

РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ДВИЖЕНИЯ ПОСТОРОННИХ ПРЕДМЕТОВ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ С ПРИЗЕМНЫМ ВИХРЕМ

© 2025

Е. В. Нескоромный

кандидат технических наук, доцент кафедры авиационных двигателей;
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского
и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж;
neskor80@yandex.ru

С. А. Бороздин

кандидат технических наук, преподаватель кафедры авиационных
двигателей;
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского
и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж;
borozdin4@yandex.ru

А. И. Евдокимов

доктор технических наук, профессор, главный специалист отдела
конструкторско-технологического перспективных проектов;
филиал акционерного общества «Объединённая двигателестроительная
корпорация» Научно-исследовательский институт технологии
и организации производства двигателей, г. Москва;
evdokimov@uecrus.com

Разработан экспериментальный способ, который позволяет получить кинематические параметры частицы, движущейся в воздушном потоке, соударяющейся при этом с поверхностью аэродрома. Описана экспериментальная установка и методика проведения эксперимента, приведены основные результаты в виде плотности и функции распределения углов падения и отражения для случая соударения частиц гранита с фрагментом аэродромной плиты. Полученные статистические характеристики являются исходными данными для моделирования процесса попадания посторонних предметов на вход в силовую установку.

*Газотурбинный двигатель; посторонний предмет; кинематические параметры;
статистические характеристики; эксперимент; числовые характеристики; случайная
величина*

Цитирование: Нескоромный Е.В., Бороздин С.А., Евдокимов А.И. Расчётно-экспериментальный способ определения начальных условий движения посторонних предметов, взаимодействующих с приземным вихрем // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2025. Т. 24, № 2. С. 170-180. DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-2-170-180

Введение

Наиболее важным элементом летательного аппарата (ЛА) является силовая установка (СУ), в том числе входящий в её состав авиационный двигатель. Одним из факторов, определяющим безотказность воздушного судна (ВС), является надёжность авиационного двигателя. Исходя из анализа статистических данных, представленных в работе [1], негативное влияние на показатели надёжности авиационной техники (АТ), в том числе газотурбинного двигателя (ГТД), оказывает засорённость аэродромов, обусловленная значительным количеством твёрдых неорганических предметов, находящихся на поверхности лётного поля. При движении ЛА по аэродрому возможен заброс посторонних предметов (ПП) на вход в СУ. Это ведёт к соударению ПП с элементами СУ и возможному их повреждению, как правило, лопастей воздушных винтов (ВВ), рабочих лопаток вентилятора или первых ступеней осевого компрессора [2] (рис. 1).

В случае повреждения, недопустимого для дальнейшей эксплуатации, ГТД под-
лежит съёму, что негативно сказывается на таком показателе надёжности, как наработка
на преждевременный съём двигателя (ПСД) [3] и, соответственно, ведёт к её снижению.

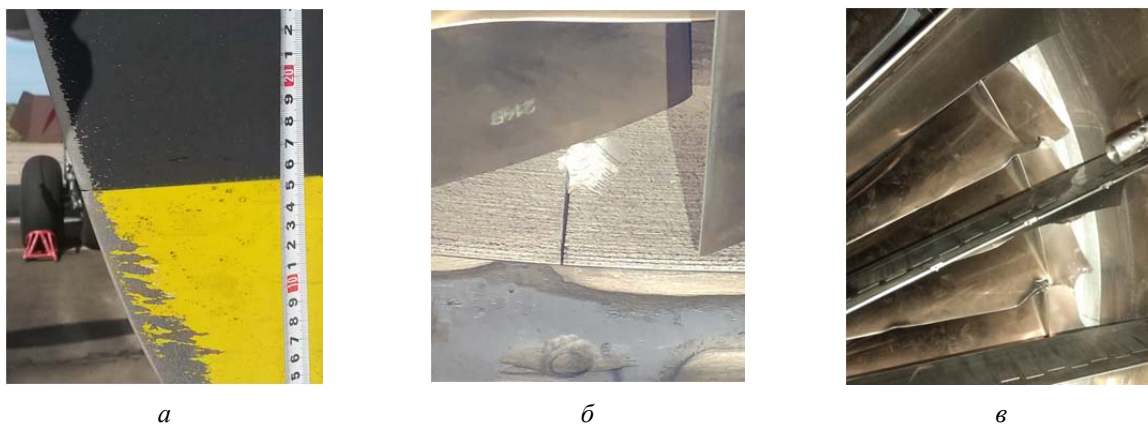


Рис. 1. Повреждение элементов силовой установки посторонними предметами:

а – повреждение лопасти воздушного винта силовой установки с турбовинтовым двигателем;
б – повреждение корпуса турбореактивного двухконтурного двигателя с форсажной камерой сгорания;
в – повреждение рабочих лопаток турбореактивного двухконтурного двигателя с форсажной камерой сгорания

Постановка задачи

Анализ работ по данной тематике [1; 2; 4; 5] позволяет выделить следующие способы заброса ПП: заброс приземным вихрем; заброс реверсивными струями на пробеге; заброс реактивными струями при взлёте группы ЛА; вылет из-под колёс шасси.

