

УДК 629.7.067

doi 10.54708/19926502_2024_28310556

Investigation of the aerodynamic resistance of gas turbine engine dust protection devices during two-phase flows

D.A. Emelyanov^a, S.Ya. Eliseev^b, D.A. Morozov^c

Air Force Education and Research Center “Air Force Academy named Prof. N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin”

Abstract. The paper deals with the topical problem of preventing dust and other foreign objects from entering the air intakes of helicopter turboshaft engines. A review of existing dust protection devices and methods for calculating pressure losses in them is presented. Based on experimental investigations, the values of the experimental coefficient for the Gasterstadt formula were obtained, which takes into account the effect of the mass concentration of the solid phase on pressure losses in dust protection devices. It was found that the pressure loss coefficient increases with increasing particle density. It has been established that the highest increase in pressure losses is observed in systems with concrete particles, which is associated with their high specific surface area, bulk density and shape. An equation is proposed for determining the pressure loss coefficient applicable to materials of different densities and specific surface areas. The results obtained can be used in the design and study of processes related to the movement of two-phase media, in particular, in the development of dust protection devices for helicopter turboshaft engines.

Keywords: dust protection device; aerodynamic resistance; pressure loss; dispersed particles; two-phase flow; concentration; dust collection.

^a vvavrn@bk.ru, ^b el-c@bk.ru, ^c dimon8-8@mail.ru

Исследование аэродинамического сопротивления пылезащитных устройств ГТД при течении двухфазных потоков

Д.А. Емельянов^a, С.Я. Елисеев^b, Д.А. Морозов^b

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

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема предотвращения попадания пыли и других посторонних предметов в воздухозаборники турбовальных двигателей вертолётов. Представлен обзор существующих пылезащитных устройств и методов расчёта потерь давления в них. На основе экспериментальных исследований получены значения опытного коэффициента для формулы Гастерштадта, который учитывает влияние массовой концентрации твёрдой фазы на потери давления в пылезащитных устройствах. Выявлено, что с увеличением плотности частиц возрастает коэффициент потерь давления. Установлено, что наиболее высокий рост потерь давления наблюдается в системах с частицами бетона, что связано с их высокой удельной поверхностью, насыпной плотностью и формой. Предложено уравнение для определения коэффициента потерь давления, применимое к материалам различной плотности и удельной поверхности. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и исследовании процессов, связанных с движением двухфазных сред, в частности, при разработке пылезащитных устройств для турбовальных двигателей вертолётов.

Ключевые слова: пылезащитное устройство, аэродинамическое сопротивление, потери давления, дисперсные частицы, двухфазный поток, концентрация, пылеулавливание.

^a vvavrn@bk.ru, ^b el-c@bk.ru, ^b imon8-8@mail.ru

Введение

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки устройств, предотвращающих попадание посторонних предметов, в частности пыли, в воздухозаборники турбовальных двигателей вертолётов.

Эксплуатация вертолётов часто осуществляется с неподготовленных площадок и аэродромов, где вихревой поток от лопастей несущего винта поднимает песок и пыль, которые попадают в двигатель. Это приводит к абразивному износу рабочих лопаток компрессора, преждевременному износу двигателя и сокращению его срока службы [1].

Ежегодно вертолётные двигатели досрочно снимаются с эксплуатации из-за повреждения или разрушения рабочих лопаток компрессора, вызванных попаданием в воздухозаборник льда, песка, пыли и других посторонних предметов. Это связано с плохим состоянием покрытия аэродромов и использованием вертолётов на неподготовленных площадках.

Основная часть

В вертолётных газотурбинных двигателях применяются пылезащитные устройства (ПЗУ) для очистки воздуха от песка, пыли и других мелких частиц, находящихся вблизи поверхности земли. ПЗУ устанавливаются перед воздухозаборником двигателя для защиты проточной части от абразивного износа.

В настоящее время в мировом вертолётостроении наиболее широкое применение нашли следующие типы ПЗУ [2]:

- инерционное ПЗУ грибкового типа;
- мультициклонное ПЗУ;
- барьерное ПЗУ.

Наиболее широкое применение в отечественном вертолётостроении нашло пылезащитное устройство грибкового типа (Рис. 1). Оно удаляет крупные частицы песка и пыли из воздуха, поступающего в двигатель. Данное ПЗУ обладает рядом достоинств, среди которых простота конструкции, относительно небольшой вес и высокий уровень контроля. Однако существуют и некоторые недостатки: необходимость установки системы против обледенения, сравнительно невысокая степень очистки (70–75 %), необходимость забора воздуха из двигателя компрессора и большие габаритные размеры.

