

УДК 621.438

Г.Г. ЕНИКЕЕВ

Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РОТОРНЫХ ВОЗДУХООЧИСТИТЕЛЕЙ ВРД

Рассмотрены математические модели эффективности воздухозаборных устройств ВРД с роторным воздухоочистителем. Показано, что основными критериями совершенства воздухозаборных устройств с роторным воздухоочистителем являются коэффициент эффективности и коэффициент восстановления полного давления. Указанные критерии зависят от выбранной схемы, геометрических и режимных параметров воздухозаборного устройства с роторным воздухоочистителем, характеристик газозвеси.

воздухозаборное устройство, роторный воздухоочиститель, газозвесь, коэффициент эффективности, дисперсные частицы, коэффициент восстановления полного давления

Введение

Проблема обеспечения надежности, увеличения ресурса, стабилизации характеристик силовых установок летательных аппаратов при их эксплуатации в запыленных условиях, над поверхностью моря является актуальной. Эффективным способом защиты проточной части ВРД от воздействия дисперсных частиц является установка воздухоочистителя на входе. Для указанных целей можно использовать роторные воздухоочистители. Они обладают высоким коэффициентом эффективности при высоких скоростях несущего потока [1]. Воздухозаборные устройства с роторным воздухоочистителем для ТВД [1], ТРДД [1] имеют те же габариты, что и штатные входные устройства и хорошо komponуются с двигателем.

Многие задачи рабочего процесса воздухозаборных устройств с роторным воздухоочистителем освещены в работах [1 – 5]. Но в указанных работах недостаточно внимания уделено моделям оценки коэффициента эффективности. В настоящей работе сделана попытка ликвидировать этот пробел.

1. Эффективность воздухозаборных устройств с роторным воздухоочистителем

Под эффективностью воздухозаборного устройства ВРД с роторным воздухоочистителем понима-

ется способность уменьшить концентрацию дисперсных частиц в потоке газозвеси перед компрессором до определенных пределов. Эффективность определяется выражением:

$$\psi = \frac{\dot{m}_0 - \dot{m}_{1k}}{\dot{m}_0}, \quad (1)$$

где ψ – коэффициент эффективности воздухозаборного устройства с роторным воздухоочистителем; \dot{m}_0 – массовый расход дисперсных частиц через площадь контрольного сечения невозмущенного потока перед воздухозаборным устройством; \dot{m}_{1k} – массовый расход дисперсных частиц через площадь сечения перед компрессором.

Параметры газозвеси в контрольном сечении невозмущенного потока обычно задаются равномерно распределенные по площади. В процессе движения газозвеси от контрольного сечения невозмущенного потока до входа в компрессор равномерное распределение параметров по площади нарушается. Установление закономерностей изменения параметров газозвеси можно выполнить решив задачу о движении потока в проточной части воздухозаборного устройства с роторным воздухоочистителем.

1.1. Эффективность приводного роторного воздухоочистителя ТВД. Схема приводного роторного воздухоочистителя приведена в [1]. Воздухо-

очиститель расположен в пространстве между винтами и воздухозаборником и служит для отделения капель воды от воздуха.

Массовый расход воды, отводимый от потока при его прохождении через ступень воздухоочистителя, можно представить в виде:

$$\dot{m}_{BO} = \dot{m}_K - \dot{m}_\beta - \dot{m}_\gamma, \quad (2)$$

где \dot{m}_K – инерционное осаждение капель на поверхность лопаток воздухоочистителя в единицу времени; \dot{m}_β – вторичный унос воды в единицу времени с поверхности лопаток за счет эффектов отражения, срыва пленки; \dot{m}_γ – унос массы воды в единицу времени, срывающейся с задних кромок лопаток.

Поделив выражение (2.) на величину \dot{m}_{1BO} , можно получить

$$\psi_{\beta\gamma} = K - \beta - \gamma, \quad (3)$$

где

$$K = \frac{\dot{m}_K}{\dot{m}_{1BO}} \text{ – коэффициент осаждения;}$$

$$\beta = \frac{\dot{m}_\beta}{\dot{m}_{1BO}} \text{ – коэффициент уноса;}$$

$$\gamma = \frac{\dot{m}_\gamma}{\dot{m}_{1BO}} \text{ – коэффициент, учитывающий}$$

срыв пленки с задних кромок лопаток.