Для определения показателей надёжности элементов СУ разработаны модели и методики [1 – 6], учитывающие способ заброса ПП. В качестве начальных условий в них используются параметры компоновки ЛА, режим работы двигателей, ветровой режим, параметры аэродрома, параметры и характеристики ПП. К параметрам ПП относятся: масса ПП $m_{\text{ПП}}$, материал ПП $\rho_{\text{ПП}}$, размер ПП $d_{\text{ПП}}$, коэффициент аэродинамического сопротивления $C_{x_{\text{ПП}}}$. В работе [1] в качестве параметров, описывающих свойства ПП при соударении с преградой, представлены: коэффициент восстановления k , относительный угол отражения $\bar{\alpha}$, коэффициент «похожести» реальной частицы на частицу правильной геометрической формы k и т.д. Автор уделит значительное внимание соударению ПП с движущейся поверхностью, а именно рабочей лопаткой (РЛ) рабочего колеса (РК) компрессора низкого давления (КНД) ГТД.

В работе [7] представлены статистические характеристики аэродинамических параметров ПП, учитывающие случайный характер формы частицы аэродромной засорённости, встречающейся в эксплуатации.

Однако анализ работ по данной тематике позволяет утверждать, что движение ПП по поверхности аэродрома при взаимодействии с воздушным потоком, индуцируемым приземным вихрем или реактивными струями, недостаточно изучено.

Так как ПП, встречающийся в условиях эксплуатации, обладает неправильной формой, а аэродром имеет шероховатую поверхность, то частица при перемещении периодически встречается с препятствиями. Это ведёт к соударению ПП с препятствиями и произвольному изменению вектора его скорости.

В настоящее время отсутствуют статистические характеристики кинематических параметров ПП, движущегося в воздушном потоке при его взаимодействии с поверхностью аэродрома, а именно, математическое ожидание, плотность и функция распределения следующих параметров: угла падения ПП $\alpha_{\text{ПП}}$, угла отскока (отражения) ПП $\beta_{\text{ПП}}$, коэффициента восстановления k .

Определение кинематических параметров ПП, взаимодействующих с воздушным потоком, индуцируемым СУ, предполагает проведение натурного эксперимента. Суть эксперимента заключается в воздействии воздушного потока на ПП, находящиеся на поверхности аэродрома, и фиксации их траектории. Полученные данные позволяют определить кинематические параметры ПП, взаимодействующих с воздушным потоком, индуцируемым СУ.

Экспериментальное определение кинематических параметров посторонних предметов

Проведение натурных исследований предполагается на стенде для определения кинематических параметров ПП, взаимодействующих с воздушным потоком, индуцируемым авиационной СУ (рис. 2).

Конструкция стенда представляет собой вентилятор (рис. 2, а), предназначенный для создания невозмущённого потока, и сварной металлический стол 1 (рис. 2, б). К основанию стола методом сварного соединения прикреплены четыре ножки 2, оснащённые механизмами регулирования высоты. Внутренняя полость сварного стола заполнена бетонной смесью, армированной металлическими стержнями, размещёнными параллельно основанию стенда под углом 90° друг к другу. Поверхность бетона, имитирующая аэродромную плиту 3, выполнена в виде ромбовидных выступов, ориентированных наибольшей диагональю параллельно координатной оси OX . Для нанесения рельефа использован трафарет (рис. 2, в). Конструктивно трафарет представляет собой пластину, изготовленную методом 3D-печати, с выступами, зеркально отображающими углубления аэродромной плиты ПАГ-14.

