

Формирование характеристик отбойно-инерционной защиты воздухозаборника двигателя

Авиационный научно-технический комплекс им. О.К. Антонова

Исследованы ударно-инерционные взаимодействия посторонних предметов с гофрированной сеткой, установленной в воздухозаборнике газотурбинного двигателя. Сформулированы граничные условия попадания посторонних предметов в улавливатель.

Ключевые слова: упругий удар, сносящий поток, ПП – посторонний предмет, улавливатель, воздухозаборник.

Угроза повреждения двигателей различных самолётов от попадания посторонних предметов, попавших через воздухозаборник, сохраняется во всём мире, не смотря на предпринимаемые организационные и технические меры. Так по данным Национальной аэрокосмической корпорации по предотвращению повреждений ПП двигателей (США), в 2001 г. затраты на ремонт двигателей составили около \$4 млрд [1].

Перемещаясь с высокой скоростью по воздухозаборному каналу и далее попадая в компрессорную часть газотурбинного двигателя, ПП приводят к эрозионному износу или разрушению лопаток компрессора в зависимости от их размера. Поэтому обеспечение эффективной защиты, исключающей захват и попадание ПП на вход в двигатель является проблемой актуальной.

Одним из решений этой проблемы может быть установка защиты на воздухозаборник двигателя в виде сетки. Такие устройства нашли практическое применение на лёгких самолётах, истребителях, самолётах специального назначения.

Недостатками установки сеток на входе в двигатель являются значительные потери скоростного напора и низкие эксплуатационные качества (слабая прочность, забиваемость ячеек ПП и др.).

Избежать указанных недостатков можно, придав защитной сетке волнообразный, гофрированный вид с улавливателями ПП, расположенными у основания гофров [2] (рис 1).

Наличие гофров увеличивает проходную площадь сетки в несколько раз, что обеспечивает снижение скорости забираемого воздуха и уменьшение потерь скоростного напора на входе в двигатель, при этом гофры являются рёбрами жёсткости, которые придают необходимую прочность сетке.

Расположением граней гофров под острым углом к направлению движения ПП достигается эффект отражения от сетки более мелких ПП, чем проходное сечение ячейки сетки, и тем самым исключается забивание сетки ПП.

Отсутствие исследований, касающихся взаимодействия ПП с гранями гофра сетки, упругого удара с последующим пролётом в потоке воздуха, забираемом в воздухозаборник двигателя, не позволяет судить о направленности потока ПП и их попадании в улавливатели, что определяет защищённость воздухозаборника.

Выполнена экспериментальная оценка влияния защитной плоской сетки на газодинамические характеристики воздухозаборника и приведены результаты эксплуатационной технологичности сетки, но не исследовано взаимодействие ПП с сеткой и не выявлено влияние параметров установки сетки на характеристики защищённости воздухозаборника.

В работе [3] исследовано взаимодействие ПП с сетками, установленными под разными углами к направлению движения ПП, и определена экспериментально эффективность защиты с учётом потерь скоростного напора. Кроме того, изучено не исследовано ударно-инерционное взаимодействие ПП с гофрированной сеткой при влиянии на ПП внешних факторов. Значительное число теоретических работ посвящено исследованию движения ПП в канале воздухозаборника. Так, в работе [4] рассмотрена упрощённая модель движения частиц без учёта упругого соударения частиц.

В реальном процессе при соударении частиц с ограничивающей поверхностью тангенциальная составляющая послеударной скорости является функцией, характеризующей свойства поверхностей соударяющихся тел.

Поэтому цель исследования – определение взаимодействия ПП с гофрированной сеткой и определение граничных параметров, влияющих на характеристики улавливания ПП при послеударном пролёте в сносящем потоке.

Объект исследования представляет собой гофрированную сетку с желобообразными улавливателями ПП, установленную на воздухозаборном устройстве за воздушным винтом турбовинтового двигателя.

Предметом исследования является процесс ударно-инерционного взаимодействия с аэродинамическим улавливателем ПП гофрированной сеткой.

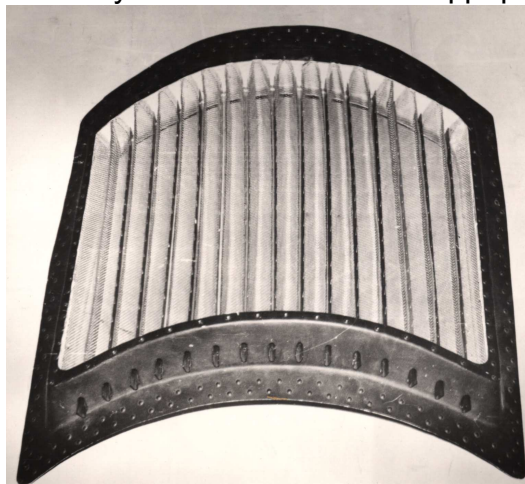


Рис. 1. Общий вид защитной сетки

Взаимодействие ПП с гофрированной сеткой можно разделить на следующие этапы:

1. Подлёт к грани сетки в условиях, сформированных исходными характеристиками силовой установки.
2. Упругое соударение с поверхностью гофра и рикошетный отлёт после соударения.
3. Пролёт в сносящем потоке воздуха до улавливателя.

Рассмотрим каждый этап.

