

УДК 620.169.2

Применение методики ультраструйной диагностики в анализе износостойкости лакокрасочных покрытий авиационной техники*

А.Л. Галиновский, А.А. Михайлов, Д.А. Мартысюк, Д.Д. Смирнов

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Application of the technique of ultra-jet diagnostics in the analysis of the wear resistance of paint and varnish coatings of aviation equipment

A.L. Galinovsky, A.A. Mikhailov, D.A. Martysyuk, D.D. Smirnov

Bauman Moscow State Technical University

Рассмотрен вопрос применения метода оценки износостойкости лакокрасочных покрытий по методике ультраструйной дискретной диагностики, основанной на взаимодействии высокоскоростных жидкостных струй с подвижной (вращающейся) мишенью. Результатом реализации метода является оценка остаточной площади лакокрасочного покрытия на образце-мишени. Выведены соотношения, позволяющие связать результаты эксперимента с соответствующим временем эксплуатации авиационной техники в самолеточасах, на основе гражданских пассажирских самолетов.

EDN: GDDCVV, <https://elibrary/gddcvv>

Ключевые слова: лакокрасочные покрытия, ультраструйная дискретная диагностика, износостойкость лакокрасочных покрытий, авиационная техника, ресурс покрытия

The issue of applying a method for assessing the wear resistance of paint and varnish coatings by the method of ultra-jet discrete diagnostics based on the interaction of high-speed liquid jets with a movable (rotating) target is considered. The result of the implementation of the method is an assessment of the residual area of the paint coating on the target sample. The relations allowing to connect the results of the experiment with the corresponding operating time of aviation equipment in airplane hours, on the basis of civil passenger aircraft, are derived.

EDN: GDDCVV, <https://elibrary/gddcvv>

Keywords: paint coatings, ultra-jet discrete diagnostics, wear resistance of paint coatings, aviation equipment, coating resource

* Работа выполнена в рамках программы государственной поддержки центров Национальной технологической инициативы на базе образовательных организаций высшего образования и научных организаций (Центр НТИ «Цифровое материаловедение: новые материалы и вещества» при МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Безопасность и экономичность — важнейшие параметры развитой авиационной транспортной системы. От качества покрытия самолета во многом зависит его обтекаемость и распределение воздушных потоков вокруг него, что определяет уровень турбулентности и экономичный расход топлива. Поэтому выбор покрытия является важной задачей, которую можно решить с помощью методики ультраструйной дискретной диагностики (УДД).

На кафедре СМ-12 МГТУ им. Н.Э. Баумана в течение последних лет решают различные задачи, связанные с внедрением методики УДД. В частности, решались задачи оценки параметров функциональных наноструктурированных и тонкопленочных покрытий [1–3], создана инженерно-технологическая методика ультраструйной диагностики металлов и сплавов [4], а также композиционных материалов [5].

На основе накопленных данных высказано предположение, что эту методику можно использовать и для оценки параметров лакокрасочных покрытий (ЛКП) [6, 7]. По сравнению с функциональными покрытиями [8–11] ЛКП имеют более низкую износостойкость в методике УДД, вследствие чего использована вращающаяся мишень. Такой подход позволяет не прорезать ЛКП и материал образца-мишени, а оказать распределенное по площади (достаточно дозированное) воздействие ультраструйной жидкости.

В ходе проведенных на кафедре исследований была продумана методика диагностики ЛКП при воздействии на вращающуюся мишень ультраструей с абразивными частицами или без них в случае тестирования ЛКП с низкой износостойкостью.

Цель работы — показать связь разработанной методики с реальными эксплуатируемыми изделиями, в частности с авиационными, для разработки подходов к планированию эксперимента и анализа полученных данных в виде определения ресурса тестируемого покрытия в часах эксплуатации изделия.

Сбор данных. Для нахождения соотношения между нагрузками, возникающими в ходе эксперимента по УДД и реальными эксплуатационными нагрузками авиационных покрытий, проведены замеры содержания пылевых частиц в районе аэропорта. Пылевые частицы на скоростях полета самолета выступают в роли абразива, постепенно разрушающего ЛКП воздуш-

ного судна. Совершены два выезда в аэропорт Протасово 12.07.2024 и 10.10.2024 с целью измерения концентрации пылевых частиц PM 2,5 и PM10 с помощью прибора SDS011 согласно схеме эксперимента (рис. 1).

В первый день метеоусловия были следующими: температура — 28 °С; относительная влажность — 34 %; давление — 762,8 мм рт. ст.; скорость ветра $v \approx 4$ м/с; ясная погода, во второй день: температура — 8 °С, влажность — 87 %; давление — 760 мм рт. ст., скорость ветра $v \approx 4$ м/с; в воздухе чувствовалась легкая дымка, зафиксированная в начале замеров, но быстро рассеивавшаяся за время эксперимента.

Датчик вместе с ноутбуком для приема данных размещали на крыше автомобиля рядом со взлетно-посадочной полосой аэродрома (рис. 2).