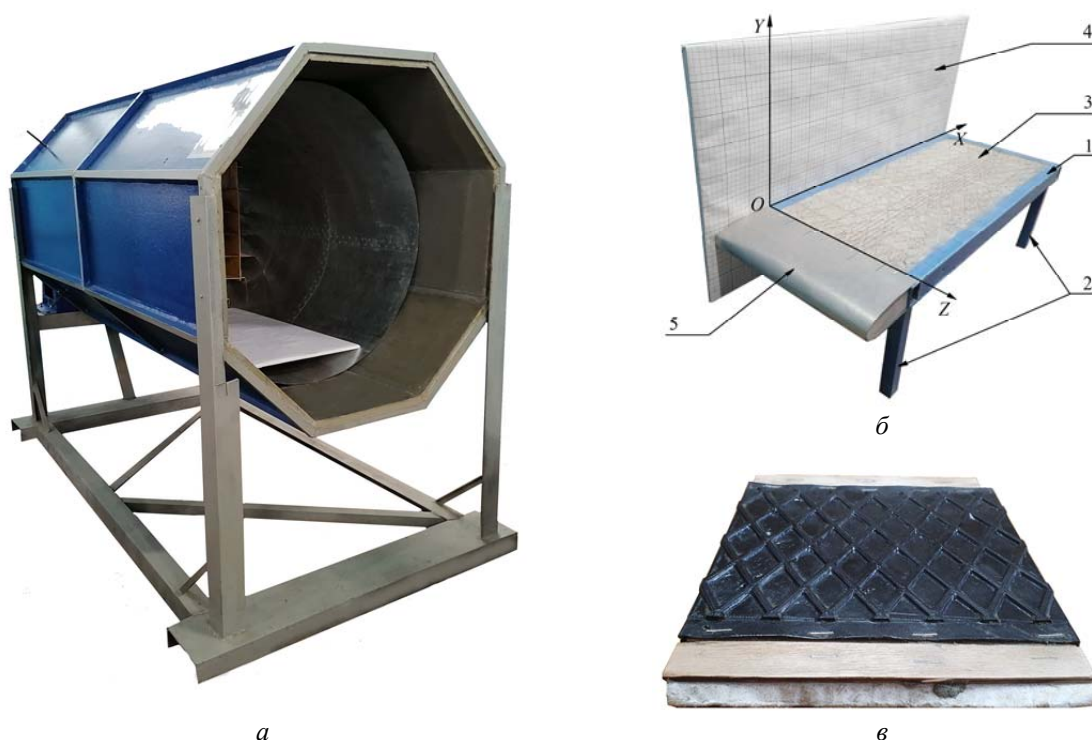


Рис. 2. Стенд для определения кинематических параметров посторонних предметов, взаимодействующих с воздушным потоком, индуцируемым авиационной силовой установкой:
а – вентилятор;
б – внешний вид стола (1 – стол сварной металлический; 2 – ножки регулируемые; 3 – имитатор поверхности аэродрома; 4 – щит с бумагой масштабной координатной; 5 – носок обтекателя);
в – трафарет для нанесения рельефа поверхности аэродромной плиты ПАГ-14

Для определения координаты ПП в плоскости XOY (рис. 2, б) перпендикулярно основанию стенда смонтирована координатная плоскость 4. Для определения координаты ПП в плоскости XOZ на поверхности, имитирующей аэродромную плиту ПАГ-14, нанесена координатная сетка. Для обеспечения плавного, безотрывного обтекания поверхности воздушным потоком к передней части основания стенда установлен обтекатель 5 оживальной формы. Геометрические параметры стенда представлены в табл. 1. Размеры стенда позволяют размещать его в рабочей области аэродинамической трубы.

Таблица 1. Параметры стенда для определения кинематических параметров посторонних предметов, взаимодействующих с воздушным потоком, индуцируемым авиационной силовой установкой

Параметр	Значение, м
Длина стенда	0,87
Ширина стенда	0,33
Высота стенда	0,55
Длина поверхности, имитирующей взлётно-посадочную полосу	0,72
Ширина поверхности, имитирующей взлётно-посадочную полосу	0,29
Длина координатной плоскости	0,87
Высота координатной плоскости	0,48

Одним из требований при проведении экспериментальных исследований является обеспечение критериев подобия. Геометрическое подобие достигается за счёт:

- имитации поверхности аэродрома (в качестве прототипа используется аэродромная плита ПАГ-14 с рисунком рельефа в масштабе 1:1);
- применении ПП, размер и материал которых соответствует частицам, встречающимся в условиях эксплуатации и используемым для изготовления аэродромных плит.

Кинематическое подобие достигается за счёт:

- обеспечения скорости невозмущённого потока, соответствующей скорости потока воздуха, индуцируемого приземным вихрем или реактивной струёй;
- обеспечения плавного, безотрывного обтекания поверхности, имитирующей аэродромную плиту ПАГ-14, за счёт применения обтекателя оживальной формы (в качестве формы обтекателя выбран носок авиационного профиля № V-16 (16%) [8]).

В качестве критерия подобия выбрано число Рейнольдса Re , которое при эксперименте составляет $Re_{\text{эксп}} \approx 2,8 \cdot 10^3$, т.е. $Re_{\text{эксп}} > Re_{\text{кр}}$. Таким образом, эксперимент проводится в автомодельной области по Re . Проведение эксперимента предполагает выполнение этапов алгоритма методики, представленного на рис. 3. В качестве исходных данных задаются: $m_{\text{ПП}}$ – масса ПП, кг; $\rho_{\text{ПП}}$ – плотность ПП, кг/м³; $N_{\text{ПП}}$ – количество ПП, подвергаемых исследованию, шт.; U_{∞} – начальная скорость невозмущённого потока, м/с. Посторонние предметы, заранее откалиброванные по массе и материалу, размещаются на поверхности стенда, имитирующей взлётно-посадочную полосу, в одну линию перпендикулярно направлению невозмущённого потока около обтекателя.

После включения устройства нагнетания происходит увеличение скорости невозмущённого потока U_{∞} до момента начала движения ПП, которое происходит, когда аэродинамическая сила $X_{a \text{ ПП}}$, действующая на частицу, преодолееет силу трения скольжения $F_{\text{тр ск}}$.

