

УДК 681.11-758.31

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ В ПЫЛЕЗАЩИТНОМ УСТРОЙСТВЕ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Д. А. ЕМЕЛЬЯНОВ¹, С. Ю. ПАНОВ², А. В. ПОПОВ³, В. Н. САНИН⁴

¹vvavrn@mail.ru, ²su-panov@yandex.ru, ³avpnil@rambler.ru, ⁴vsan1n@yandex.ru

ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»

Поступила в редакцию 02.10.2022

Аннотация. Исследовано движение пылевых частиц, движущихся в воздухе под действием центробежных сил во внутренней камере пылезащитного устройства. Произведен анализ совокупных сил, действующих на частицу пыли при движении двухфазного потока в поле действия центробежных сил пылезащитного устройства. Представлена математическая модель, описывающая движение воздушно-материального потока. Приводится численное решение задачи о движении частицы в газовом потоке с учётом взаимодействия частицы с внешними стенками камеры пылезащитного устройства.

Ключевые слова: пылезащитное устройство; пылевые частицы; двухфазный поток; математическое описание; движение частицы; аэродинамика; турбулентность; пылеулавливание.

ВВЕДЕНИЕ

Использование вертолетов в различных природно-климатических зонах имеет специфическую проблему для данного типа летательных аппаратов. Когда вертолеты базируются на естественных площадках, при взлете и посадке они создают облако из пыли и песка. Поднятая пыль попадает в проточную часть двигателя, что негативно отражается на надежности конструкции. Из-за того, что в процессе эксплуатации происходит эрозионное разрушение материала, компрессор двигателя выходит из строя до конца назначенного срока.

Двухкомпонентный поток, содержащий твердые частицы, опасен для двигателей вертолетов, которые часто базируются на грунтовых площадках и создают пылевое облако высотой до 15 м.

Частицы окиси кремния, которые находятся в пыли, обладают высоким абразивным воздействием на лопатки компрессора. Угроза разрушения из-за пылевой эрозии элементов проточной части газотурбинного двигателя (ГТД) и отложения пыли вызывает такие отказы, как снижение мощности или нежелательный рост температуры газа перед турбиной. С учетом высоких скоростей воздуха и больших окружных скоростей лопаток компрессора, столкновение их даже с мелкими твердыми частицами может привести к значительному эрозионному износу. Нередко случается так, что на турбине образуется слой спекшейся пыли, и она забивает сопловые аппараты турбин, вызывая помпаж компрессора.

От массы пыли, попавшей в двигатель во время эксплуатации двигателя, зависит степень воздействия эрозии на характеристики двигателей. Разрушения зависят в основном от твердости и химических свойств твердых частиц, а также от размера фракции этих частицы (известно, что частицы размером до 20 мкм не вызывают значительной эрозии).

В газотурбинных двигателях вертолета используется пылезащитное устройство (ПЗУ) для очистки воздуха от песка, пыли и других мелких частиц вблизи поверхности земли. Для

предотвращения абразивного износа проточной части ПЗУ устанавливаются перед воздухозаборником двигателя.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Процесс улавливания частиц в пылезащитном устройстве газотурбинного двигателя представляет собой сложный аэродинамический и физико-механический процесс, который трудно описать математическим способом. Тем не менее, для некоторых процессов, например, при переработке полимеров, этот процесс хорошо известен. В данной работе предлагается описание процесса улавливания частиц в пылезащитном устройстве. Для описания процесса используется модель, основанная на кинетической теории газов.

Следующие факторы оказывают существенное влияние на движение твердых частиц [1]:

1. Полидисперсность материалов. Мельчайшие частицы, на которые воздействуют турбулентные пульсации воздуха, могут быть как твердыми, так и жидкими. В первом случае это частицы пыли, в другом — капли воды. Скорость и направление движения частиц, скорость и направление турбулентных пульсаций воздуха и, наконец, величина их взаимного влияния зависят от расстояния между ними. Приближаясь к границе раздела фаз, частицы начинают переходить из одной фазы в другую. На границе раздела двух фаз всегда существует область, в которой происходит переход из одного состояния в другое. Для описания движения этих частиц используются законы классической механики твердых материалов.