Несмотря на то, что многие аспекты взаимодействия капельной влаги с поверхностями, пленкой и двухфазным пограничным слоем, воздушного потока с пленкой, а также движения пленок по сепарирующим поверхностям освещены в литературе, теоретическое определение величин β , γ , ввиду сложности указанных процессов и не изученности ряда конструктивных факторов на их протекание, не представляется возможным. Определение коэффициента осаждения K не представляет больших затруднений, что позволяет оценивать совершенство решетки во воздухоочистителя с функциональной точки зрения.

1.2. Эффективность воздухозаборного устройства ТРДД с самовращающимся роторным воздухоочистителем. Во втором контуре ТРДД температура потока существенно ниже, чем в первом. Поэтому проточная часть второго контура менее подвержена солевым отложениям. С учетом указанного факта, была выполнена схема воздухозаборного устройства с самовращающимся роторным воздухоочистителем [1], особенностью которой является специальное профилирование канала воздухозаборного устройства и установка рабочего колеса воздухоочистителя перед первым контуром. Уловленная лопатками воздухоочистителя влага отбрасывается во второй контур.

Предположим, что вместе с несущим потоком из однородной области в канал воздухозаборника в единицу времени вместе с потоком первого контура поступает количество воды, равное \dot{m}_0 . Возможны различные режимы работы воздухозаборного устройства в зависимости от отношения скорости потока на срезе воздухозаборника к скорости полета. Поток газовой смеси полидисперсный и капли распределены по размерам неодинаково. Также существует вероятность дробления капель, что может привести к изменению функции распределения капель по размерам. В результате капли будут двигаться по разным траекториям с различным ускорением. Это приведет к изменению структуры газовой смеси в сечении входа воздухозаборника, где расход дисперсной фазы \dot{m}_{B3} может отличаться от \dot{m}_0 на величину $\Delta\dot{m}_0$. Для количественного описания изменения средней концентрации дисперсных частиц в потоке на срезе воздухозаборника используется коэффициент захвата $\psi_{\beta\gamma}$:

$$\psi_{\beta\gamma} = \frac{\dot{m}_{B3}}{\dot{m}_0}. \quad (4)$$

Вследствие перестройки структуры потока в воздухозаборнике, расход воды перед ступенью воздухоочистителя \dot{m}_{1BO} в общем случае будет отличаться

ся от \dot{m}_0 на величину \dot{m}_{B3} , которая отводится от потока или подводится в поток первого контура. При прохождении потока через ступень воздухоочистителя часть расхода влаги, равная $\Delta\dot{m}_{BO}$, отводится во второй контур, а другая часть, равная \dot{m}_{2BO} , продолжает движение с потоком первого контура.

Введем величины, характеризующие указанные перераспределения:

$$\psi_{\epsilon3} = \frac{\dot{m}_{B3} - \dot{m}_{1BO}}{\dot{m}_{B3}}; \quad (5)$$

$$\psi_{\epsilon0} = \frac{\dot{m}_{1BO} - \dot{m}_{2BO}}{\dot{m}_{1BO}}; \quad (6)$$

$$\psi = \frac{\dot{m}_0 - \dot{m}_{2BO}}{\dot{m}_0}. \quad (7)$$

Здесь ψ – коэффициент эффективности влагоудаления в воздухозаборном устройстве с воздухоочистителем; $\psi_{\epsilon3}$ – коэффициент перераспределения влаги в воздухозаборном устройстве; $\psi_{\epsilon0}$ – коэффициент эффективности влагоудаления в ступени воздухоочистителя.

2. Модель эффективности роторных воздухоочистителей

Определение концентрации и закона распределения частиц по размерам в заданном сечении производилось следующим образом.

Рассматривая движение в воздухозаборнике, можно выделить контрольный объем V , ограниченный поверхностью тока несущей фазы, втекающей в воздухозаборник, поверхностью, нормальной к линиям тока, в однородной области газозвеси и поверхностью в сечении канала воздухозаборника, на которой необходимо определить параметры дисперсной фазы.

Обозначим: F_0 – площадь трубки тока в однородной области на поверхности, ограничивающей контрольный объем V ; F_1 – площадь контрольного сечения, в котором неизвестны параметры дисперс-

ной фазы. Концентрация частиц i -й фракции в однородной области:

$$k_{0i} = k_0 \frac{m_i}{\sum m_i}, \quad (8)$$

где k_0 – суммарная массовая концентрация частиц всех фракций в однородной области.

