процесса.

Заключение.

В результате настоящего исследования была разработана структурная схема и алгоритм управления роботизированной системы управления нанесением лакокрасочных и антикоррозионных покрытий.

Представлен технологический процесс нанесения лакокрасочных покрытий ручным способом на ПЗУ характеризуется неравномерностью, недостаточной и избыточной толщиной, рискам ранней коррозии и перерасхода материала.

Статистический анализ результатов доказывает эффективность применения аппаратной модели роботизированной системы нанесения лакокрасочных покрытий обеспечивает существенное повышение качества технологического процесса по сравнению с ручным способом.

Диапазон измерений толщины покрытия уменьшился с 0,059 мм до 0,010 мм, то есть почти в 6 раз. Локальные провалы покрытия снизились на 73%, а локальные превышения составили более чем на 86% более равномерно и однородно нанесены покрытия.

Дисперсия результатов уменьшилась почти в 6 раз, а коэффициент вариации снизился с 35,08% до 16,66%, что подтверждает повышение стабильности технологического процесса более чем в 2 раза. Автоматизированное нанесение покрытий снизил перерасход лакокрасочных материалов до 10 % и повысил качество обработки геометрически сложных поверхностей авиационной техники.

Список литературы

1. Boeing Commercial Airplanes. (2020). Maintenance Error Management System (MEMS) Report. – Seattle.
2. Zhang, T., Zhang, T., He, Y., Wang, Y., & Bi, Y. (2023). Corrosion and aging of organic aviation coatings: A review. Chinese Journal of Aeronautics. 36(4). – P. 1–35. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2022.12.003>

3. Aircraft Owners and Pilots Association (AOPA). Aircraft Corrosion // Maintenance and Inspections. – https://www.aopa.org/go-fly/aircraft-and-ownership/maintenance-and-inspections/aircraft-corrosion?utm_source
4. International Civil Aviation Organization. (2022). Annex 8-Airworthiness of Aircraft: International Standards and Recommended Practices. – Montréal: ICAO, <https://ffac.ch/wp-content/uploads/2020/09/ICAO-Annex-8-Airworthiness-of-Aircraft.pdf>
5. European Union Aviation Safety Agency (EASA). (2022). Annual Safety Review Cologne: EASA.
6. Гаврилов, В.В., Чеченев, А.В. (2021). Методы неразрушающего контроля и диагностики изделий авиационной техники. – Самара: СГАУ, 2021. – 404 с.
7. Żyłka, W., Majka, A., Skała, P., Szczerba, Z., Cieniek, B., & Stefaniuk, I. (2025). Impact of Degraded Aviation Paints on the Aerodynamic Performance of Aircraft Skin. *Materials*, 18(10). 2401. <https://doi.org/10.3390/ma18102401>
8. Dale Smith (2021). Twin & Turbine. Aircraft Painting 101 // Twin & Turbine Aviation Magazine. – https://www.twinandturbine.com/aircraft-painting-101/?utm_source
9. New United Goderich Inc. (2026). Aircraft Painting Goes Beyond the Aesthetic Appeal of Planes. – https://www.newunitedgoderich.com/aircraft-painting-goes-beyond-the-aesthetic-appeal-of-planes/?utm_source
10. Ron Alexander (2020). Zenith Aircraft Builders and Flyers. Aircraft Painting: Solving the Mystery. – https://zenithair.net/aircraft-painting-solving-the-mystery/?utm_source
11. Weber, A. M., Gambao, E., & Brunete, A. (2023). A Survey on Autonomous Offline Path Generation for Robot-Assisted Spraying Applications. *Actuators*. 12(11). 403. <https://doi.org/10.3390/act12110403>
12. Wang, S., Xu, Z., Wang, Y., Tan, Z., & Zhu, D. (2024). Model-enabled robotic machining framework for repairing paint film defects. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 89, 102791. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102791>
13. Şirinterlikci A., Tiryakioğlu M., Bird M., Harris R., Kweder J. (2009). Repeatability and Accuracy of an Industrial Robot: Laboratory Experience for a Design of Experiments Course // *The Technology Interface Journal*. Vol. 9, No. 2. – P. 1–15. <http://technologyinterface.nmsu.edu/Spring09/>
14. Ефимова М.Г. (2019). Основы авиации. Часть 2. Конструкция и основные функциональные системы летательных аппаратов: учебное пособие. – Москва: МГТУ ГА, 2019.
15. Chen W., Gao J., Zhang Y. (2020). *Trajectory Planning for Spray Painting Robot Based on Point Cloud Slice Technology and Paint Deposition Model* // *Electronics*. Vol. 9, No. 6. Article 908. <https://doi.org/10.3390/electronics9060908>
16. Sheng W., Xi N., Song M., Chen Y. (2002). *CAD-Based Automated Robot Trajectory Planning for Spray Painting of Free-Form Surfaces* // *Industrial Robot*. Vol. 29. No. 5. – P. 426–433. <https://doi.org/10.1108/01439910210440237>