2. Ограниченный характер движения частицы. При высоких значениях концентрации дисперсной фазы, твердые частицы будут «захвачены» воздушным потоком, несущим частицы, и взаимодействовать друг с другом. В результате частицы не могут двигаться с той же скоростью, что и поток, и за счет этого фактора будут отставать от потока.

3. Взаимодействие частиц с ограничительными стенками. Из-за соприкосновения частиц с твердыми поверхностями происходит отскок этих частиц и их закручивание, из-за чего траектории движений частицы резко меняются. Для этого необходимо провести анализ движения частиц во внутреннем пространстве ПЗУ.

Описание потоков производится лангражевым и эйлеровым подходом. С помощью теории возмущений по плотности может быть установлено поведение системы при малых значениях плотности газа. Так, например, в случае, когда плотность газа мала, система переходит в состояние равновесия, задаваемое уравнениями движения лагранжевых потоков. Если же плотность газа больше некоторого критического значения, то система переходит к состоянию равновесия, при котором уравнение движения газовой фазы является уравнением Эйлера. Такой подход даст возможность получить информацию об изолированной частице в газовом потоке.

При решении задач на определение скорости газа в зависимости от времени и расстояния необходимо использовать систему уравнений неразрывности в предположении, что в начальный момент времени скорость газа была равна нулю [2].

Система уравнений неразрывности, импульсов и энергии описывает движение газового потока:

$$\operatorname{div} \vec{V} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \vec{f} - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \nu \Delta \vec{V}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \operatorname{grad} T = a \Delta T, \quad (3)$$

где \vec{V} – вектор скорости газового потока, м/с;

ρ – плотность газа, кг/м³;

p – абсолютное давление, Па;

T – термодинамическая температура, К;

ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

a – коэффициент температуропроводности, м²/с;

\vec{f} – плотность распределения объемных сил, м/с²;

∇ – оператор набла.

Уравнения движения твердого тела описывают движение частицы в газе [3]:

$$m \frac{d\vec{U}}{dt} = \sum_i \vec{F}_i, \quad (1)$$

$$\frac{d\vec{L}_O}{dt} = \sum_i \vec{M}_O(\vec{F}_i), \quad (2)$$

где \vec{U} – скорость движения частицы,

$\sum_i \vec{F}_i$ – основной вектор сил, действующих на частицу в газе,

\vec{L}_O – момент движения частицы относительно центра O,

$\sum_i \vec{M}_O(\vec{F}_i)$ – момент сил, действующих на частицу, относительно центра O.

Система уравнений (1)–(5) замыкается уравнением состояния газа, начальными и граничными условиями для газа и твердой фазы.

В общем случае вектор скорости частицы не является прямо пропорциональным вектору, а зависит от координат частицы. Кроме того, на движение частицы могут оказывать влияние другие частицы газа. Например, если в газе имеются твердые частицы, то они будут влиять на движение частиц газа, и наоборот.

На частицы, движущиеся в газовом потоке, влияют различные факторы: сила тяжести, сила аэродинамического сопротивления, архимедова сила, сила Сафмена, сила Магнуса, сила термофореза и турбофореза. Некоторые из этих сил могут быть положительными, а некоторые – отрицательными [4].

Наличие или отсутствие влияния различных факторов и степень их влияния определяется в каждом конкретном случае с точки зрения решаемой задачи. В то же время следует обратить внимание, что приведенные выражения описывают осредненные значения действующих сил на частицы. Эта особенность делает невозможным учёт воздействия турбулентности несущей среды.

Однако ее влияние на движение частиц в газовой среде невелико, так как турбулентность имеет более высокую частоту, чем частота столкновений частиц. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать движение частиц при наличии только сил инерции [5].

В таком случае рассмотрим движение воздушного потока в соответствии со следующими допущениями. Пусть внутренний объем пылеулавливающей камеры ограничен поверхностью с радиусом окружности осевой линии r_1 и радиусом окружности поперечного сечения в меридиональной плоскости r_2 (рис. 1).