1. Подлёт ПП к сетке

Параметры ПП на подлёте к сетке зависят от внешних факторов. Наиболее характерным и представляющим интерес является случай работы на месте турбовинтового двигателя на максимальном режиме. При этом следует определить такие геометрические и расчётные параметры:

H – высота расположения воздухозаборника;

D_B – диаметр воздушного винта;

P_B – тяга воздушного винта;

G – расход воздуха через воздушный винт;

$V_{\Gamma_{\max}}$ – скорость, индуцируемая воздушным винтом;

$d_{\Gamma_{\max}}$ – максимальный диаметр ПП, поднятого индуцируемым потоком;

U_B – окружная скорость лопасти воздушного винта;

F_{BX} – площадь воздухозаборника;

G_{BX} – расход воздуха через воздухозаборник.

Согласно закону сохранения массы секундный расход воздуха перед воздухозаборником и в воздухозаборнике одинакова:

$$G_{BX} = F_H \cdot V \cdot \gamma_H = F_{BX} \cdot V_{BX} \cdot \gamma_{BX},$$

$$F_{BX} = \frac{G_{BX}}{V_{BX} \cdot \gamma_{BX}} = \frac{G_{BЛ}}{V_{BЛ} \cdot \rho \cdot g}.$$

Для воздухозаборника, находящегося в пограничном слое и затенённого защитной сеткой, площадь проходного сечения должна быть большей. Для толщины пограничного слоя потока, который движется вдоль твёрдой стенки с дозвуковой скоростью, справедливо эмпирическое уравнение

$$y = 4.57 \cdot c_f \cdot L,$$

где L – расстояние от винта до входа в воздухозаборник,

c_f – коэффициент трения (принимается равным 0,0024 с учётом погранслоя и защитной сетки)

$$F_{BX} = 4.57 \cdot c_f \cdot L \cdot B + F_S$$

где B – ширина воздухозаборника,

F_S – живое сечение сетки

Задаваясь F_S , можно найти оптимальное V_{BX} , при котором будут меньшие потери скоростного напора. Максимально возможная скорость подлёта ПП к сетке в первом приближении можно принять равной окружной скорости лопасти воздушного винта в плоскости расположения защитной сетки.

$$U_B = \pi \cdot n \cdot D.$$

Скорость V потока за винтом и увлекаемых им ПП можно определить, зная тягу винта

$$P_B = \frac{1}{2} \cdot (V^2 - V_0^2) \cdot F \cdot \rho,$$

или по мощности

$$V = 14.5 \cdot \sqrt[3]{\frac{N}{D_B^2}}.$$

Максимальную индуцируемую воздушным винтом скорость на поверхности аэродрома и диаметр ПП определяем по [5]

$$V_{\Gamma\max} = \frac{2.172 \cdot D_B \cdot \sqrt{P_B}}{20.1 \cdot H^2}, \quad d_r = 0.633 \cdot \frac{\frac{P}{D_B^2}}{\left(\frac{H}{D_B^2}\right)^4}.$$

2. Упругое соударение ПП с сеткой

При рассмотрении соударения ПП о сетку принимаем для исследования диапазон скоростей движения, равны окружной скорости лопасти и скорости потока за воздушным винтом (30...90 м/с). Для упругого удара согласно [6] гипотезе Рауса существует связь между величинами нормального и касательного импульсов. Эту связь определяет динамический коэффициент трения f , характеризующий свойства поверхности соударяемых тел [7]

$$f = \frac{V_0 \cdot \cos(\alpha) - V_N \cdot \cos(\alpha_N)}{V_0 \cdot \sin(\alpha) + V_N \cdot \cos(\alpha_N)},$$

где V_0 и α_0 – скорость и угол до соударения, V_N и α_N после соударения.

f определён итерационным методом и равен 0,03, а коэффициент восстановления скорости e , учитывающий поглощение энергии самим материалом, определён экспериментально и равен 0,5.

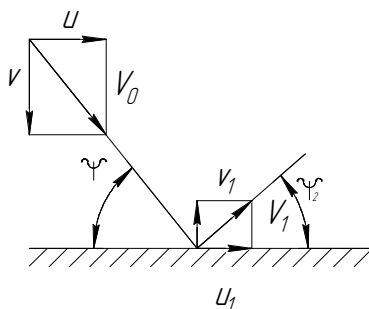


Рис. 2. Схема удара

Угол отражения находим из геометрии (Рис. 2) по формуле

$$\psi_2 = \arctg \left(\frac{V_0 \cdot \sin(\psi) \cdot e}{V_0 \cdot \cos \psi (1 - f)} \right).$$

Таким образом, вертикальная и горизонтальная составляющие скорости после удара уменьшаются соответственно пропорционально величинам e и f .

Определим теперь, какого диаметра частицы ПП могут пройти через сетку. Как видно из рис. 3, через ячейку сетки размером 1,6 мм в зависимости от увеличения угла установки сетки относительно горизонта размеры проходящих через сетку ПП тоже увеличиваются, так как увеличивается величина раствора сетки Рис. .

$$x(\alpha) = a \cdot \sin(\alpha) - d.$$

До определённого угла, который составляет $14,61^\circ$, ПП не проходят вообще. Конструктивно сетку устанавливают под углом 15° . При этом размер проходящей частицы составляет всего лишь 0,044 мм.