Расходы частиц i -й фракции через поверхности F_0 и F_1 соответственно:

$$\dot{m}_{0i} = k_{0i} \int_{F_0} V_{0i}^n dF_0; \quad \dot{m}_{1i} = \int_{F_1} \rho_{pli} V_{1i}^n dF_1, \quad (9)$$

где ρ_{pli} – определяемая плотность частиц; V_{0i}^n и V_{1i}^n – соответственно начальная, равная скорости воздушного потока, и определяемая скорости частицы.

Разделим объем V на $L \times M$ малых объемов ΔV_{lm} взаимно пересекающимися поверхностями тока. Обозначим: ΔF_{0lm} – площадь сечения трубки тока на границе объема ΔV_{lm} в однородной области; ΔF_{1lm} – площадь, ограничивающая объем ΔV_{lm} в контрольном сечении.

Площади F_0 и F_1 соответственно равны:

$$F_0 = \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \Delta F_{0lm}; \quad F_1 = \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \Delta F_{1lm}, \quad (10)$$

где L, M – соответственно количество трубок тока и угловых положений.

Тогда

$$\dot{m}_{0i} = \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \Delta \dot{m}_{0ilm}; \quad \dot{m}_{1i} = \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \Delta \dot{m}_{1ilm} \quad (11)$$

расход частиц i -й фракции через площадь

$$\Delta F_{0lm} : \Delta \dot{m}_{0ilm} = k_{0i} V_{0lm}^n \Delta F_{0lm}. \quad (12)$$

Рассчитывая траектории движения потоков масс \dot{m}_{0ilm} , с привлечением уравнения движения одиночной частицы вида до заданного сечения 1-1, будем считать, что:

1) траектории и параметры частицы i -й фракции, начинающей движение с середины площадки ΔF_{0lm} , характеризуют траекторию и параметры

всех частиц той же фракции, проходящих через эту площадку;

2) при переходе рассматриваемой частицы из одного малого объема ΔV_{ilm} в другой, все частицы, первоначально относящиеся к площадке ΔF_{0ilm} , переходят в тот же объем;

3) плотность потока массы $\dot{\Delta m}_{ilm}$ условно сохраняется постоянной, равной исходной концентрации k_{0i} , с учетом сказанного и того, что число частиц i -й фракции, попавших на элементарную площадку ΔF_{ilm} , равно K_{ilm} запишем

$$\dot{\Delta m}_{ilm} = k_{0i} \Delta F_{ilm} \sum_{j=1}^{K_{ilm}} V_{ilm(j)}^n, \quad (13)$$

где $V_{ilm(j)}^n$ – скорость j -го потока массы частиц i -й фракции, движущихся через площадку ΔF_{ilm} .

Учитывая, что среднеарифметическую скорость потока частиц i -й фракции в пределах площадки ΔF_{ilm} можно определить как

$$\langle V_{ilm}^n \rangle = \frac{1}{K_{ilm}} \sum_{j=1}^{K_{ilm}} V_{ilm(j)}^n, \quad (14)$$

можно рассчитать среднюю плотность потока массы

$\dot{\Delta m}_{ilm}$ по формуле

$$\langle \rho_{pilm} \rangle = \frac{\dot{\Delta m}_{ilm}}{\langle V_{ilm}^n \rangle \Delta F_{ilm}}. \quad (15)$$

Массовая концентрация частиц i -й фракции в пределах элементарной площадки ΔF_{ilm}

$$k_{ilm} = \frac{\dot{\Delta m}_{ilm}}{v_{ilm}^n \Delta F_{ilm}} = \frac{k_{0i} \Delta F_{ilm} \sum_{j=1}^{K_{ilm}} V_{ilm(j)}^n}{v_{ilm}^n \Delta F_{ilm}} \quad (16)$$

$$= \frac{k_{0i} \sum_{j=1}^{K_{ilm}} V_{ilm(j)}^n}{v_{ilm}^n},$$

где v_{ilm}^n – нормальная к площадке ΔF_{ilm} скорость воздушного потока.