При использовании цилиндрической системы координат (r, φ, z) внутреннее пространство камеры ограничено неравенствами:

$$r_1 - r_2 \leq r \leq r_1 + r_2,$$

$$0 \leq \varphi \leq 2\pi,$$

$$-r_2 \leq z \leq r_2.$$

В этом случае координаты r и z связаны друг с другом уравнением цилиндрической размерности:

$$(r_1 - r_2)^2 + z^2 = r_2^2.$$

В качестве одного из способов интенсификации пылеулавливания можно рассматривать закручивание газодисперсного потока вокруг оси канала [6].

Чтобы описать характер движения воздушного потока в ПЗУ, представим в первом приближении, что внутренняя часть имеет неограниченно большие размеры. В зоне движения возникает твердый пространственный поток, в котором потоки воздуха завиваются по concentрическим поверхностям. Выделяют две главные составляющие движения – вращение потока воздуха вокруг оси O_z и движение на меридиональной плоскости.

В частном случае закон площадей определяет величину и окружную скорость воздушного потока при вращении вокруг оси O_z :

$$u_\varphi = \omega_1 r,$$

где ω_1 – угловая скорость газового потока, c^{-1} ,

r – радиус произвольной точки неподвижной системы координат, м.

В меридиональных плоскостях газовый поток движется по кривой оси также согласно закону площадей:

$$u_\psi = \omega_2 \rho,$$

где u_ψ – линейная скорость вращения газового потока, м/с,

ω_2 – меридиональная угловая скорость, c^{-1} ,

ρ – радиус в локальной системе координат, м.

Отсюда вытекает связь точек координат между неподвижной и локальной системой:

$$r = r_1 + \rho \cdot \cos \psi, \quad z = \rho \cdot \sin \psi, \tag{6}$$

Принимая во внимание зависимость скоростей в локальной и глобальной системе координат, получим значение скорости воздушного потока в неподвижной цилиндрической системе координат [5]:

$$u_\varphi = \omega_1 \cdot r, \tag{7}$$

$$u_r = -\omega_2 \cdot z, \tag{8}$$

$$u_z = \omega_2 \cdot (r - r_1). \tag{9}$$

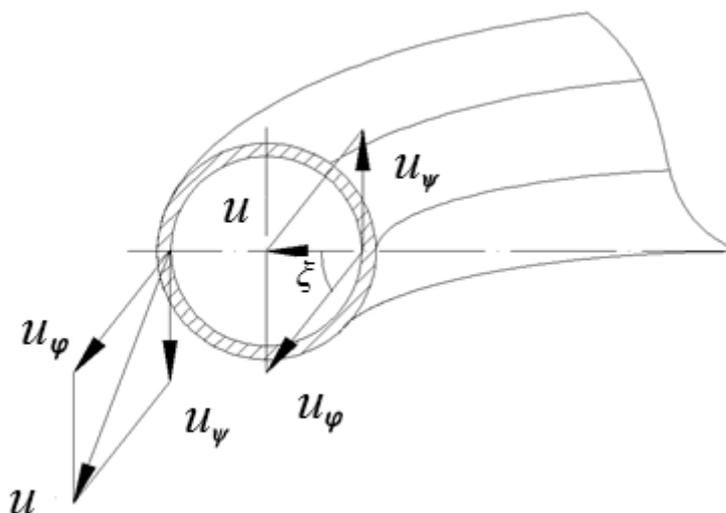


Рис. 1. Описание движения закрученного потока в цилиндрической части ПЗУ.

В реальных условиях движение воздушного потока в ПЗУ турбулизуеться. Соотношения (7)–(9) не рассматривают турбулентные пульсации потока воздуха, а всего лишь описывают только усредненное аэродинамическое поле, определяющее движение только сравнительно крупных частиц. Заметим, что в отличие от нормальных условий, в реальных условиях движения воздушного потока, при наличии турбулизации, скорости частиц в ПЗУ могут изменяться на

несколько порядков. Для простоты рассмотрим влияние турбулизации на аэродинамические характеристики ПЗУ при движении потока через ПЗУ с круглым поперечным сечением.

График векторов скорости воздуха и профиля скорости в плоскости (r, φ) показан на рисунках 2 и 3.