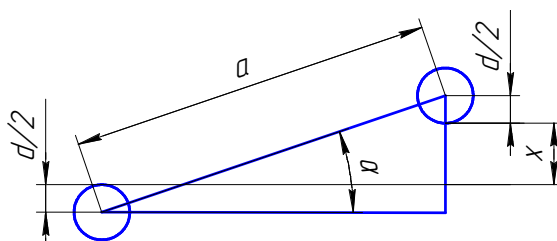


Рис. 3. Схема установки сетки

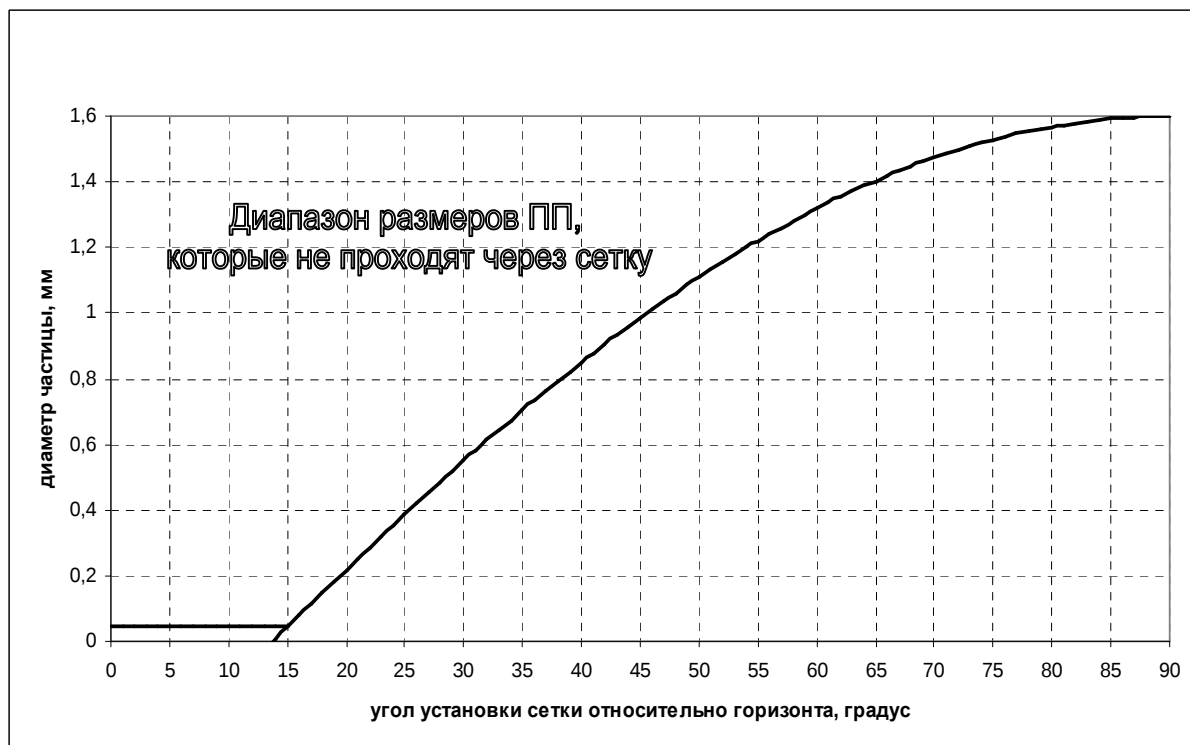


Рис. 4. Вероятностная оценка размеров ПП, которые не проходят через сетку

Частицы большего диаметра при ударе о сетку будут отлетать, попадая в улавливатель ПП, или проскакивать в ячейку под меньшим углом α .

Был проведен геометрический расчёт, целью которого было определение углов соударения, углов отражения и предварительное направление отлёта ПП в зависимости от следующих параметров:

- α – угол установки сетки относительно горизонта,
- ϕ – угол раствора сетки относительно вертикали,
- ξ – угол соударения ПП по курсу,
- V – вектор доударной скорости.

В результате удалось найти угол отражения ψ_2 и скорость v_2 , опираясь на гипотезу Рауса [6].

Для вероятностной оценки работоспособности защитной сетки геометрическая задача была решена в проекции на плоскость, перпендикулярную желобу ловушки (рис. 5).

Определена зона улавливания ПП в зависимости от точки соударения и угла отражения (рис. 5). На поверхности сетки длиной L можно найти точку соударения (точка А) на расстоянии от желоба e , ниже которой все ударившиеся ПП на-

правляются в ловушку. Эффективность улавливания можно оценить величиной E , которая показывает, сколько процентов площади сетки отразит ПП и направит его в улавливатель.