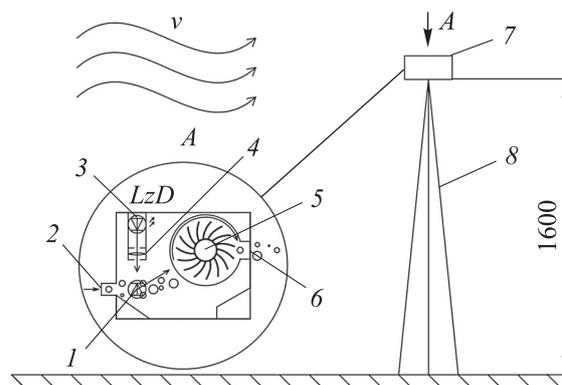


Рис. 1. Схема эксперимента по измерению концентрации пылевых частиц:

- 1 — фотодиод; 2 — входная трубка; 3 — лазерный диод;
4 — фокусирующая система; 5 — вентилятор;
6 — выходной канал; 7 — прибор SDS011; 8 — штатив;
 v — скорость ветра



Рис. 2. Схема размещения датчика с ноутбуком для приема данных с указанием расстояния до взлетно-посадочной полосы

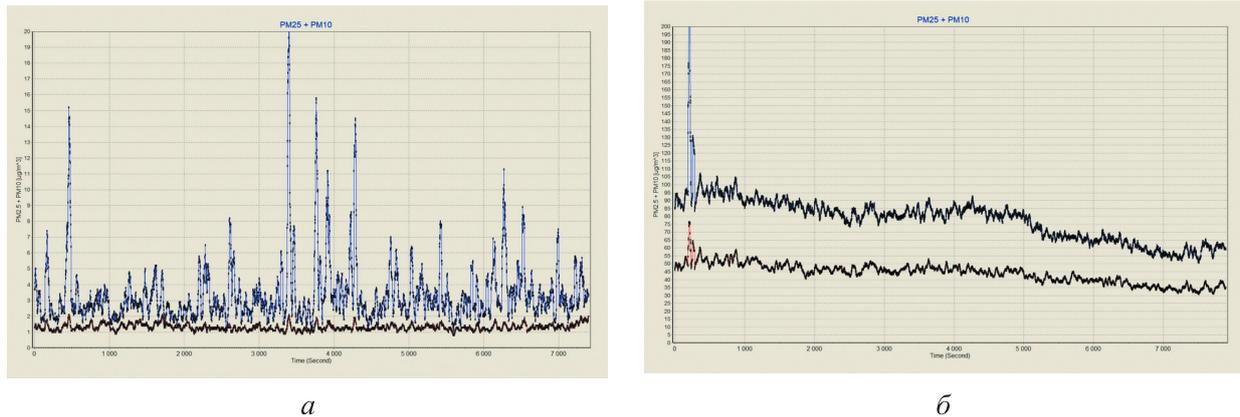


Рис. 3. Результаты экспериментального определения содержания пыли в воздухе, полученные 12.07.2024 (а) и 10.10.2024 (б)

По результатам эксперимента получены два графика (рис. 3, а и б), показывающие содержание пыли в воздухе ($\text{мкг}/\text{м}^3$).

Для дальнейшей обработки посекундные данные экспортировали в виде csv-файла.

Обработка результатов эксперимента. Определим усредненные параметры атмосферы на предмет содержания пыли по проведенным замерам, для чего найдем минимальное, максимальное и среднее арифметическое значения за два дня по отдельности и совместно. Результаты обработки данных измерений приведены в табл. 1.

Измерения проводили на уровне земли, но при анализе абразивного воздействия пылевых частиц на ЛКП самолетов также было бы интересно состояние атмосферы на высоте стандартных эшелонов.

Наиболее распространенным эшелонем современных пассажирских самолетов является высота полета $H = 34\,000$ футов (10,4 км). Это высота с шагом 300 м является базовой для пассажирских авиалайнеров и обеспечивает максимальную топливную эффективность [12–14]. Для самолетов типа бизнес-джета более типичная высота $H = 40\,000$ футов (12 км).

Для оценки изменения концентрации пыли в воздухе C с ростом высоты будем использовать следующую зависимость, основанную на эквивалентности концентрации пыли и атмосферном давлении [15]:

$$C = C_0 \left(\frac{288 - 6,5H}{288} \right)^{5,2558}, \quad (1)$$

где C_0 — концентрация пыли в воздухе на уровне земли.

Отсюда, взяв за основу обобщенные данные по концентрации пыли в воздухе, можно получить график, отражающий эту зависимость (рис. 4) в районе аэропорта Протасово.

Так как формула (1) является упрощенной, необходимо выполнить верификацию для подтверждения возможности ее использования, применив ее к данным, полученным международной командой ученых, проводивших комплексное исследование по накоплению пылевых частиц в зоне авиационного двигателя самолета за 12 лет наблюдений [16].

Результаты исследования массы поглощаемого воздуха при посадке и взлете самолета Airbus A380-841, оснащенного двигателем Rolls-Royce Trent 900, приведены на рис. 5, а и б.