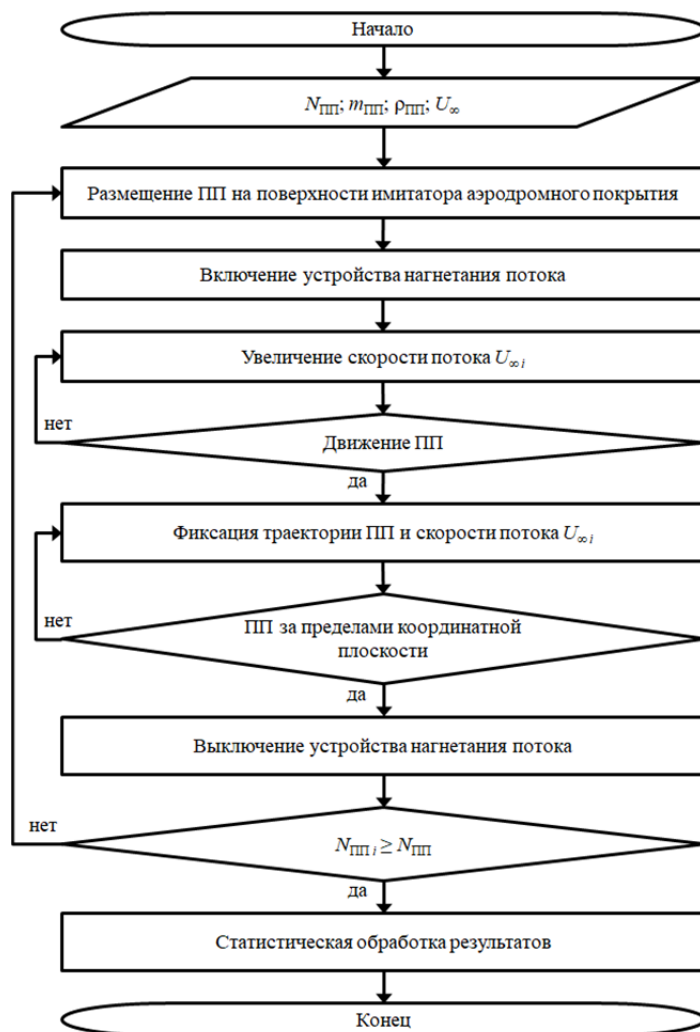


Рис. 3. Алгоритм методики определения статистических характеристик кинематических параметров посторонних предметов, взаимодействующих с воздушным потоком, индуцируемым силовой установкой

В работе проведено исследование 266 ПП из гранита массой $m_{\text{ПП}} = 7 \cdot 10^{-5}$ кг, так как частица с указанными параметрами при соударении с РЛ турбореактивного двухконтурного двигателя с форсажной камерой сгорания способна нанести повреждение, недопустимое для дальнейшей эксплуатации. Изменение скорости невозмущённого потока U_{∞} в процессе эксперимента составило от 0 м/с до 14 м/с.

Движение ПП фиксируется на высокоскоростную видеокамеру с целью дальнейшей обработки изображений и анализа траектории движения частицы.

Определение статистических характеристик кинематических параметров посторонних предметов, взаимодействующих с приземным вихрем

В результате экспериментального определения кинематических параметров ПП получено распределение угла падения $\alpha_{\text{ПП}}$ (рис. 4) и угла отражения $\beta_{\text{ПП}}$ (рис. 5) частиц гранитного щебня массой $m_{\text{ПП}} = 7 \cdot 10^{-5}$ кг при соударении с имитатором поверхности аэродрома.

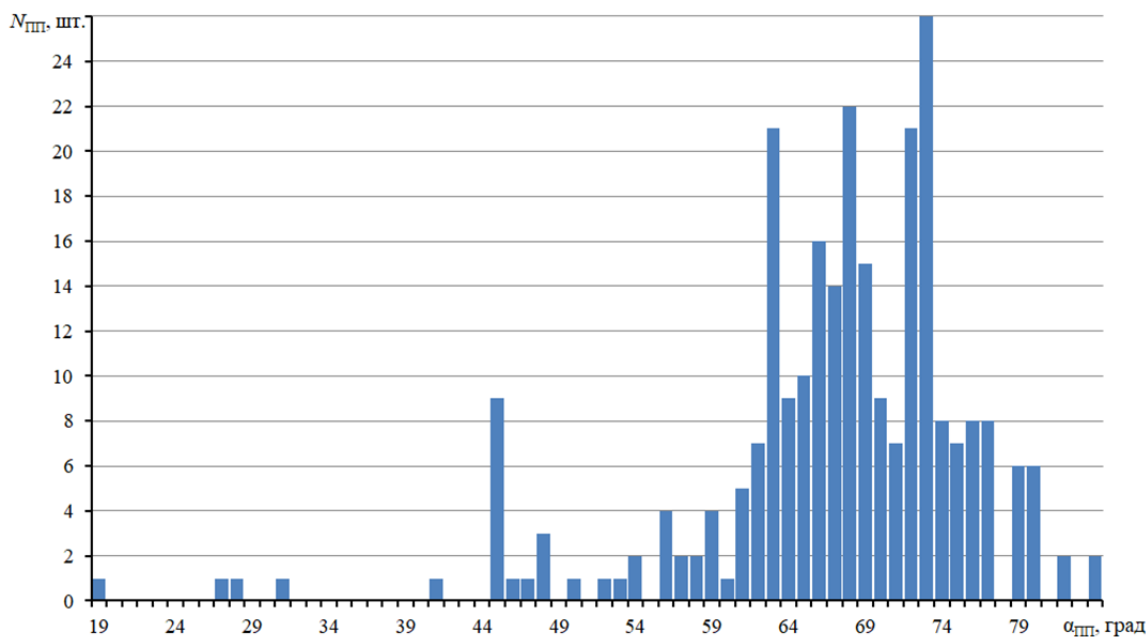


Рис. 4. Распределение угла падения $\alpha_{\text{ПП}}$
постороннего предмета из гранита массой $m_{\text{ПП}} = 7 \cdot 10^{-5}$ кг