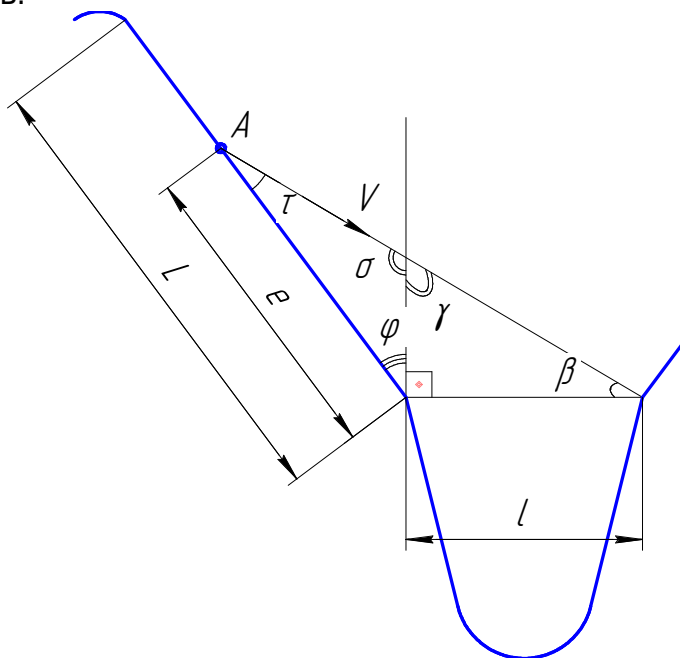


Рис. 5. Угол отскока в проекции на плоскость, перпендикулярную желобу ловушки

$$\sigma = 180 - \tau - \phi,$$

$$\gamma = 180 - \sigma,$$

$$\beta = 180 - 90 - \gamma,$$

$$e = \frac{l \cdot \sin(\beta)}{\sin(\tau)},$$

$$E = \frac{e}{L} \cdot 100\%.$$

На рис. 6 показаны угловые ограничения удара. ПП могут удариться в любую точку поверхности сетки. Рассмотрим три характерные точки: точка 1 – удар вблизи носка сетки, 2 – середина, 3 – удар вблизи жёлоба. Геометрически определены предельные углы попадания в ловушку в трех рассматриваемых точках.

На рис. 7 показана зависимость угла отскока ПП при соударении в области точек 1, 2, 3. По графику можно определить области попадания ПП в ловушку. Следовательно, все ПП, которые попадают в точку 1, будут направлены в ловушку, если их направление подлёта не будет превышать 25° , и соответственно 38° и 68° в точках 2 и 3. Если длину участка сетки от точки 1 до точки 2 представить в вероятностной оценке, то кривая распределения попадающих ПП в улавливатель будет выглядеть как кривая нормального распределения (рис. 8). При этом основная масса ПП будет вероятнее всего попадать в районе центральной точки 2 в сектор углов $15...40^\circ$.

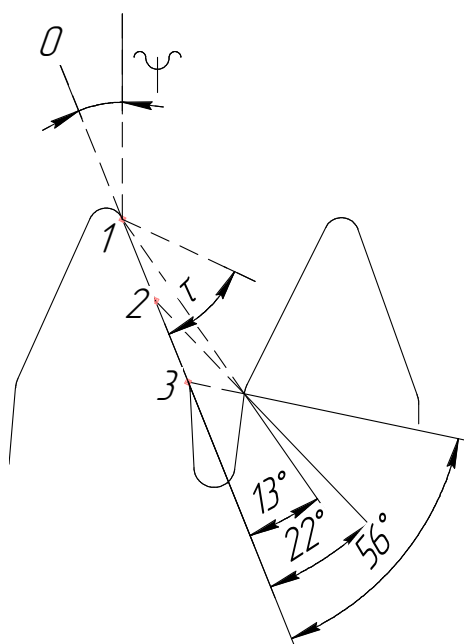


Рис. 6. Места вероятного соударения ПП в плоскости сетки

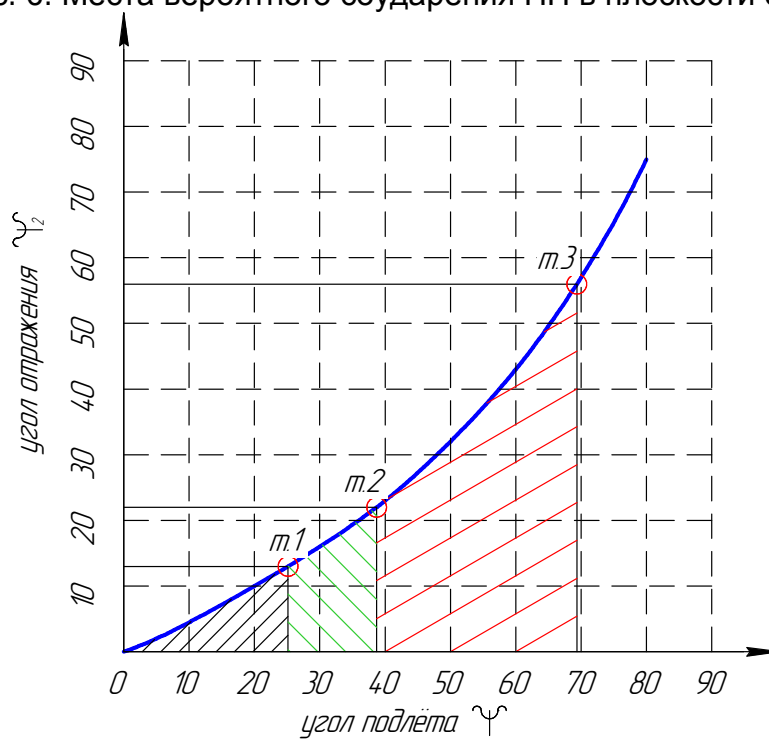


Рис. 7. Зависимость угла отскока ПП при соударении в области точек 1, 2, 3

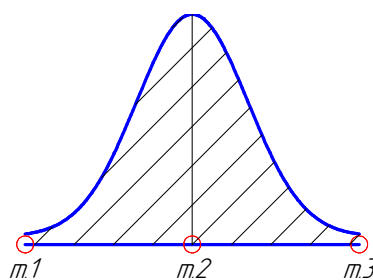


Рис. 8. Вероятность распределения соударений ПП в зоне расчётных точек

На рис. 9 изображена зона улавливания ПП в зависимости от угла подлёта по курсу. На рис. 10 показана зона улавливания ПП в зависимости от угла установки сетки, а рис.11 – зона улавливания ПП в зависимости от ширины ловушки.