Таблица 1

Результаты обработки данных измерений

Дата замеров	Содержание пыли в воздухе, $\text{мкг}/\text{м}^3$					
	Минимальное		Максимальное,		Среднее	
	PM2,5	PM10	PM2,5	PM10	PM2,5	PM10
12.07.2024	0,8	1,1	2,1	21,9	1,3	3,4
10.10.2024	31,0	50,9	76,5	215,2	44,1	78,0
Обобщенное	0,8	1,1	76,5	215,2	23,4	42,0

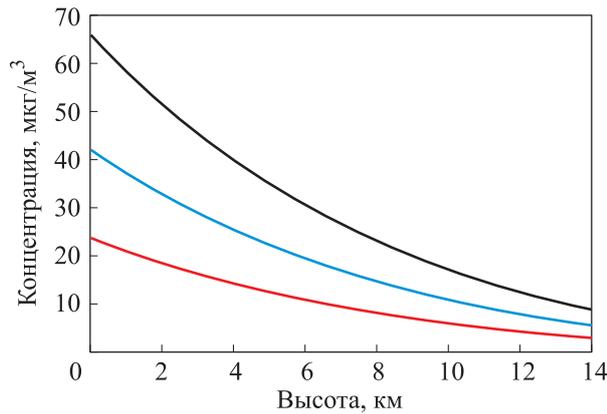


Рис. 4. Зависимости концентрации пыли от высоты полета для частиц размером PM 2,5 (—), PM10 (—) и PM 2,5 + PM10 (—)

В качестве основы возьмем данные для Международного аэропорта Дубая за июнь–август. Масса пыли в воздухе в аэропорту Дубая (175 мкг/м³) в 3–8 раз больше, чем в аэропорту Протасово. Для вычисления концентрации пыли, осаждаемой в авиационном двигателе, ученые вывели формулу

$$dose = \int \frac{k_f w_{core} c_{dust}}{\rho_{air}} dt,$$

где k_f — эмпирический коэффициент поглощения пыли двигателем, соответствующий осаждаемой в нем доле пыли (все остальные частицы пролетают через двигатель, не оседая в нем), для двигателя Rolls-Royce Trent 900 $k_f = 0,5$; w_{core} — масса воздуха, поглощаемая двигателем, кг/с; c_{dust} — концентрация пыли в воздухе, мкг/м³; ρ_{air} — плотность воздуха, кг/м³; t — время.

Проведем аппроксимацию графика взлета и тяги авиационного двигателя для удобства вы-

числения (рис. 6, а, б), принимая во внимание, что плотность воздуха меняется с изменением высоты полета (рис. 6, в) и с учетом поправки на коэффициент поглощения. В итоге получаем график поглощения пыли (рис. 6, г)

На основе данных графика установлено, что суммарно за 25 мин процедуры взлета авиационный двигатель собрал 4,28 г пыли. Согласно же статистическим данным, полученным исследователями в Дубае, двигатель Rolls-Royce Trent 900 поглощает в летние месяцы 4,3 г пыли за взлет, т. е. погрешность составляет 0,05 %. Это свидетельствует о том, что формула (1) обеспечивает достаточную степень точности расчета.

На ее основе запишем следующую формулу для расчета массы пыли, столкнувшейся с самолетом на 1 м² лобовой проекции:

$$m = \frac{v_c C(H)}{1000},$$

где v_c — скорость полета самолета; $C(H)$ — концентрация пыли на высоте полета H , мкг/м³.

Используя данные по концентрации пыли в аэропорту Протасово и взяв суммарное значение 16 мкг/м³ для эшелона 10,4 км и скорость полета самолета 940 км/ч на примере Airbus A380-841, получаем, что за один летный час на 1 м² лобовая поверхность самолета сталкивается с 15,04 г пыли.

Приняв на основе графика (см. рис. 5), что самолет наберет высоту эшелона в среднем за 20 мин с плавным ростом скорости в процессе разгона, получаем, что за стадию взлета 1 м² он столкнется с 6 г пыли (эквивалентно 18 г/ч). На основе близости этих показателей с целью упрощения методики диагностики введем до-

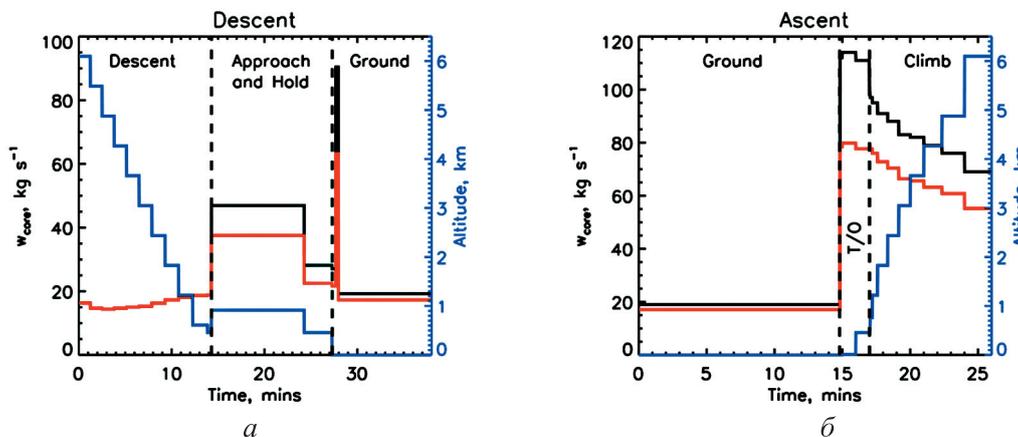


Рис. 5. Результаты исследования массы поглощаемого воздуха при посадке (а) и взлете (б) самолета Airbus A380-841