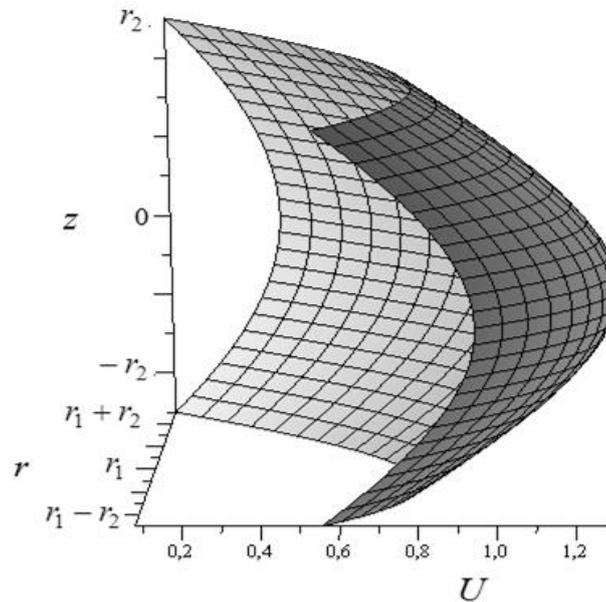


Рис. 2. Эпюра векторов скорости

Движение потока воздуха возникает за местными сопротивлениями достаточно стабильно и напоминает вращение твердого тела [6]. Но в этом случае вращающийся поток воздуха движется в направлении, противоположном основному потоку, а не наоборот. В аэродинамических трубах, в которых может создаваться большой перепад давлений, происходит разделение потоков. Возникающие при этом местные сопротивления могут быть очень большими. Если в этих условиях поток будет направлен в сторону основного потока, то он натолкнется на препятствие, которое будет оказывать ему сопротивление [7].

В этом случае мы получаем:

$$\frac{u_{\psi} \Big|_{r=r_2}}{u_{\varphi} \Big|_{r=r_1}} = \operatorname{tg} \xi \approx 0,25.$$

Следовательно, принимая во внимание соотношения (6) и (7), мы получаем связь между угловыми скоростями:

$$\omega_2 = 0,25 \omega_1 \frac{r_1}{r_2}.$$

При движении по трубе вязкая среда прилипает к внешним стенкам [8]. В этом случае профиль скорости представляет собой параболоид. Так как рассматривается цилиндрическая камера, то график скорости также должен представлять собой параболоид. Внешний вид этого параболоида сильно зависит от геометрических размеров камеры r_1 , r_2 и параметров самого потока ω_1 , ω_2 .

Как видно из рисунка, вдоль оси z профиль скорости представляет собой параболу. Профиль скорости в плоскости (r, φ) представлен в виде усеченной параболы и показан на рисунке 3.

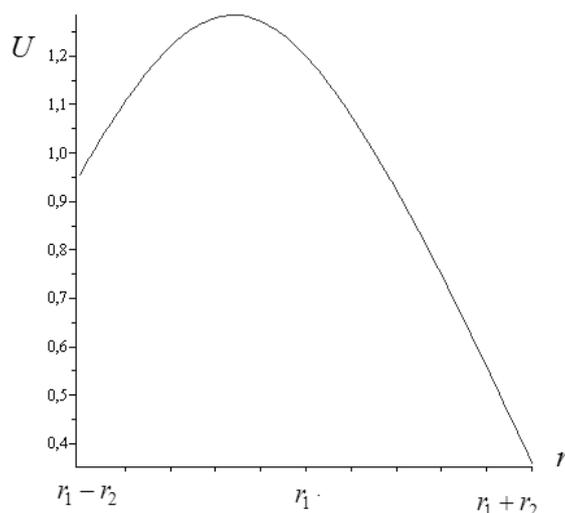


Рис. 3. Профиль скорости в плоскости (r, φ)

Из-за того, что около 80% частиц материала в ПЗУ имеет размер около 0,05–2,0 мм, влияние турбулентных пульсаций газа и действие внешних сил можно не учитывать.