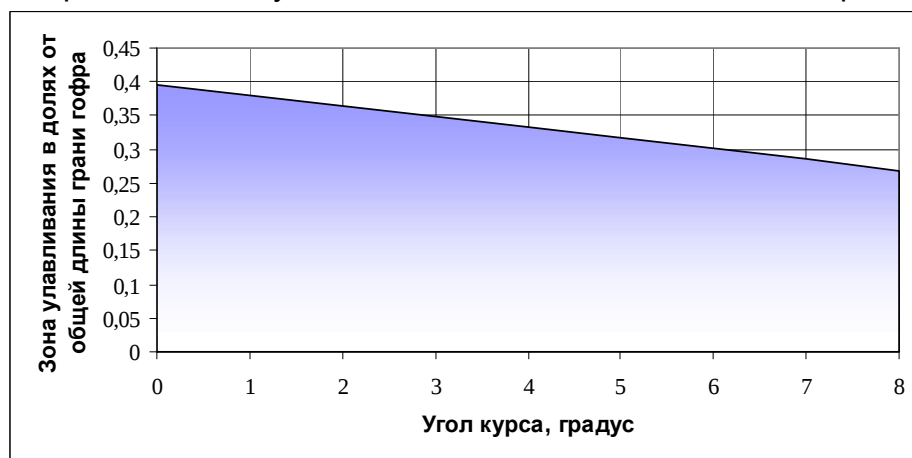


Рис. 9. Зона улавливания ПП в зависимости от угла подлёта по курсу

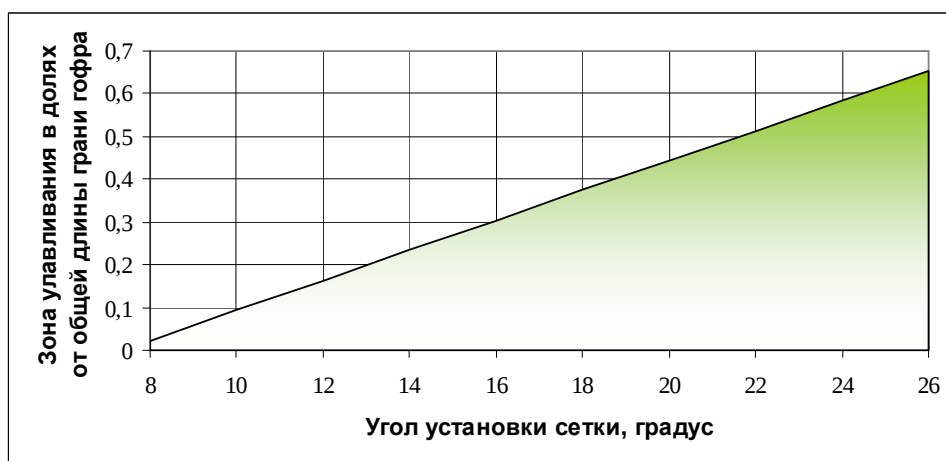


Рис. 10. Зона улавливания ПП в зависимости от угла установки сетки

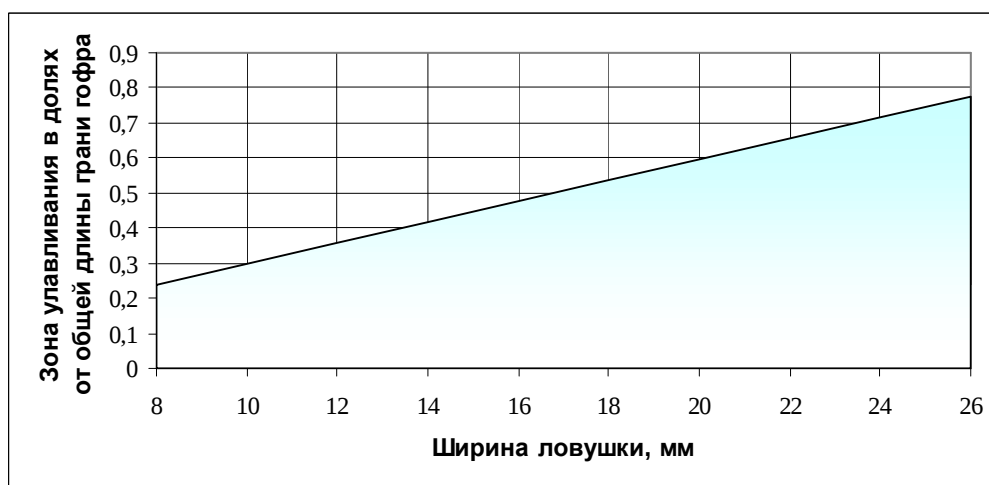


Рис. 11. Зона улавливания ПП в зависимости от ширины ловушки

3. Пролёт ПП в сносящем потоке воздуха до улавливателя

На ПП при пролёте в сносящем потоке воздуха действуют силы, графически изображенные на рис. 12. На рисунке обозначены: X – аэродинамическое сопротивление, V_0 – начальная скорость после удара, V – скорость ПП в каждый момент времени после удара, ψ_2 – угол отражения, Z – сила сносящего потока, m – масса ПП, W – объём ПП, mg – вес, ma – сила инерции, ρ – плотность воздуха, $\rho_{пп}$ – плотность ПП, $V_{вх}$ – скорость сносящего потока, S_{mid} – площадь миделя ПП.