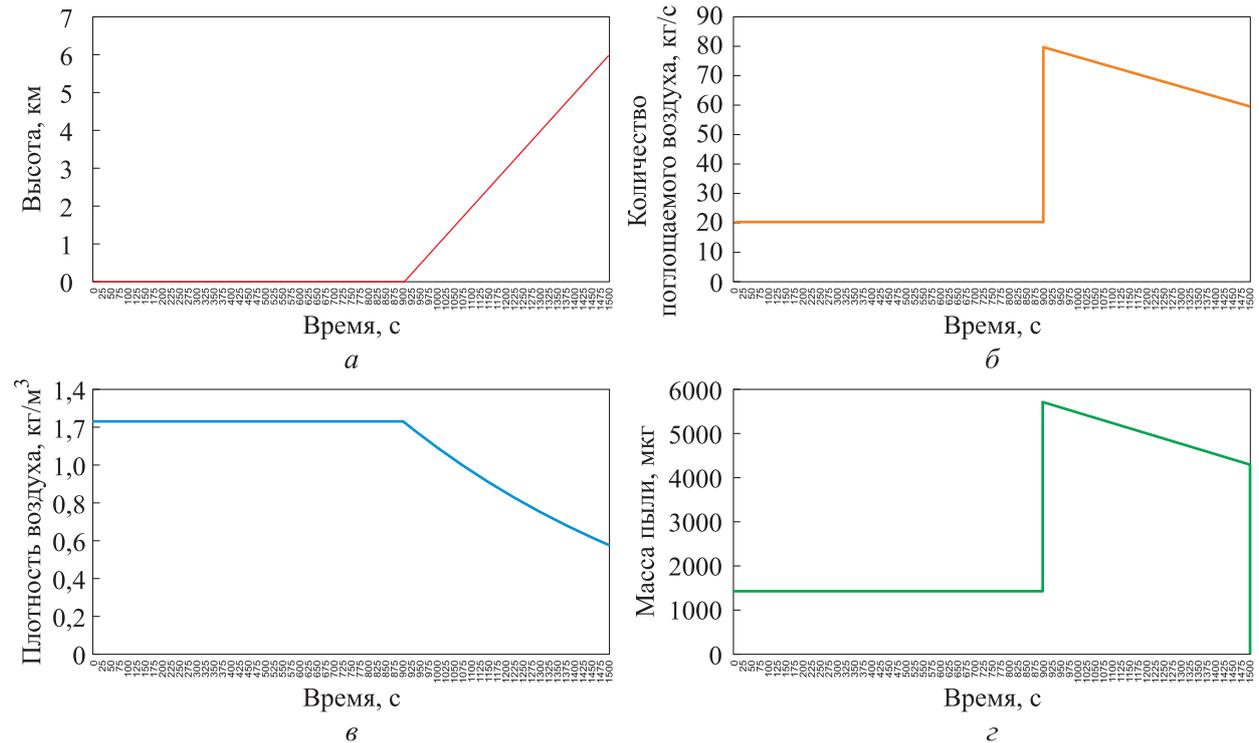


Рис. 6. Зависимости высоты полета (а), количества поглощаемого воздуха (б), плотности воздуха (в) и массы пыли m (г) от времени взлета

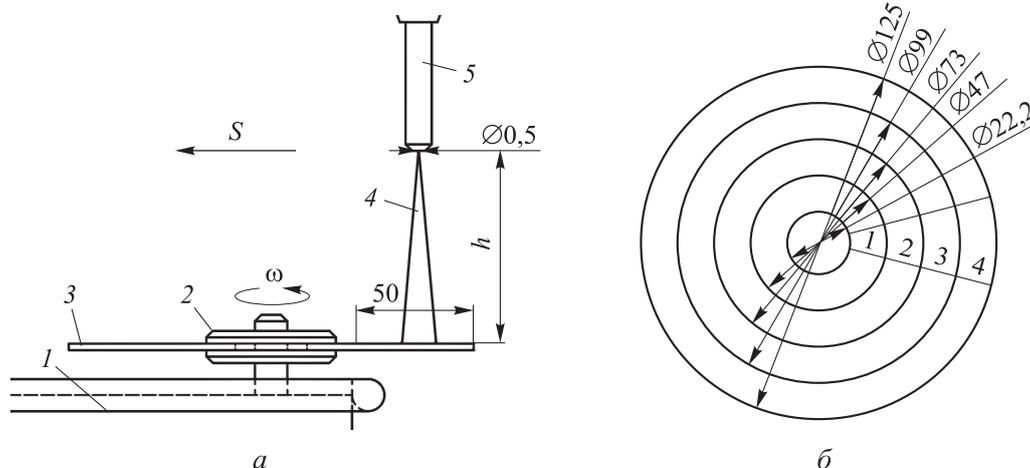


Рис. 7. Схемы эксперимента методом УДД (а) и расположения зон на диске (б): 1 — герметичный контейнер с УШМ; 2 — крепежный элемент диска; 3 — диск с тестируемым покрытием (угловая частота $\omega = 1050$ рад/с); 4 — струя жидкости или суспензия различного состава (давление 300 МПа, абразив отсутствует); 5 — режущая головка (диаметр сопла 0,5 мм); h — расстояние от среза фокусирующей трубки до поверхности образца, $h = 60$ мм