Рассмотрим движение сферической частицы в ПЗУ. Для этого следует предполагать, что температура частица останется постоянной при условии сохранения температуры частицы. Основными факторами, влияющими на движение, являются аэродинамическое сопротивление

$$F_d = C_x \cdot S \cdot \rho \cdot |\vec{V} - \vec{v}|(\vec{V} - \vec{v})/2$$

и сила тяжести

$$\vec{G} = m\vec{g},$$

где C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления,

S – площадь миделевого сечения частицы,

ρ – плотность воздуха,

V – скорость воздуха,

v – скорость частицы.

В этом случае можно считать, что время движения частицы равно времени её пребывания в области ПЗУ, т.к. в процессе движения в памяти не происходит никаких изменений. При движении частицы на границе ПЗУ её кинетическая энергия будет равна энергии вылета частицы из ПЗУ.

В данном случае уравнения движения частицы будут сформулированы следующим образом:

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{u_i - v_i}{\tau_p} \pm g,$$

где τ_p – время динамической релаксации частиц.

Замыкается система начальными условиями:

$$v_i(t = 0) = v_{i0}.$$

Если перейти от переменных по времени к производным по координатам, то можно получить систему уравнений в системе координат движущегося газа:

$$v_r \frac{dv_r}{dr} = \frac{u_r - v_r}{\tau_p}, \quad (10)$$

$$\omega_1 \frac{dv_\varphi}{d\varphi} = \frac{u_\varphi - v_\varphi}{\tau_p}, \quad (11)$$

$$v_z \frac{dv_z}{dz} = \frac{u_z - v_z}{\tau_p} - g. \quad (12)$$

Для определения констант интегрирования необходимо задать значения параметров (r , φ , z) в момент времени $t=0$ – (r_0 , φ_0 , z_0) и значения вектора скорости при данных параметрах:

$$v_r(r_0) = v_{r0}, \quad v_\varphi(\varphi_0) = v_{\varphi0}, \quad v_z(z_0) = v_{z0}. \quad (13)$$

Решение системы (10)–(13) сильно зависит от уравнения движения газовой фазы, и дать аналитическое определение этой системе нельзя. Тогда решение системы уравнений находят численным путем. Иногда в частном случае системы (10)–(12) можно получить аналитическое решение. Если задано определение движения газа при помощи уравнений (7)–(9), систему (10)–(12) удастся интегрировать аналитически.

При помощи пакета аналитических вычислений *Maple* было найдено решение системы уравнений (10)–(12) вместе с уравнениями (7)–(9) для представленных начальных условий:

$$v_r = \exp \left(\left(-r + \tau_p \omega_2 z W \left(-\frac{\exp\left(\frac{r}{\tau_p \omega_2 z}\right) \exp(-1)}{\omega_2 z \exp\left(\frac{C_1}{\tau_p \omega_2 z}\right)} + \tau_p \omega_2 z + C_1 \right) \right) / \tau_p \omega_2 z \right) - \omega_2 z \quad (14)$$

$$v_\varphi = \omega_1 r + \exp\left(-\frac{\varphi}{\tau_p \omega_1}\right) \cdot C_2 \quad (15)$$

$$v_z = F_1(W, r, z, C_3) \quad (16)$$

где W – функция Ламберта [9],

$F_1(W, r, z, C_3)$ – линейная комбинация функций Ламберта с аргументами, зависящими от r , z и константы C_3 . По причине громоздкости $F_1(W, r, z, C_3)$ в данной работе не приводится.

Заключительные уравнения (14)–(16) представляют собой описание движения дисперсной фазы относительно газовой при движении двухфазного потока в камере ПЗУ.

Константы C_i отражают влияние физико-механических характеристик твердой фазы (размер, плотность, скорость витания) на движение воздушно-материального потока в камере ПЗУ. Константа C_2 из уравнения (15) находится следующим образом:

$$C_2 = (v_{\varphi0} - \omega_1 r_0) \exp\left(\frac{\varphi_0}{\tau_p \omega_1}\right) \quad (17)$$

По причине сложности нахождения аналитического решения уравнений (14) и (16), константы C_1 и C_3 находятся численным методом.