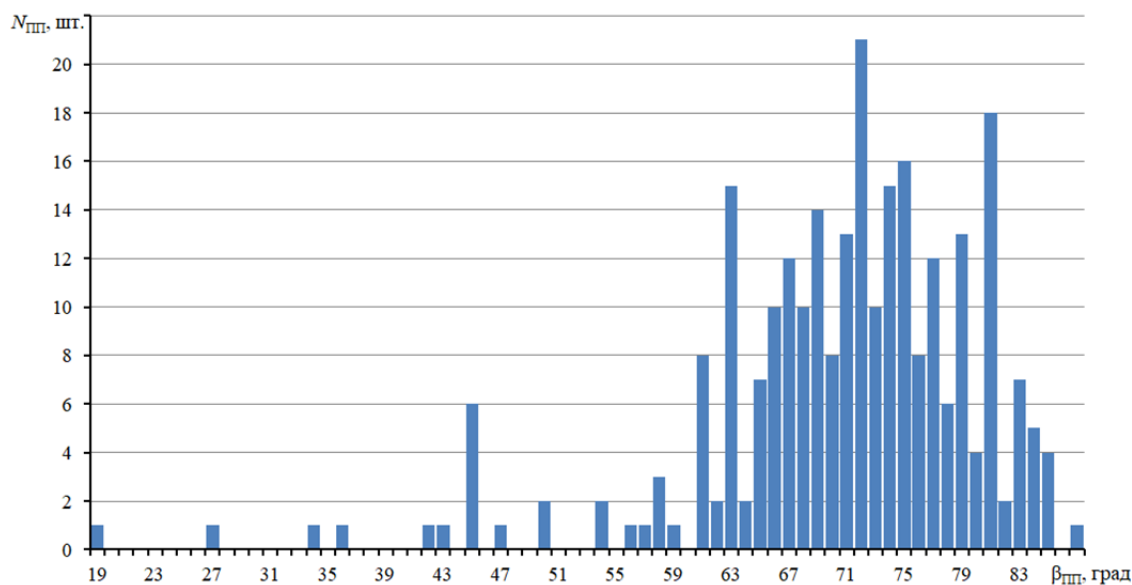


Рис. 5. Распределение угла отражения $\beta_{\text{ПП}}$
постороннего предмета из гранита массой $m_{\text{ПП}} = 7 \cdot 10^{-5}$ кг

На основе полученных экспериментальным путём статистических данных определены числовые характеристики случайной величины:

- математическое ожидание $m_{\alpha_{\text{ПП}}}$, дисперсия $D_{\alpha_{\text{ПП}}}$ и среднее квадратическое отклонение (СКО) $\sigma_{\alpha_{\text{ПП}}}$ угла падения ПП;

- математическое ожидание $m_{\beta_{\text{ПП}}}$, дисперсия $D_{\beta_{\text{ПП}}}$ и СКО $\sigma_{\beta_{\text{ПП}}}$ угла отражения ПП.

Принято допущение, что угол падения ПП $\alpha_{\text{ПП}}$ и угол отражения ПП $\beta_{\text{ПП}}$ являются дискретными случайными величинами. Для определения математического ожидания данных случайных величин использованы формулы [9]:

$$m_{\alpha_{\text{ПП}}} = \sum_{i=1}^n \alpha_{\text{ПП}i} p_i ;$$

$$m_{\beta_{\text{ПП}}} = \sum_{i=1}^n \beta_{\text{ПП}i} p_i ,$$

где $\alpha_{\text{ПП}i}$ – возможное значение угла падения ПП в i -ом эксперименте; $\beta_{\text{ПП}i}$ – возможное значение угла отражения ПП в i -ом эксперименте; p_i – вероятность появления соответствующего значения угла падения ПП в i -ом эксперименте.

Дисперсии угла падения ПП $D_{\alpha_{\text{ПП}}}$ и угла отражения ПП $D_{\beta_{\text{ПП}}}$ определяются по формулам [9]:

$$D_{\alpha_{\text{ПП}}} = \sum_{i=1}^n (\alpha_{\text{ПП}i} - m_{\alpha_{\text{ПП}}})^2 p_i ;$$

$$D_{\beta_{\text{ПП}}} = \sum_{i=1}^n (\beta_{\text{ПП}i} - m_{\beta_{\text{ПП}}})^2 p_i .$$

Для нахождения СКО угла падения и угла отражения применены следующие формулы:

$$\sigma_{\alpha_{\text{ПП}}} = \sqrt{D_{\alpha_{\text{ПП}}}} ;$$

$$\sigma_{\beta_{\text{ПП}}} = \sqrt{D_{\beta_{\text{ПП}}}} .$$

Так, при заданных условиях эксперимента математическое ожидание угла падения ПП составляет $m_{\alpha_{\text{ПП}}} = 66,8^\circ$, дисперсия угла падения ПП $D_{\alpha_{\text{ПП}}} = 88,8^{\circ 2}$, СКО угла падения ПП $\sigma_{\alpha_{\text{ПП}}} = 9,4^\circ$. Математическое ожидание угла отражения ПП при тех же условиях составляет $m_{\beta_{\text{ПП}}} = 70,5^\circ$, дисперсия угла отражения ПП $D_{\beta_{\text{ПП}}} = 98,9^{\circ 2}$, СКО угла отражения ПП $\sigma_{\beta_{\text{ПП}}} = 9,9^\circ$.