пущение, что процедуры взлета/посадки равнозначны по пылевому воздействию при пересчете в самолеточасы.

Для сравнения воздействия этой пыли и абразива в установке гидроабразивной резки принимаем принцип эквивалентности по кинетической энергии.

Энергия частиц на 1 м^2 проекции лобовой поверхности за один самолеточас

$$E = \frac{mv_c^2}{2} = \frac{v_c^3 C(H)}{25\,920\,000}.$$

Общий подход к оценке покрытий методом УДД описан в предыдущих работах [17, 18] и заключается в воздействии ультраструей чистой воды или введением абразива (рис. 7) на вращающийся диск, закрепленный на углошлифовальной машине (УШМ), в зависимости

от ожидаемой износостойкости тестируемого покрытия и требований к эксперименту. Цель вращения — распределение воздействия ультраструи на всю площадь поверхности диска.

Для обработки результатов эксперимента диск разделяют на несколько зон по мере удаления от его центра с замерами в них относительно количества пикселей для определения площади соответствующих зон покрытий. Зона 1 скрыта под крепежным элементом УШМ и в замерах не участвует. Площадь диска в целом составляла 12 271,9 мм², а площадь его второй, третьей и четвертой зоны — 2450,4; 3512,3 и 4574,2 мм² соответственно.

Зная геометрические параметры диска, подачу, скорость движения и расход абразива, можно рассчитать эквивалентное количество энергии, прикладываемой абразивом в гидро-резке, последовательно используя следующие выражения:

$$t_{\text{экс}} = \frac{l \cdot 60}{S};$$

$$E = \frac{3600 f v_{\text{абр}}^2}{60 \cdot 2} = 30 f v_{\text{абр}}^2;$$

$$E_{\text{тест}} = \frac{E \cdot 10^6}{S_{\text{тест}}},$$

где $t_{\text{экс}}$ — время эксперимента, с; l — длина дорожки с учетом крепления, мм; S — подача,

мм/мин; E — кинетическая энергия абразива в единицу времени, Дж/с; f — расход абразива, кг/мин; $v_{\text{абр}}$ — скорость движения абразива, м/с; $E_{\text{тест}}$ — кинетическая энергия абразива на единицу площади, Дж/(ч·м²); $S_{\text{тест}}$ — площадь, подвергаемая воздействию (тестируемая площадь), мм².

В качестве исходных данных при расчете эквивалентного времени эксперимента для диска в целом выступали следующие параметры: расход абразива $f = 0,0735$ кг/мин; подача $S = 2250$ мм/мин; длина дорожки с учетом крепления $l = 39$ мм; скорость истечения струи гидрорезки — 250, м/с. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Аналогично, пересчитав эквивалентное время для всех зон с учетом того, что усредненный срок эксплуатации самолета составляет 50 000 ч, определены значения энергии для диска в целом и его зон (табл. 3)

Следует отметить, что данные, указанные в табл. 3, получены для лобовой проекции поверхности самолета. В действительности почти все поверхности самолета расположены под углом к лобовой поверхности и фактическое воздействие абразивных частиц пыли будет распределено по большей площади, поэтому эквивалентное время следует умножить на отношение реальной площади поверхности $S_{\text{тест}}$ к ее проекции на лобовую плоскость $S_{\text{пр}}$.

Таблица 2

Результаты расчета эквивалентного времени эксперимента для диска в целом

Параметр	Значение
Время эксперимента, с	1,04
Кинетическая энергия абразива в единицу времени, Дж/с (Дж/ч)	38,28125 (137 812,5)
Площадь, подвергаемая воздействию, мм ²	10 536,9
Кинетическая энергия абразива на единицу площади, Дж/(ч·м ²)	13 079 034,3
Эквивалентное время эксперимента, самолеточасы	7,35

Таблица 3

Значения энергии для диска в целом и его зон

Тестируемая область	Кинетическая энергия абразива на единицу площади, Дж/(ч·м ²)	Эквивалентное время, самолеточасы	Потребное время эксперимента для полной диагностики, с
Диск в целом	13 075 189,8	7,35	6801,7
Зона 2	56 239 847,7	31,61	1581,8
Зона 3	39 237 103,0	22,05	2267,2
Зона 4	30 128 489,8	16,93	2952,7

При заданных параметрах эксперимента получаем следующие формулы для расчета эквивалентного времени:

- для диска в целом

$$t_{\text{экв.общ}} = \frac{13\,075\,189,8}{v_c^3 C(H)} \frac{1}{3600} \frac{S_{\text{тест}}}{S_{\text{пр}}} =$$

$$\frac{25\,920\,000}{94\,141\,366\,560} \frac{S_{\text{тест}}}{v_c^3 C_0 \left(\frac{288 - 6,5H}{288} \right)^{5,2558} S_{\text{пр}}};$$

- для зоны 2

$$t_{\text{экв.з2}} = \frac{404\,926\,903\,440}{v_c^3 C_0 \left(\frac{288 - 6,5H}{288} \right)^{5,2558} S_{\text{пр}}} \frac{S_{\text{тест}}}{S_{\text{пр}}};$$

- для зоны 3

$$t_{\text{экв.з3}} = \frac{282\,507\,141\,600}{v_c^3 C_0 \left(\frac{288 - 6,5H}{288} \right)^{5,2558} S_{\text{пр}}} \frac{S_{\text{тест}}}{S_{\text{пр}}};$$

- для зоны 4

$$t_{\text{экв.з4}} = \frac{216\,925\,126\,560}{v_c^3 C_0 \left(\frac{288 - 6,5H}{288} \right)^{5,2558} S_{\text{пр}}} \frac{S_{\text{тест}}}{S_{\text{пр}}}.$$

Для эквивалентного времени i -й площади тестирования можно записать

$$t_{\text{экв } i} = 216 \cdot 10^9 \frac{fv_{\text{абр}}^2}{v_c^3 C_0 \left(\frac{288 - 6,5H}{288} \right)^{5,2558} S_{\text{пр}}} \frac{S_{\text{тест } i}}{S_{\text{пр}}}.$$

Зная крейсерскую скорость полета самолета v_c , средний уровень пылезагрязнения воздуха в стране, над которой он летает у поверхности земли, C_0 , типичный эшелон H и отношение

площади тестируемой поверхности к ее проекции на лобовую плоскость $S_{\text{тест}}/S_{\text{пр}}$, по приведенным формулам можно найти, эквивалентом скольких часов является один проход сопла в ходе эксперимента для соответствующих зон диска.

Если цель найти число проходов для исследования состояния ЛКП через заданное время эксплуатации, то следует целевое время T , выраженное в часах, разделить на эквивалентное время $t_{\text{экв}}$: $n = T/t_{\text{экв}}$. Это позволяет спланировать эксперимент под текущую задачу диагностики.

Выводы

1. Разработана методика, позволяющая рассчитывать временной эквивалент для единичного цикла эксперимента УДД в самолеточасах. Это позволяет назначать конкретное время и число проходов головки в ходе эксперимента для придания покрытию необходимой степени износа для дальнейшего анализа.

2. Несмотря на то, что ЛКП гражданских самолетов являются наиболее подобными по режимам воздействия вследствие близких относительных скоростей движения пылевых частиц в атмосфере и абразива в гидрорезке, предложенную методику можно использовать для расчета эквивалентного времени эксперимента и для других объектов, взаимодействующих с подвижными частицами абразива, например в автомобильной технике. Главное — знать усредненный часовой расход и скорость движения абразивных частиц, воздействующих на объекты.

Литература

- [1] Абашин М.И., Галиновский А.Л., Проваторов А.С. и др. Моделирование процесса диагностики наноструктурированных покрытий адгезиометром и ультраструйным методом. *Вестник РГТА им. П.А. Соловьева*, 2014, № 4, с. 9–16.
- [2] Абашин М.И., Галиновский А.Л., Хафизов М.В. и др. Ультраструйная диагностика тонкопленочных покрытий. *Энерго- и ресурсосбережение — XXI век*. Орел, Госуниверситет-УНПК, 2014, с. 148–150.
- [3] Проваторов А.С., Галиновский А.Л. Ускоренное определение эксплуатационно-технологических характеристик деталей с наноструктурированными покрытиями по результатам воздействия на них высокоскоростной гидроструи. *Перспективные подходы и технологии проектирования и производства деталей и изделий аэрокосмической техники*. Москва, Диона, 2017, с. 16–18.
- [4] Абашин М.И., Барзов А.А., Галиновский А.Л. и др. Ультраструйная экспресс-диагностика материалов и изделий машиностроения. *Научно-технические ведомости СПбГПУ*, 2011, № 2, с. 141–147.