References

1. Boeing Commercial Airplanes. (2020). Maintenance Error Management System (MEMS) Report. – Seattle.
2. Zhang, T., Zhang, T., He, Y., Wang, Y., & Bi, Y. (2023). Corrosion and aging of organic aviation coatings: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*. 36(4). – P. 1–35. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2022.12.003>
3. Aircraft Owners and Pilots Association (AOPA). Aircraft Corrosion // Maintenance and Inspections. – https://www.aopa.org/go-fly/aircraft-and-ownership/maintenance-and-inspections/aircraft-corrosion?utm_source

4. International Civil Aviation Organization. Annex 8-Airworthiness of Aircraft: International Standards and Recommended Practices. – Montréal: ICAO, 2022. – <https://ffac.ch/wp-content/uploads/2020/09/ICAO-Annex-8-Airworthiness-of-Aircraft.pdf>
5. European Union Aviation Safety Agency (EASA). (2022). Annual Safety Review. – Cologne: EASA.
6. Gavrilov, V.V. & Chechenev, A.V. (2021). Metody nerazrushayushchego kontrolya i diagnostiki izdelij aviacionnoj tekhniki. – Samara: SGAU, – 404 s.
7. Żyłka, W., Majka, A., Skała, P., Szczerba, Z., Cieniek, B., & Stefaniuk, I. (2025). Impact of Degraded Aviation Paints on the Aerodynamic Performance of Aircraft Skin. Materials, 18(10). 2401. <https://doi.org/10.3390/ma18102401>
8. Dale Smith (2021). Twin & Turbine. Aircraft Painting 101 // Twin & Turbine Aviation Magazine. – https://www.twinandturbine.com/aircraft-painting-101/?utm_source
9. New United Gonderich Inc. (2026). Aircraft Painting Goes Beyond the Aesthetic Appeal of Planes. – https://www.newunitedgonderich.com/aircraft-painting-goes-beyond-the-aesthetic-appeal-of-planes/?utm_source Ron Alexander (2020). Zenith Aircraft Builders and Flyers. Aircraft Painting: Solving the Mystery. – https://zenithair.net/aircraft-painting-solving-the-mystery/?utm_source
10. Ron Alexander (2020). Zenith Aircraft Builders and Flyers. Aircraft Painting: Solving the Mystery. – https://zenithair.net/aircraft-painting-solving-the-mystery/?utm_source
11. Weber, A. M., Gambao, E., & Brunete, A. (2023). A Survey on Autonomous Offline Path Generation for Robot-Assisted Spraying Applications. Actuators. 12(11). 403. <https://doi.org/10.3390/act12110403>
12. Wang, S., Xu, Z., Wang, Y., Tan, Z., & Zhu, D. (2024). Model-enabled robotic machining framework for repairing paint film defects. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 89, 102791. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102791>
13. Şirinterlikci A., Tiryakioğlu M., Bird M., Harris R., Kweder J. (2009). Repeatability and Accuracy of an Industrial Robot: Laboratory Experience for a Design of Experiments Course // The Technology Interface Journal. Vol. 9, No. 2. – P. 1–15. <http://technologyinterface.nmsu.edu/Spring09/>
14. Efimova, M.G. (2019). Osnovy aviatsii. Chast' 2. Konstrukciya i osnovnye funktsional'nye sistemy letatel'nyh apparatov: uchebnoe posobie. – Moskva: MGTU GA.
15. Chen, W. & Gao, J., Zhang Y. (2020). Trajectory Planning for Spray Painting Robot Based on Point Cloud Slice Technology and Paint Deposition Model // Electronics. Vol. 9, No. 6. Article 908. <https://doi.org/10.3390/electronics9060908>
16. Sheng, W., Xi, N., Song, M. & Chen Y. (2002). CAD-Based Automated Robot Trajectory Planning for Spray Painting of Free-Form Surfaces // Industrial Robot. Vol. 29. No. 5. – P. 426–433. <https://doi.org/10.1108/01439910210440237>

ИКЕМДІ РОБОТТЫҢ КӨМЕГІМЕН АВИАЦИЯЛЫҚ ТЕХНИКА ҮЛГІЛЕРІНЕ ЛАК БОЯУ ЖАБЫНДАРЫН ЖАЗУ ЖӨНІНДЕГІ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ОПЕРАЦИЯЛАРДЫҢ ТИІМДІЛІГІН БАҒАЛАУ

***Аңдатпа.** Мақалада икемді өнеркәсіптік роботты пайдалана отырып, авиациялық техника үлгілеріне лак-бояу жабындарын жағу жөніндегі операциялардың тиімділігін арттыру мәселелері қарастырылады. Зерттеу пәні күрделі геометриялық пішіндегі авиациялық конструкциялардың бетіне лак-бояу материалдарын автоматтандырылған жағудың технологиялық процестері, сондай-ақ роботты кешендерді қолдану есебінен жабын сапасы мен бояу жұмыстарының өнімділігін арттыру әдістері болып табылады.*

Зерттеудің мақсаты – жұмыс құралының қозғалыс траекториясын оңтайландыру, бояу бетіне қажетті қашықтықты сақтау және бояу материалын бүкіл өңдеу алаңына

біркелкі бөлу арқылы авиациялық техниканы бояу операцияларының тиімділігін арттыруды қамтамасыз ететін икемді роботты басқару әдісін әзірлеу және бағалау.