Анализ зависимостей (рис. 4, 5) позволяет сделать предположение, что распределение угла падения $\alpha_{\text{ПП}}$ и угла отражения $\beta_{\text{ПП}}$ ПП подчинено смещённому нормальному закону.

Представим статистические ряды в виде интервальных с шагом 3 градуса. Проверка полученных выборок случайной величины на соответствие нормальному закону распределения выполнена по критерию согласия Пирсона при уровне значимости $p = 0,05$. Для угла падения ПП $\alpha_{\text{ПП}}$ значение границы правосторонней критической области составляет $K_{\text{кр}} = 84,82$, а наблюдаемое значение статистики Пирсона – $K_{\text{н}} = 0$. Для угла отражения ПП $\beta_{\text{ПП}}$ значение границы правосторонней критической области составляет $K_{\text{кр}} = 31,41$, а наблюдаемое значение статистики Пирсона – $K_{\text{н}} = 0$. Следо-

вательно, предположение о том, что данные выборки случайной величины угла падения ПП $\alpha_{\text{ПП}}$ и угла отражения ПП $\beta_{\text{ПП}}$ имеют нормальное распределение, справедливо.

В результате проведения расчётно-экспериментального исследования получены плотности распределения углов падения $f(\alpha_{\text{ПП}})$ и отражения $f(\beta_{\text{ПП}})$ (рис. 6, а), а также функции распределения углов падения $F(\alpha_{\text{ПП}})$ и отражения $F(\beta_{\text{ПП}})$ (рис. 6, б) ПП из гранита массой для $m_{\text{ПП}} = 7 \cdot 10^{-5}$ кг.

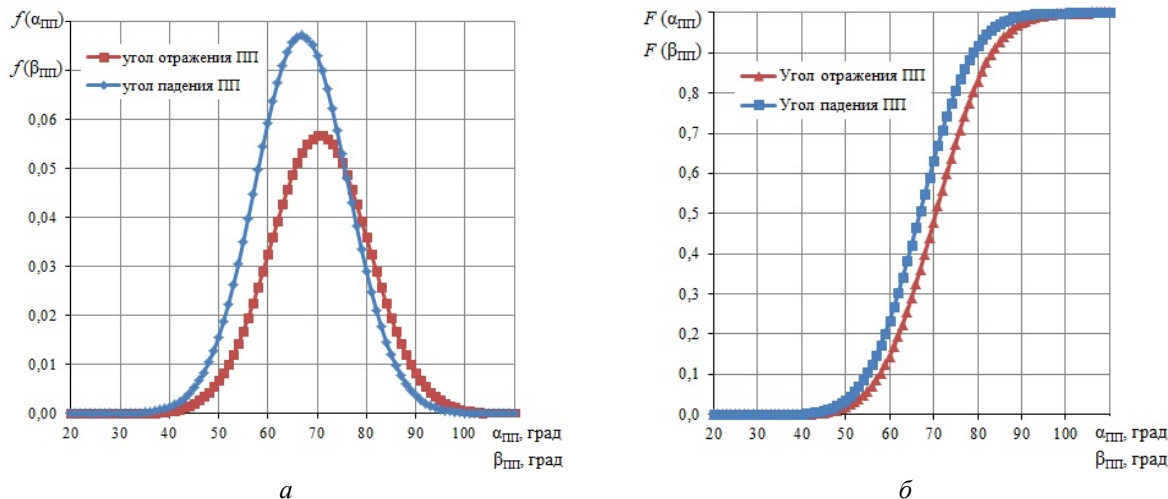


Рис. 6. Статистические характеристики углов падения $\alpha_{\text{ПП}}$ и отражения $\beta_{\text{ПП}}$ постороннего предмета, движущегося в воздушном потоке при его взаимодействии с поверхностью аэродрома:
а – плотность распределения; б – функция распределения

Зависимости плотности $f(\alpha_{\text{ПП}})$ (рис. 6, а) распределения угла падения ПП и функции $F(\alpha_{\text{ПП}})$ (рис. 6, б) распределения угла падения ПП описываются выражениями:

$$f(\alpha_{\text{ПП}}) = 0,29 \frac{1}{9,42\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(\alpha_{\text{ПП}}+66,83)^2}{177,5}\right)}; \quad (1)$$

$$F(\alpha_{\text{ПП}}) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\alpha_{\text{ПП}} - 66,8}{13,3} \right) \right]. \quad (2)$$