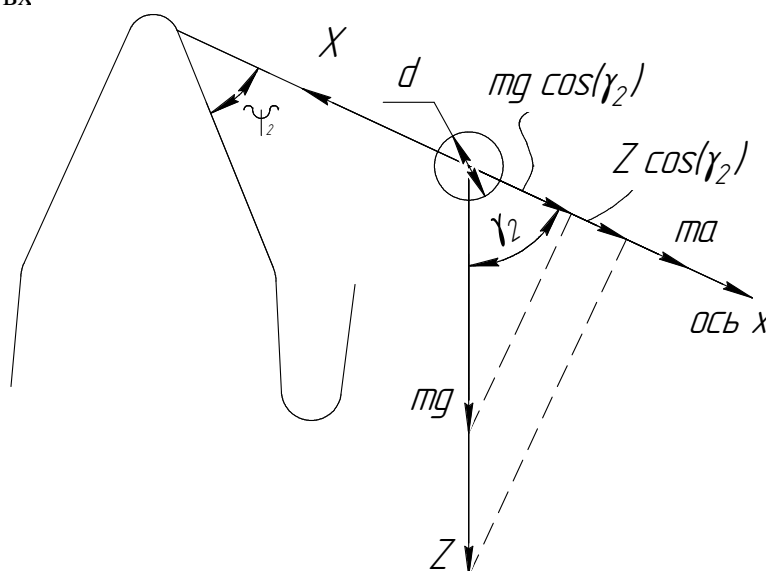


Рис. 12. Схема к динамическому расчёту

Рассмотрим силы в проекции на ось x :

$$mg \cdot \cos(\gamma_2) + Z \cdot \cos(\gamma_2) - X = -ma, \quad \text{знак "-" указывает на торможение ПП}$$

$$a = \frac{d}{dt} V,$$

$$\frac{d}{dt} V = \frac{X}{m} - \frac{Z \cdot \cos(\gamma_2)}{m} - g \cdot \cos(\gamma_2) \quad \text{— дифференциальное уравнение движения ПП}$$

$$X = \frac{c_x \cdot \rho \cdot V^2}{2} \cdot S_{mid},$$

$$Z = \left(c_x \cdot \frac{\rho_B \cdot V_{вх}^2}{2} \right) \cdot S_{mid},$$

$$S_{mid} = \frac{\pi d^2}{4},$$

$$W = \frac{\pi d^3}{6},$$

$$m = \rho_{пп} \cdot W,$$

$$\frac{d}{dt} V = \frac{c_x \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S_{\text{mid}}}{2m} - \frac{Z \cdot \cos(\gamma_2)}{m} - g \cdot \cos(\gamma_2).$$

Для упрощения примем

$$\begin{aligned} k_1 &= c_x \cdot \rho_B \cdot \frac{1}{2}, & k_2 &= \frac{Z \cdot \cos(\gamma_2)}{m}, \\ k_3 &= g \cdot \cos(\gamma_2), & k_4 &= k_1 \cdot Q, \\ k_5 &= k_2 + k_3, & Q &= \frac{S_{\text{mid}}}{m}. \end{aligned}$$

Тогда дифференциальное уравнение движения ПП примет следующий вид:

$$dt = \frac{dV}{k_4 V^2 - k_5}.$$

Проинтегрируем его

$$\int_0^t 1 dt = \int_{V_0}^V \frac{1}{k_4 V^2 - k_5} dV.$$

Получим

$$t(V) = \frac{-1}{\sqrt{k_4 \cdot k_5}} \cdot \operatorname{arcth} \left(\frac{k_4 \cdot V}{\sqrt{k_4 \cdot k_5}} \right).$$

Введём замену

$$n = \frac{-1}{\sqrt{k_4 \cdot k_5}}, \quad p = \frac{k_4}{\sqrt{k_4 \cdot k_5}}.$$

Получаем зависимость времени от скорости $t(V) = n \cdot \operatorname{arcth}(pV)$. Преобразуем эту функцию в следующий вид:

$$\begin{aligned} \operatorname{arcth}(pV) &= \frac{t}{n}, \\ pV &= \operatorname{th} \left(\frac{t}{n} \right), \\ V(t) &= \frac{\operatorname{th} \left(\frac{t}{n} \right)}{p}. \end{aligned}$$

Введя начальные условия, проинтегрируем от 0 до t и от V_0 до V . Получим зависимость скорости от времени

$$V(t) = \frac{\operatorname{th} \left(\frac{t + n \cdot \operatorname{arcth}(p \cdot V_0)}{n} \right)}{p}. \quad (1)$$