Расчет уравнения (17) при исходных данных: скорость на входе в ПЗУ $v_{\varphi0} = 5$ м/с; угловая скорость $\omega_1 = 33$ с⁻¹; радиус $r_0 = 0,05$ м; начальная координата $\varphi_0 = 0,5\pi$; время релаксации частицы пыли ($\rho = 1200$ кг/м³; $d = 2$ мм)

$$\tau_p = \frac{d^2 \rho_m}{18\mu} = \frac{0,002^2 \cdot 800}{18 \cdot 18,2 \cdot 10^{-6}} = 9,7 \text{ с.}$$

$$C_2 = (5 - 33 \cdot 0,05) \exp\left(\frac{0,5 \cdot 3,14}{9,7 \cdot 10}\right) = 3,4 \text{ м/с.}$$

Полученный расчет показал, что значение константы соответствует скорости витания частиц пыли. Если исходить из того, что скорость витания не зависит от концентрации частиц пыли, то можно рассчитать скорость их переноса в любой точке камеры ПЗУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты численного моделирования и построения профиля вектора скорости частицы при ее движении относительно газовой фазы показали, что происходит смещение дисперсной фазовой структуры по спирали большего шага.

Таким образом, для разработки и совершенствования аппаратов для улавливания пылевых частиц в центробежном поле газозвдушенного потока необходимо исследовать физико-химические характеристики дисперсной фазы, а также кинетику взаимодействия газовой и дисперсной фазы в зависимости от концентрации частиц в двухфазном потоке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шиляев М. И.** Аэродинамика и тепломассообмен газодисперсных потоков: учеб. пособие. Томск: ТГАСУ, 2003. 272 с. [M. I. Shilyaev *Aerodynamics and heat and mass transfer of gas-dispersed flows: stipend textbook.* (in Russian). Tomsk: TGASU, 2003. 272 p.]
2. **Ильина Т. Н., Бойчук И. П., Емельянов Д. А.** О взаимодействии частиц техногенных волокнистых материалов в воздушном потоке // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2016. № 6. С. 116–121. [T. N. Ilyina, I. P. Boychuk, D. A. Emelyanov, *On the interaction of particles of technogenic fibrous materials in the air flow.* (in Russian). Vestnik BGTU V. G. Shukhova. 2016. No. 6. pp. 116–121.]
3. **Артюхов А. Е., Фурса А. С., Москаленко К. В.** Классификация и сепарация гранул в вихревых грануляторах // Химическое и нефтегазовое машиностроение. Сумы. 2015. № 5. С. 15–18. [A. E. Artyukhov, A. S. Fursa, K. V. Moskalenko, *Classification and separation of granules in vortex granulators.* (in Russian). Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie. Symi. 2015. No. 5. pp. 15–18.]
4. **Вараксин А. Ю.** Турбулентные течения газа с твердыми частицами. М.: Физматлит, 2003. 192 с. [A. Yu Varaksin, *Turbulent gas flows with solid particles.* (in Russian). M.: Fizmatlit, 2003. 192 p.]
5. **Минко В. А., Ильина Т. Н., Минко А. В., Емельянов Д. А.** К расчету воздухопроводов для двухфазных потоков // Вестник ТГТУ. 2016. Т. 22, № 4. С. 648–656. [V. A. Minko, T. N. Ilyina, A. V. Minko, D. A. Emelyanov, *To the calculation of air ducts for two-phase flows.* (in Russian). Vestnik TGTU. 2016. vol. 22, No. 4. pp. 648–656.]
6. **Minko V. A., Ilyina T. N., Emel'yanov D. A.** Metodological bases for calculation of the aspiration ventilation systems // International Journal of Pharmacy Technology. 2016. Vol. 8, № 4. P. 26644–26652.
7. **Перельгин Д. Н., Севостьянов В. С., Бойчук И. П., Кузнецова И. А.** Исследование ударного контакта абразивных частиц с футеровкой вихре-акустического диспергатора // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2015. № 2. С. 122–125. [D. N. Perelygin, V. S. Sevostyanov, I. P. Boychuk, I. A. Kuznetsova, *Investigation of impact contact of abrasive particles with the lining of a vortex-acoustic dispersant.* (in Russian). Vestnik BGTU V. G. Shukhova. 2015. No. 2. pp. 122–125.]
8. **Бойчук И. П., Ермилов Р. А.** Разработка детерминированной математической модели движения газодисперсного потока в торообразном осадителе // VII Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство» (Белгород, 20–22 октября 2015). Белгород: Изд. БГТУ, 2015. С. 1490–1494. [I. P. Boychuk, R. A. Ermilov, *Development of a deterministic mathematical model of the motion of a gas-dispersed flow in a torus-shaped precipitator.* (in Russian). VII Mezhdunarodniy molodezhniy forum "Obrazovanie. Nauka. Proizvodstvo" (Belgorod, October 20–22, 2015). Belgorod: Izd. BGTU, 2015. pp. 1490–1494.]
9. **Valluri S. R., Jeffrey D. J., Corless R. M.** Some applications of the Lambert W function to physics // Canadian J. Physics. 2000. Vol. 78. P. 823–831.