Зависимости плотности $f(\beta_{\text{ПП}})$ (рис. 6, а) распределения угла отражения ПП и функции $F(\beta_{\text{ПП}})$ (рис. 6, б) распределения угла отражения ПП описываются выражениями:

$$f(\beta_{\text{ПП}}) = 0,225 \frac{1}{9,94\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(\beta_{\text{ПП}}+70,5)^2}{197,6}\right)}; \quad (3)$$

$$F(\beta_{\text{ПП}}) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\beta_{\text{ПП}} - 70,5}{14} \right) \right]. \quad (4)$$

Полученные значения математического ожидания угла падения $m_{\alpha_{\text{пп}}}$ и угла отражения $m_{\beta_{\text{пп}}}$ ПП позволяют определить коэффициент восстановления k по формуле [10]:

$$k = \frac{\text{tg } \alpha_{\text{пп}}}{\text{tg } \beta_{\text{пп}}}.$$

Соударение ПП с имитатором поверхности аэродрома является косым ударом о неподвижную преграду. При этом величину коэффициента восстановления k можно считать зависящей только от материала соударяющихся тел [10]. Таким образом, для ПП из гранита, взаимодействующих с бетонным покрытием аэродрома, коэффициент восстановления составляет $k \approx 0,83$. Так как $k < 1$, то удар является упругим, следовательно, часть механической энергии ПП уходит на нагревание и сообщение частице остаточных деформаций, выражающихся в её постепенном разрушении.

Заключение

Проведён анализ работ, направленных на определение показателей надёжности авиационных силовых установок при воздействии посторонних предметов, находящихся на поверхности аэродрома. Выделены основные способы заброса постороннего предмета на вход в силовую установку. Определены параметры компоновки летательного аппарата, силовой установки, ветрового режима, засорённости аэродрома, а также частиц аэродромной засорённости, необходимых в качестве начальных условий при моделировании движения постороннего предмета, взаимодействующего с приземным вихрем.

Выявлены недостатки моделей определения показателей надёжности силовой установки летательного аппарата, которые заключаются в отсутствии достоверных данных о начальных условиях движения постороннего предмета в воздушном потоке, индуцируемом работающей силовой установкой, а именно статистические характеристики кинематических параметров частицы, движущейся в воздушном потоке при её взаимодействии с поверхностью аэродрома.

Для определения статистических характеристик кинематических параметров посторонних предметов, взаимодействующих с потоком, индуцируемым силовой установкой самолёта, предложен расчётно-экспериментальный способ, который заключается во введении частицы аэродромной засорённости в воздушный поток и фиксации её траектории при движении в потоке и при соударении с поверхностью аэродрома. Полученные результаты в виде координат частиц являются исходными данными для дальнейшего статистического анализа и определения статистических характеристик.

Представлены результаты апробации предложенного способа. Получены значения числовых характеристик случайной величины угла падения и угла отражения постороннего предмета. На основании статистических данных определены плотность и функция распределения угла падения и угла отражения постороннего предмета. Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод, что случайная величина подчинена смещённому нормальному закону распределения. Получен коэффициент восстановления, который свидетельствует, что соударение постороннего предмета с бетонным покрытием аэродрома является косым упругим ударом.

Библиографический список

1. Евдокимов А.И. Обоснование выбора эффективных систем защиты от повреждений посторонними предметами двигателей самолётов военного назначения. Дис. ... док. техн. наук. Москва, 1993. 520 с.
2. Комов А.А. Теоретические основы и технические решения для защиты авиационных двигателей от попадания твёрдых посторонних предметов с поверхности аэродрома. Дис. ... док. техн. наук. Москва, 2005. 400 с.
3. МО РФ. Федеральные авиационные правила инженерно-авиационного обеспечения государственной авиации (ФАП ИАО). Книга третья. <https://shop-5ocean.ru/upload/iblock/035/yxalinev7trrgfu2inrajft3v2dxhcft.pdf>
4. Киренчев А.Г. Совершенствование методов организации технологических процессов обслуживания воздушных судов в ожидаемых условиях эксплуатации. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2020. 186 с.
5. Горский А.Н., Евдокимов А.И., Максимов Ю.Е. Моделирование движения посторонних предметов с поверхности аэродрома // Вестник академии наук и воздухоплавания. 2001. № 1. С. 15-17.
6. Давыдов А.А., Евдокимов А.И. Определение параметров защищённости двухдвигательных силовых установок самолётов от вихревого засасывания посторонних предметов // Сб. научно-методических материалов по конструкции и системам управления ГТД. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1995. С. 76-84.
7. Бороздин С.А., Нескоромный Е.В. Способ расчётно-экспериментального определения статистических характеристик коэффициента лобового сопротивления посторонних предметов // Вестник УГАТУ. 2023. Т. 27, № 4 (102). С. 3-12. DOI: 10.54708/19926502_2023_2741023
8. Справочник Авиационных Профилей. http://kipla.kai.ru/liter/Spravochnik_avia_profiley.pdf
9. Васильев В.Н., Житомирский Г.И. Вероятностные основы боевых авиационных комплексов. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1976. 164 с.
10. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики: учеб. для втузов. М.: Высшая школа, 2010. 416 с.

A COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL METHOD FOR DETERMINING THE INITIAL CONDITIONS OF MOTION OF FOREIGN OBJECTS INTERACTING WITH A SURFACE VORTEX

- | | |
|-------------------------|--|
| E. V. Neskromnyy | Candidate of Science (Engineering), Associate Professor
of the Department of Aircraft Engines;
Military Educational and Scientific Center of the Air Force Academy
named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin,
Voronezh, Russian Federation;
neskor80@yandex.ru |
| S. A. Borozdin | Candidate of Science (Engineering), Lecturer of the Department
of Aircraft Engines;
Military Educational and Scientific Center of the Air Force Academy
named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin,
Voronezh, Russian Federation;
borozdin4@yandex.ru |
| A. I. Yevdokimov | Doctor of Science (Engineering), Professor, Chief Specialist
of the Department of Design and Technological Advanced Projects;
Branch of the Joint-Stock Company United Engine Corporation Scientific
Research Institute of Technology and Organization of Engine Production,
Moscow, Russian Federation;
evdokimov@uecrus.com |

An experimental method has been developed that makes it possible to obtain the kinematic parameters of a particle moving in an air stream, while colliding with the surface of an airfield. The experimental setup and methodology of the experiment are described, and the main results are presented in the form of the density and distribution function of the angles of incidence and reflection for the case of collision of granite particles with a fragment of an airfield slab. The obtained statistical characteristics are the initial data for modeling the process of ingress of foreign objects into the entrance to the power plant.

Gas turbine engine; foreign object; kinematic parameters; statistical characteristics; experiment; numerical characteristics; random variable

Citation: Neskromnyy E.V., Borozdin S.A., Yevdokimov A.I. A computational and experimental method for determining the initial conditions of motion of foreign objects interacting with a surface vortex. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2025. V. 24, no. 2. P. 170-180.
DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-2-170-180

References

1. Evdokimov A.I. *Obosnovanie vybora effektivnykh sistem zashchity ot povrezhdeniy postoronnimi predmetami dvigateley samoletov voennogo naznacheniya. Dis. ... dok. tekhn. nauk* [Justification of the choice of effective protection systems against damage by foreign objects to military aircraft engines. Thesis for a Doctor's Degree in Engineering Science]. Moscow, 1993. 520 p.
2. Komov A.A. *Teoreticheskie osnovy i tekhnicheskie resheniya dlya zashchity aviatsionnykh dvigateley ot popadaniya tverdykh postoronnikh predmetov s poverkhnosti aerodroma. Dis. ... dok. tekhn. nauk* [Theoretical foundations and engineering solutions for the protection of aircraft engines from the ingress of solid foreign objects from the surface of the airfield. Thesis for a Doctor's Degree in Engineering Science]. Moscow, 2005. 400 p.
3. MO RF. *Federal'nye aviatsionnye pravila inzhenerno-aviatsionnogo obespecheniya gosudarstvennoy aviatsii (FAP IAO). Kniga tret'ya* [Federal aviation regulations for engineering and aviation support of state aviation. Book three]. Available at: <https://shop-5ocean.ru/upload/iblock/035/yxalinev7trrgfu2inrajft3v2dxhcft.pdf>
4. Kirenchev A.G. *Sovershenstvovanie metodov organizatsii tekhnologicheskikh protsessov obsluzhivaniya vozdukhnykh sudov v ozhidaemykh usloviyakh ekspluatatsii* [Improvement of methods of organization of technological processes of aircraft maintenance in anticipated operating conditions. Thesis for a Candidate Degree in Science (Engineering)]. Moscow, 2020. 186 p.
5. Gorskiy A.N., Evdokimov A.I., Maksimov Yu.E. Simulation of the movement of foreign objects from the surface of the airfield. *Vestnik Akademii Nauk i Vozdukhoplavaniya*. 2001. No. 1. P. 15-17. (In Russ.)
6. Davydov A.A., Evdokimov A.I. *Opreделение parametrov zashchishchennosti dvukhdvigatel'nykh silovykh ustanovok samoletov ot vikhrevogo zasasyvaniya postoronnikh predmetov. Sb. Nauchno-Metodicheskikh Materialov po Konstruktsii i Sistemam Upravleniya GTD*. Moscow: Zhukovsky Air Force Engineering Academy Publ., 1995. P. 76-84. (In Russ.)
7. Borozdin S.A., Neskromnyi E.V. Method to determine computationally and experimentally the statistical characteristics of the drag coefficient of foreign objects. *Vestnik UGATU*. 2023. V. 27, no. 4 (102). P. 3-12. (In Russ.). DOI: 10.54708/19926502_2023_2741023
8. *Spravochnik Aviatsionnykh Profiley* [Handbook of Aviation Profiles]. Available at: http://kipla.kai.ru/liter/Spravochnik_avia_profiley.pdf
9. Vasil'ev V.N., Zhitomirskiy G.I. *Veroyatnostnye osnovy boevykh aviatsionnykh kompleksov* [Probabilistic foundations of combat aircraft complexes]. Moscow: Zhukovsky Air Force Engineering Academy Publ., 1976. 164 p.
10. Targ S.M. *Kratkiy kurs teoreticheskoy mekhaniki: ucheb. dlya vtuzov* [A short course in theoretical mechanics. Textbook for technological higher education institutions]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 2010. 416 p.