- [5] Барзов А.А., Белов В.А., Галиновский А.Л. и др. Инженерно-технологическая методика ультраструйного диагностирования сложнопрофильных изделий из композиционных материалов. *Ключевые тренды в композитах: наука и технологии*. Москва, Диона, 2018, с. 89–92.
- [6] Anicetus O., McKenna S., Flynn D. et al. Identifying paintwork deterioration for image-based monitoring of distribution towers. *IEEE PESGM*, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/PESGM48719.2022.9916591>
- [7] Bekana D., Kadirova S., Kolev Z. et al. Investigation of operational parameters of coatings for rebuilding worn out cast iron parts of self-propelled agricultural machine. *INMATEH Agric. Eng.*, 2022, vol. 62, no. 3, pp. 165–172, doi: <https://doi.org/10.35633/inmateh-62-17>
- [8] Карпучин Е.Г., Чорокаев О.Э. Анализ существующих моделей оценки свойств антифрикционных покрытий авиационной оснастки. *Известия самарского научного центра РАН*, 2018, № 4–3, с. 417–421.
- [9] Евстафьева Н.Ю., Акчурин Т.К., Стефаненко И.В. Полимерные системы гидроизоляционной и антикоррозионной защиты строительных материалов и конструкций. *Вестник ВолгГАСУ. Сер. Строительство и архитектура*, 2018, № 53, с. 43–52.
- [10] Gould P. Smart, clean surfaces. *Mater. Today*, 2003, vol. 6, no. 11, pp. 44–48, doi: [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(03\)01131-3](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(03)01131-3)
- [11] Протасова Ю.А., Шереметьева О.А., Коровченко А.В. Мониторинг огнезащитных составов, применяемых на территории красноярского края для пассивной огнезащиты деревянных конструкций. *Актуальные проблемы безопасности в техносфере*, 2021, № 4, с. 37–42.
- [12] Benvenuti L., De Santis A. A design methodology for commercial aircraft formation flight plans with minimal fuel consumption. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 2024, vol. 60, no. 4, pp. 4157–4169, doi: <https://doi.org/10.1109/TAES.2024.3375838>
- [13] Ekici S., Ayar M., Orhan I. et al. Cruise altitude patterns for minimizing fuel consumption and emission: a detailed analysis of five prominent aircraft. *Energy*, 2024, vol. 295, no. 5, art. 130989, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130989>
- [14] Atasoy V.E. Detailed analysis of aircraft fuel flow using data from flight data recorder. *Transp. Res. Rec.*, 2023, vol. 2677, no. 6, pp. 759–772, doi: <https://doi.org/10.1177/03611981221150401>
- [15] MIL-STD-810F. *Department of defense test method standard for environmental engineering considerations and laboratory tests*. USA Department of defense, 2000. 539 p.
- [16] Ryder C.L., Bézier C., Dacre H.F. et al. Aircraft engine dust ingestion at global airports. *HNESS*, 2024, vol. 24, no. 7, pp. 2263–2284, doi: <https://doi.org/10.5194/hness-24-2263-2024>
- [17] Галиновский А.Л., Михайлов А.А., Мартысюк Д.А. и др. Анализ эффективности метода оценки износостойкости лакокрасочных покрытий с применением высокоскоростной струи жидкости. *Все материалы Энциклопедический справочник*, 2023, № 8, с. 30–36.
- [18] Галиновский А.Л., Михайлов А.А., Мартысюк Д.А. и др. Анализ износостойкости трехкомпонентных лакокрасочных покрытий с использованием технологии ультраструйной диагностики. *Технология металлов*, 2024, № 10, с. 18–25.

References

- [1] Abashin M.I., Galinovskiy A.L., Provatorov A.S. et al. Modeling of the process of diagnostics of nanostructured coatings by adhesiometer and ultrashort method. *Vestnik RGATA im. P.A. Solovyeva*, 2014, no. 4, pp. 9–16. (In Russ.).
- [2] Abashin M.I., Galinovskiy A.L., Khafizov M.V. et al. [Ultrajet diagnostics of thin-film coatings]. *Energo- i resursosberezhenie — XXI vek* [Energy and Resources Saving – XXI Century]. Orel, Gosuniversitet-UNPK Publ., 2014, pp. 148–150. (In Russ.).
- [3] Provatorov A.S., Galinovskiy A.L. [Accelerated determination of operational and technological characteristics of parts with nanostructured coatings by the results of their exposure to a high-speed hydrojet]. *Perspektivnye podkhody i tekhnologii proektirovaniya i proizvodstva detaley i izdeliy aerokosmicheskoy tekhniki* [Perspective approaches and technologies of de-