ОБ АВТОРАХ

ЕМЕЛЬЯНОВ Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, доц. каф. авиационных двигателей ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина». Дипл. инженера (БГТУ, 2013). Иссл. в обл. двухфазных потоков.

ПАНОВ Сергей Юрьевич, д-р техн. наук, проф. каф. математики ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина». Дипл. инженера (ВГУИТ, 1996). Иссл. в обл. математического моделирования движения частиц.

ПОПОВ Алексей Владимирович, д-р техн. наук, проф. каф. восстановления авиационной техники ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина». Дипл. инженера (РВКИ РВСН, 1993). Иссл. в обл. диагн. сост. конструкций мет. неразруш. контроля.

САНИН Владимир Николаевич, д-р физ.-мат. наук, проф. каф. математики ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина». Дипл. инженера (ВГТУ, 1995). Иссл. в обл. математических моделей.

METADATA

Title: Mathematical description of particle motion in the dust-proof device of a gas turbine engine.

Authors: D. A. Emelyanov¹, S. U. Panov², A. V. Popov³, V. N. Sanin⁴

Affiliation: Air Force Education and Research Center «Air Force Academy named Prof. N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin», Russia.

Email: ¹vvavrn@mail.ru, ²su-panov@yandex.ru, ³avpnil@rambler.ru, ⁴vsan1n@yandex.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), vol. 27, no. 1 (99), pp. 38-46, 2023. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The motion of dust particles moving in the air under the action of centrifugal forces in the inner chamber of the dust protection device is investigated. The analysis of the cumulative forces acting on a dust particle during the movement of a two-phase flow in the field of action of centrifugal forces of the dust protection device is carried out. A mathematical model describing the movement of the air-material flow is presented. A computational solution of the problem of particle motion in a gas flow is given, take in account the interaction of the particle with the outer walls of the chamber of the dust-proof device.

Key words: dust protection device; dust particles; two-phase flow; mathematical description; particle motion; aerodynamics; turbulence; dust accumulation.

About authors:

EMEL'YANOV, Dmitry Alexandrovich, Cand. of Tech. Sci., Assoc. Prof., Dept. of Aviation Engines of the Air Force Education and Research Center "Air Force Academy named after Prof. N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin". Dipl. engineer (BGTU, 2013). Studies in the area of two-phase flows.

PANOV, Sergey Urevich, Prof., Dept. of Mathematics of the Air Force Education and Research Center "Air Force Academy named after Prof. N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin". Dipl. engineer (VGUIT, 1996). Studies in the area of the mathematical modeling of particle motion.

POPOV, Alexey Vladimirovich, Dr. of Tech. Sci., Prof., Dept. of Aircraft Maintenance and Repair of the Air Force Education and Research Center "Air Force Academy named after Prof. N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin". Dipl. engineer (RVKI RVSN, 1993). Studies on the diagnostics of the state of structures by non-destructive testing methods.

SANIN, Vladimir Nikolaevich, Dr. of Tech. Sci., Prof., Dept. of Mathematics of the Air Force Education and Research Center "Air Force Academy named after Prof. N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin". Dipl. engineer (VGTU, 1995). Studies in the area of mathematical models.