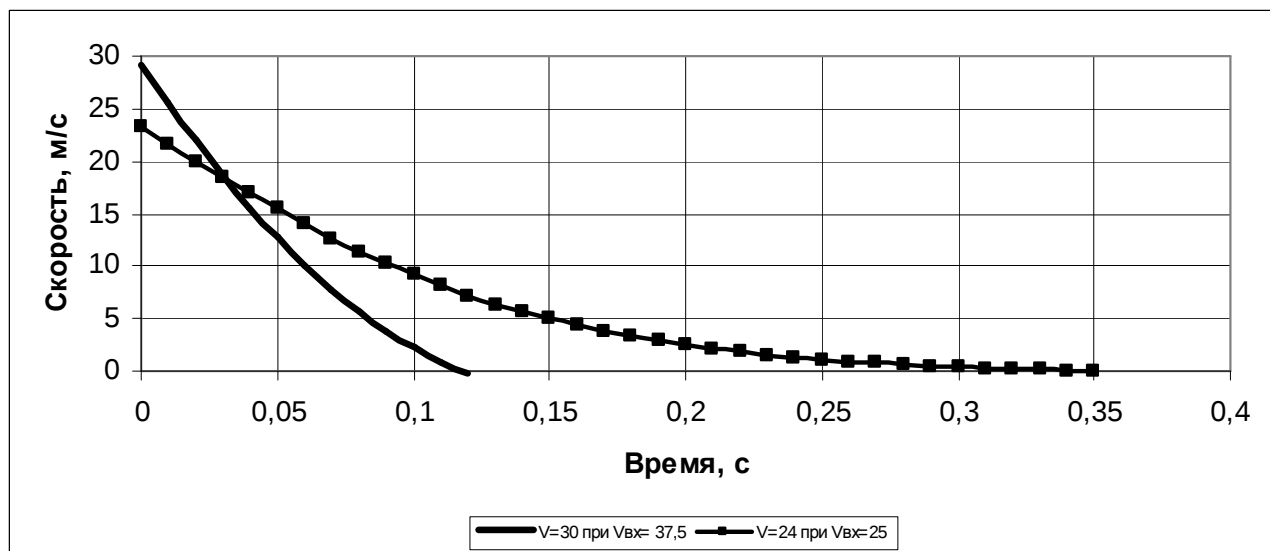


Рис. 13. Снижение послеударной скорости гранитного ПП диаметром 1 мм

Из графика рис.13 видно, что на определённых режимах работы двигателя при разных $V_{вх}$ с учётом массово-инерционных характеристик наблюдается падение скорости ПП от момента соударения до нуля за некоторый промежуток времени. Падение скорости ПП не до нуля может свидетельствовать о том, что $V_{вх}$ не оказывает тормозного эффекта на ПП при определённых сочетаниях сил, действующих на него.

Построим траекторию движения ПП.

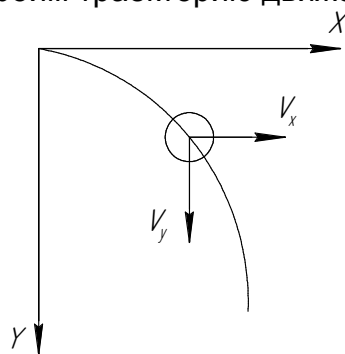


Рис. 14. Схема для определения траектории

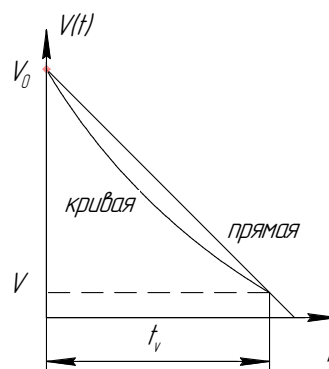


Рис. 15. Схема для упрощения расчёта траектории

ПП в движении имеет две составляющие скорости V_x и V_y рис.14. Скорость V_y постоянная и равна скорости сносящего потока $V_{вх}$. Зная, что скорость – это производная пути по времени

$$\frac{dS}{dt} = V,$$

запишем выражение пути по оси Y

$$\frac{dy}{dt} = V_y = V_{вх},$$

умножим на dt

$$dy = V_{вх} \cdot dt,$$

интегрируем

$$\int 1 dy = \int V_{BX} dt ,$$

получим зависимость пройденного пути от времени по координате Y

$$y(t) = V_{BX} \cdot t , \quad (2)$$

Аналогичным путём найдем путь по X координате. Введём некоторые упрощения. Поскольку функция падения скорости (1) сложна для интегрирования и на коротком участке ведёт себя как прямая, заменим сложную функцию на линейную рис. 15.

$$V_X(t) = V - k \cdot t ,$$

$$k = \frac{V_0 - V}{t_V} ,$$

$$\frac{dx}{dt} = V - k \cdot t ,$$

$$dx = (V - k \cdot t) \cdot dt ,$$

$$\int 1 dx = \int V - k \cdot t dt ,$$

зависимость пройденного пути от времени по координате X

$$x(t) = V \cdot t - k \cdot \frac{t^2}{2} . \quad (3)$$

Исключим время t из уравнений (2) и (3). Для этого решим уравнение (3) относительно t и, подставив в формулу (2), получим траекторию движения

$$y(x) = -V_{BX} \cdot \left[\left(\frac{1}{2 \cdot k} \right) \cdot \left(2 \cdot V - 2 \cdot \sqrt{V^2 - 2 \cdot k \cdot x} \right) \right] \quad (4)$$

На рис. 16 изображены графики траекторий гранитной частицы, построенные по формуле (4). Знак «-» потому, что ось Y направлена в противоположную сторону. Из графиков видно, что чем больше скорость ПП после соударения с сеткой, путь пролёта ПП увеличивается.

Поскольку путь пролёта от сетки до желоба по нормали к улавливателю составляет 50 мм, то в этой области параболы траекторий приближаются к прямой