Әзірленген әдіс бояу объектісінің сандық моделін, манипулятордың қозғалыс траекториясын адаптивті жоспарлау алгоритмдерін және авиациялық беттердің күрделі конфигурациясын ескеруге мүмкіндік беретін кеңістіктік орналасудың математикалық аппаратын пайдалануға негізделген. Әдіс технологиялық процестерді роботтандырылған басқару, компьютерлік модельдеу және нақты уақыт режимінде жабу параметрлерін автоматтандырылған бақылау принциптеріне негізделген.

Бояуды қолмен жағудың классикалық моделінен айырмашылығы, әзірленген әдіс бүріккіш жабдықтың жоғары орналасу дәлдігін, адам факторының әсерін азайтуды, жабын қалыңдығының тұрақтылығын арттыруды және бояу материалдарының шығынын азайтуды қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, икемді роботты қолдану технологиялық циклдің ұзақтығын қысқартуға, жұмыстың қауіпсіздігін арттыруға және жабын сапасының қажетті көрсеткіштерін сақтай отырып, авиациялық конструкциялардың жету қиын учаскелерін өңдеуді қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Алынған нәтижелер авиациялық техниканы өндіру және техникалық қызмет көрсету процестеріне роботтандырылған технологияларды енгізу перспективасын растайды.

Түйін сөздер: икемді робот, лак-бояу жабындары, авиациялық техника, роботты бояу, технологиялық процестерді автоматтандыру, қозғалыс траекториясын оңтайландыру, беттің цифрлық моделі.

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF TECHNOLOGICAL OPERATIONS FOR APPLYING PAINT COATINGS TO AIRCRAFT SAMPLES USING A FLEXIBLE ROBOT

Abstract. *The article discusses the issues of increasing the efficiency of paint and varnish coating operations on aircraft samples using a flexible industrial robot. The subject of the research is the technological processes of automated application of paint and varnish materials on the surface of aircraft structures of complex geometric shape, as well as methods for improving the quality of coating and productivity of painting work through the use of robotic complexes.*

The aim of the study is to develop and evaluate a flexible robot control method that improves the efficiency of aircraft painting operations by optimizing the trajectory of the working tool, maintaining the required distance to the surface to be painted and evenly distributing the paint and varnish material over the entire processing area.

The developed method is based on the use of a digital model of the painted object, adaptive trajectory planning algorithms for the manipulator and a mathematical apparatus for spatial positioning, which allows taking into account the complex configuration of aircraft surfaces. The method is based on the principles of robotic control of technological processes, computer modeling and automated control of coating parameters in real time.

In contrast to the classical model of manual application of paint coatings, the developed method provides higher accuracy in positioning spray equipment, reducing the influence of the human factor, increasing the stability of coating thickness and reducing the consumption of paint and varnish materials. In addition, the use of a flexible robot makes it possible to shorten the duration of the technological cycle, increase the safety of work and ensure the processing of hard-to-reach areas of aircraft structures while maintaining the required coating quality. The results obtained confirm the prospects of introducing robotic technologies into the production and maintenance processes of aviation equipment.

Keywords: *flexible robot, paint coatings, aviation equipment, robotic painting, automation of technological processes, optimization of motion trajectory, digital surface model.*

Авторлар туралы мәлімет

Кошекков Кайрат Темирбаевич	Техника ғылымдары докторы, профессор, Азаматтық авиация академиясының ғылыми жұмыстар жөніндегі проректоры, Алматы, Қазақстан. E-mail: k.koshekov@agakaz.kz
Қалекеева Марина Есенгелдіқызы	Докторант, «Тасымалдауды ұйымдастыру және логистика» кафедрасының сеньор-лекторы, Азаматтық авиация академиясы, Алматы, Қазақстан. E-mail: m.kalekeeva@agakaz.kz

Сведение об авторах

Кошекков Кайрат Темирбаевич	Доктор технических наук, профессор, проректор по научной деятельности, Академия гражданской авиации, Алматы, Казахстан. E-mail: k.koshekov@agakaz.kz
Қалекеева Марина Есенгелдіқызы	Докторант, сеньор-лектор кафедры «Организация авиационных перевозок и логистика», Академия гражданской авиации, Алматы, Казахстан. E-mail: m.kalekeeva@agakaz.kz

Information about the authors

Kayrat Koshekov	Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Scientific Activities, Civil Aviation Academy, Almaty, Kazakhstan E-mail: k.koshekov@agakaz.kz
Kalekeyeva Marina	Doctoral student, Senior-Lecturer at "Organization of Air Transportation and Logistics" department, Civil Aviation Academy, Almaty, Kazakhstan. E-mail: m.kalekeeva@agakaz.kz