Относительная массовая концентрация i -й фракции в пределах элементарной площадки ΔF_{ilm} :

$$\bar{k}_{ilm} = \frac{k_{ilm}}{k_{0i}} = \frac{\sum_{j=1}^{K_{ilm}} V_{ilm(j)}^n}{v_{ilm}^n}. \quad (17)$$

Относительная суммарная концентрация в пределах элементарной площадки:

$$\Delta F_{ilm} : \bar{k}_{ilm} = \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{\sum m_i} \bar{k}_{ilm}. \quad (18)$$

Относительная средняя концентрация в контрольном сечении:

$$\langle \bar{k}_l \rangle = \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \bar{k}_{ilm}}{L \times M}. \quad (19)$$

Окружная неравномерность концентрации в l -й трубке тока:

$$\delta_l = \frac{k_{il}^{\max} - k_{il}^{\min}}{k_{il}^{-p}}, \quad (20)$$

где k_{il}^{\max} , k_{il}^{\min} , k_{il}^{-p} – соответственно максимальная, минимальная и средняя концентрация в l -й трубке тока.

Радиальная неравномерность концентрации при m -м угловом положении

$$\delta_m = \frac{k_{1m}^{\max} - k_{1m}^{\min}}{k_{1m}^{-p}}, \quad (21)$$

где k_{1m}^{\max} , k_{1m}^{\min} , k_{1m}^{-p} – соответственно максимальная, минимальная и средняя концентрация при m -м угловом положении.

Удельный расход частиц i -й фракции на единицу площади:

$$\Delta F_{ilm} : \dot{\Delta m}_{ilm} = \frac{\dot{\Delta m}_{ilm}}{\sum_{i=1}^N \dot{\Delta m}_{ilm}} = \frac{\sum m_i \bar{k}_{ilm}}{\bar{k}_{ilm}}, \quad (22)$$

Определив значения $\dot{\Delta m}_{ilm}$ для всех фракций частиц, можно построить гистограмму распределе-

ния массы частиц по размерам в рассматриваемой площадке ΔF_{ilm} .

Модальный диаметр в пределах площадки

$$\Delta F_{ilm} : d'' = \frac{\sum_{i=1}^N d_i \Delta m_{ilm}}{\sum_{i=1}^N \Delta m_{ilm}} = \sum_{i=1}^N d_i \Delta m_{ilm} \quad (23)$$

3. Коэффициент восстановления полного давления

Установка роторного воздухоочистителя в воздухозаборное устройство ВРД ведет к уменьшению коэффициента восстановления полного давления на 2 – 3%.

Вопрос приемлемости такого снижения требует специального обсуждения.

Заключение

Изложенные в работе модели расчета эффективности воздухозаборных устройств с роторным воздухоочистителем позволяют оценить возможность защиты ВРД различных схем от попадания газозвеси в проточную часть.

Модели расчета основываются на балансовых уравнениях механики многофазных сред и уравнениях движения одиночной дисперсной частицы с учетом перехода из одной элементарной трубки тока несущего потока в другую.

Литература

1. Еникеев Г.Г., Гузаиров Р.М., Химич В.Л., Шарипов Г.З. Защита ГТД от морских аэрозолей с помощью роторных воздухоочистителей // Сб. тр. УАИ. – Уфа: УАИ, 1992. – С 132-151.
2. Химич В.Л., Еникеев Г.Г. Очистка воздуха на входе в ГТД от жидких аэрозолей // Испытания авиационных двигателей. – Уфа: УАИ, 1975. – № 3. – С. 79-81.
3. Химич В.Л., Еникеев Г.Г., Гузаиров Р.М. Выбор профиля рабочей решетки роторного воздухоочистителя // Тезисы докладов 30 НТК УАИ. – Уфа: УАИ, 1980. – С 49-50
4. Гузаиров А. Р., Еникеев Г.Г. Динамика твердых частиц пыли в ступени роторного воздухоочистителя // Проблемы и перспективы развития двигателестроения в поволжском регионе. Тезисы докладов межд. НТК, посвященной 55-летию Самарского госуд. аэрокосм. ун-та. – Самара: СГАУ, 1997.
5. Химич В.Л., Еникеев Г.Г. Экспериментальные исследования роторного воздухоочистителя ВРД // Испытания авиационных двигателей. – Уфа: УАИ, 1975. – С. 120-128.

Поступила в редакцию 30.05.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Х.С. Гумеров, Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа.