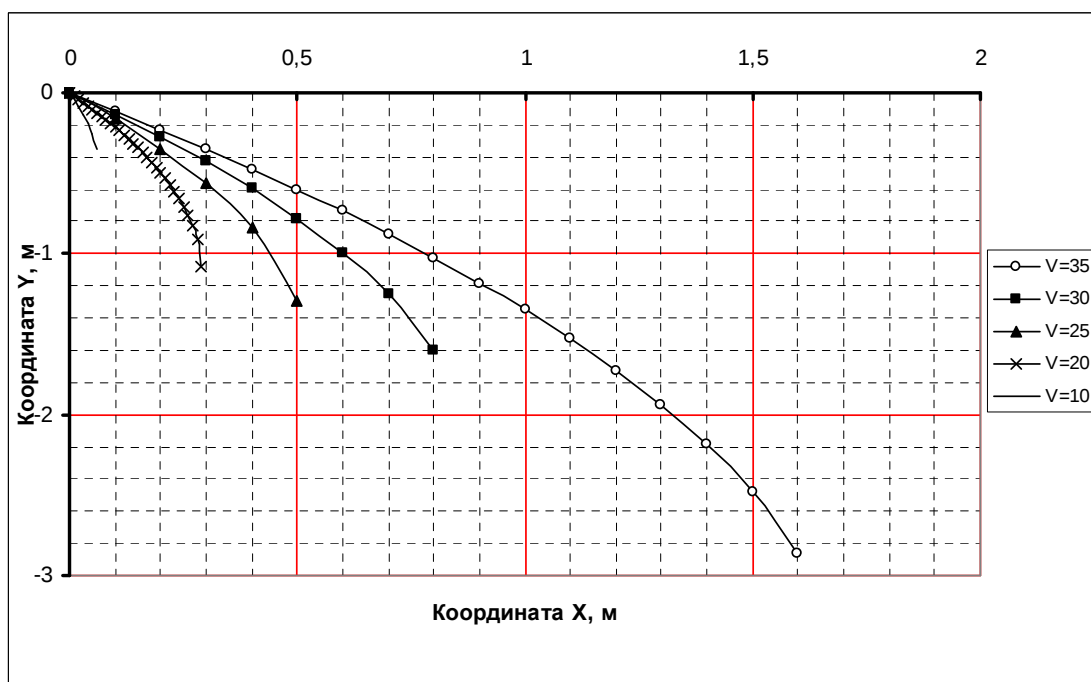
$$y(x) = -u \cdot x$$

с угловым коэффициентом

$$u = \frac{V_{BX}}{V}$$

На основе этого допущения, были перестроены траектории в реальных значениях для каждой точки соударения.

$$\Pi = \left(1 - \frac{y(x) \cdot \text{прямой}}{y(x) \cdot \text{кривой}} \right) \cdot 100\% = 0.35\% - \text{погрешность допущения.}$$

Рис.16. Траектории гранитного ПП диаметром 0,5 мм при $V_{vx}=37,5$

Был определён диапазон углов подлёта ПП, при которых они попадают в улавливатель. Результаты сведены в Таблицу.

Таблица 1

		Скорости подлёта, м/с		
		30	50	90
Углы соударения в точках, градусы	т.1	55...60	35...40	15...18
	т.2	50...70	30...60	20...50
	т.3	0...60	0...60	0...60

По цифрам из таблицы можно сделать вывод: чем быстрее движется ПП, тем меньше он подвержен влиянию сносящего потока.

Выводы

1. Впервые выявлена зависимость улавливания ПП от скорости и углов соударения ПП с гофрированной сеткой. Определены граничные параметры ударно-инерционного взаимодействия ПП с гофрированной сеткой, характеризующие защищённость воздухозаборника ТВД.
2. Полученные зависимости позволяют оптимизировать защитные свойства гофрированной сетки для обеспечения 100%-ной защиты от ПП в диапазоне исследованных скоростей 30..90 м/с.
3. Для расширения применения полученных результатов необходимо провести дополнительные исследования взаимодействия ПП с улавливателем.

Список литературы

1. FOD Wors: New Weapons To Defeat A Familiar Foell Aviation Maintenance. February 2001 (www.bodnews.com)
2. А.с. №974717 Приоритет 1.04.1981. Защитное устройство двигателя летательного аппарата / В.Г. Анисенко, В.М. Смирнов, Н.П. Беседов, В.Е. Задорожный (СССР). – №3267012; заявл. 1.04.81; зарегистр. 14.07.82.
3. Беседов П.Н. Сепарация частиц песка сетками: Отчёт 4268 / Н.П. Беседов, В.Д. Орехов, В.М. Смирнов ЦАГИ, – 1982. – 18 с.
4. Орехов В.Д. Исследование движения частиц в канале воздухозаборника/ В.Д. Орехов // Учёные записки ЦАГИ. – 1980. – Т. XI, № 2. – С. 137-142.
5. Расчётная оценка возможности попадания на вход в двигатели и на лопасти винтов самолёта Ан-140 посторонних предметов с поверхности аэродрома и сравнение с расчётной оценкой для других самолётов подобной компоновочной схемы / научно-технический отчёт №188-99-III о научно-исследовательской работе 2000030000400. И.А. Резенфельд, Н.С. Ларионова, В.А. Назаренко.
6. Пановко Я. Г. Введение в теорию механического удара / Я. Г. Пановко. – М. – 1977 – 117с.
7. Крагинский И.В. Основы расчётов на трение и износ/ И.В. Крагинский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: «Машиностроение», 1977. – 526 с.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. А.Г. Гребеников, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Поступила в редакцию 08.02.10

Формування характеристик відбійно-інерційного захисту повітрозабірника двигуна

Досліджено ударно-інерційну взаємодію сторонніх предметів із гофрованою сіткою, що встановлена в повітрозабірнику газотурбінного двигуна. Сформульовано граничні умови попадання сторонніх предметів в уловлювач.

Ключові слова: пружний удар, зсувний потік, СП – сторонній предмет, уловлювач, повітрозабірник.

Forming of characteristics of percussion-inertial protection of engine air inlet

The percussion-inertial interaction of foreign objects with crimped wire screen installed in the air inlet of the gas-turbine engine is researched. The boundary conditions of foreign objects' getting into the junk basket are formulated.

Keywords: elastic impact, cross-flow, FO – foreign object, junk basket, air inlet.