- sign and production of parts and products of aerospace engineering]. Moscow, Diona Publ., 2017, pp. 16–18. (In Russ.).
- [4] Abashin M.I., Barzov A.A., Galinovskiy A.L. et al. Ultra-jet express diagnostics of materials and engineering products. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU* [St. Petersburg Polytechnic University Journal], 2011, no. 2, pp. 141–147. (In Russ.).
- [5] Barzov A.A., Belov V.A., Galinovskiy A.L. et al. Engineering and technological methods of ultra-jet diagnostics of complex-profiled products made of composite materials. *Klyuchevye trendy v kompozitakh: nauka i tekhnologii* [Key Trends in Composites: Science and Technologies]. Moscow, Diona Publ., 2018, pp. 89–92. (In Russ.).
- [6] Anicetus O., McKenna S., Flynn D. et al. Identifying paintwork deterioration for image-based monitoring of distribution towers. *IEEE PESGM*, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/PESGM48719.2022.9916591>
- [7] Bekana D., Kadirova S., Kolev Z. et al. Investigation of operational parameters of coatings for rebuilding worn out cast iron parts of self-propelled agricultural machine. *INMATEH Agric. Eng.*, 2022, vol. 62, no. 3, pp. 165–172, doi: <https://doi.org/10.35633/inmateh-62-17>
- [8] Karpukhin E.G., Chorokaev O.E. Analysis of existing models for assessing properties of anti-friction coatings of aviation equipment. *Izvestiya samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestia RAS SamSC], 2018, no. 4–3, pp. 417–421. (In Russ.).
- [9] Evstafyeva N.Yu., Akchurin T.K., Stefanenko I.V. Polymer systems of waterproofing and corrosion protection of building materials and structures. *Vestnik VolgGASU. Ser. Stroitelstvo i arkhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering], 2018, no. 53, pp. 43–52. (In Russ.).
- [10] Gould P. Smart, clean surfaces. *Mater. Today*, 2003, vol. 6, no. 11, pp. 44–48, doi: [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(03\)01131-3](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(03)01131-3)
- [11] Protasova Yu.A., Sheremetyeva O.A., Korovchenko A.V. Monitoring of fire protection compositions applied in the territory of krasnoyarsky krai for passive fire protection of wooden structures. *Aktualnye problemy bezopasnosti v tekhnosfere* [Actual Security Problems in the Technosphere], 2021, no. 4, pp. 37–42. (In Russ.).
- [12] Benvenuti L., De Santis A. A design methodology for commercial aircraft formation flight plans with minimal fuel consumption. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 2024, vol. 60, no. 4, pp. 4157–4169, doi: <https://doi.org/10.1109/TAES.2024.3375838>
- [13] Ekici S., Ayar M., Orhan I. et al. Cruise altitude patterns for minimizing fuel consumption and emission: a detailed analysis of five prominent aircraft. *Energy*, 2024, vol. 295, no. 5, art. 130989, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130989>
- [14] Atasoy V.E. Detailed analysis of aircraft fuel flow using data from flight data recorder. *Transp. Res. Rec.*, 2023, vol. 2677, no. 6, pp. 759–772, doi: <https://doi.org/10.1177/03611981221150401>
- [15] MIL-STD-810F. *Department of defense test method standard for environmental engineering considerations and laboratory tests*. USA Department of defense, 2000. 539 p.
- [16] Ryder C.L., Bézier C., Dacre H.F. et al. Aircraft engine dust ingestion at global airports. *HNESS*, 2024, vol. 24, no. 7, pp. 2263–2284, doi: <https://doi.org/10.5194/hness-24-2263-2024>
- [17] Galinovskiy A.L., Mikhaylov A.A., Martysyuk D.A. et al. Effectiveness analysis of method for assessment of wear resistance of paint coatings, using high-speed liquid jet. *Vse materialy Entsiklopedicheskiy spravochnik* [All Materials. Encyclopaedic Reference Manual], 2023, no. 8, pp. 30–36. (In Russ.).
- [18] Galinovskiy A.L., Mikhaylov A.A., Martysyuk D.A. et al. Analysis of wear resistance of three-component paint-and-lacquer coating, using ultra-jet diagnostics technology. *Tekhnologiya metallov*, 2024, no. 10, pp. 18–25. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 10.02.2025

Информация об авторах

ГАЛИНОВСКИЙ Андрей Леонидович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, Госпитальный пер., д. 10, e-mail: galcomputer@mail.ru).

МИХАЙЛОВ Александр Александрович — инженер, Центр НТИ «Цифровое материаловедение: новые материалы и вещества». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, Бригадирский пер., д. 13, e-mail: alexander_lev2002@mail.ru).

МАРТЫСЮК Дмитрий Александрович — инженер, Центр НТИ «Цифровое материаловедение: новые материалы и вещества». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, Бригадирский пер., д. 13, e-mail: neidin1264@gmail.com).

СМИРНОВ Дмитрий Дмитриевич — инженер кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, Госпитальный пер., д. 10, e-mail: dima_smi5@mail.ru).

Information about the authors

GALINOVSKY Andrei Leonidovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department, Technology of Rocket-and-Space Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, Gospitalny Lane, Bldg. 10, e-mail: galcomputer@mail.ru).

MIKHAILOV Alexander Alexandrovich — Engineer, NTI Center "Digital Materials Science: New Materials and Substances". Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, Brigadirsky Lane, Bldg. 13, e-mail: alexander_lev2002@mail.ru).

MARTYSYUK Dmitry Alexandrovich — Engineer, Technology of Rocket-and-Space Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, Brigadirsky Lane, Bldg. 13, e-mail: neidin1264@gmail.com).

SMIRNOV Dmitry Dmitrievich — Engineer, Department Technology of Rocket-and-Space Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, Gospitalny Lane, Bldg. 10, e-mail: dima_smi5@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Галиновский А.Л., Михайлов А.А., Мартысюк Д.А., Смирнов Д.Д. Применение методики ультраструйной диагностики в анализе износостойкости лакокрасочных покрытий авиационной техники. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 12, с. 62–71.

Please cite this article in English as:

Galinovsky A.L., Mikhailov A.A., Martysyuk D.A., Smirnov D.D. Application of the technique of ultra-jet diagnostics in the analysis of the wear resistance of paint and varnish coatings of aviation equipment. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 12, pp. 62–71.