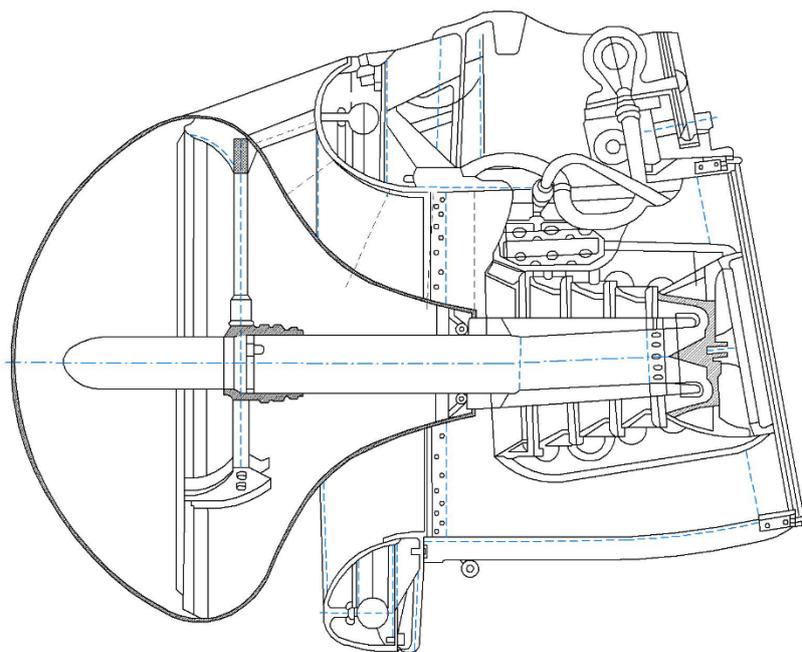


Рисунок 1. Инерционное ПЗУ грибкового типа.

Потери давления в пылезащитном устройстве являются основной энергетической характеристикой, которая определяет эффективность очистки воздуха от пыли и других загрязнителей. Потери давления связаны с работой силовой установки и элементов системы фильтрации, которые используются для удаления частиц пыли из воздуха. Чем меньше потери давления, тем более эффективно работает пылезащитное устройство.

В условиях высокой запыленности газа основная особенность работы ПЗУ заключается в том, что материалы имеют различные плотности и концентрации. При использовании ПЗУ предъявляются определённые требования к расчётам аэродинамического сопротивления, в частности учёт массовой концентрации [3].

Для того чтобы правильно описать процесс аэродинамических потерь давления в устройствах подобного рода, необходимо учитывать концентрацию твёрдой фазы в двухфазных потоках при очистке воздуха в ПЗУ [4].

Основные методы решения задачи определения потерь давления в ПЗУ основаны на использовании экспериментальных данных и опытных коэффициентов. Эти коэффициенты учитывают особенности конструкции ПЗУ, а также условия эксплуатации.

Физические явления, происходящие в ПЗУ, могут быть сложными и трудными для анализа, так как они связаны с движением двухфазных потоков. Кроме того, различные физические свойства частиц, которые находятся в двухфазном потоке, могут влиять на его движение и распределение в объёме воздушного потока [5]. Эти факторы могут затруднить расчёт и прогнозирование поведения двухфазного потока.

Из этого следует, что расчёт по определению потерь давления в ПЗУ является сложной задачей, требующей знания многих параметров. Экспериментальные измерения позволяют определить эти параметры с достаточной точностью для проведения расчётов.

Для получения потерь давления в зависимости от массовой концентрации необходимо провести аэродинамические исследования двухфазной среды, состоящей из частиц пыли ($\rho=1200 \text{ кг/м}^3$), песка ($\rho=1900 \text{ кг/м}^3$) и бетона ($\rho=2600 \text{ кг/м}^3$) с различной массовой концентрацией. Результаты исследований могут быть использованы для определения подходящего уровня концентрации частиц в двухфазной системе, чтобы обеспечить минимальные потери давления и максимальную эффективность работы оборудования.

Потери давления в ПЗУ при очистке воздушного потока могут быть записаны в виде [6]:

$$\Delta P = P_0 (1 + k\mu), \quad (1)$$

где k – опытный коэффициент, используемый для описания характеристик двухфазных потоков, P_0 – потери давления несущей среды (воздуха).

В общем случае опытный коэффициент определяется экспериментально путём измерения параметров двухфазного потока в различных условиях и последующей обработки полученных данных. Затем на основе полученных результатов строятся эмпирические зависимости, которые позволяют прогнозировать характеристики потока в новых условиях.

Опытный коэффициент позволяет более точно прогнозировать поведение двухфазных систем, что, в свою очередь, позволяет улучшить эффективность улавливания дисперсных частиц в ПЗУ [7].

В экспериментальных исследованиях были измерены параметры, такие как барометрическое давление, температура и относительная влажность воздуха, статическое давление воздушного потока, расход воздуха, насыпная плотность материала и время прохождения его по трубопроводу. С использованием этих данных было рассчитано сопротивление двухфазному потоку.

Геометрические параметры воздухозаборника составляют 0,5 метра в длину и 125 мм в диаметре, скорость воздушного потока равна 4 м/с, а потери давления чистого воздуха в воздуховоде составляют 10 Па [8].

Эксперимент проводился в течение 30 минут, его результаты приведены на Рис. 2.

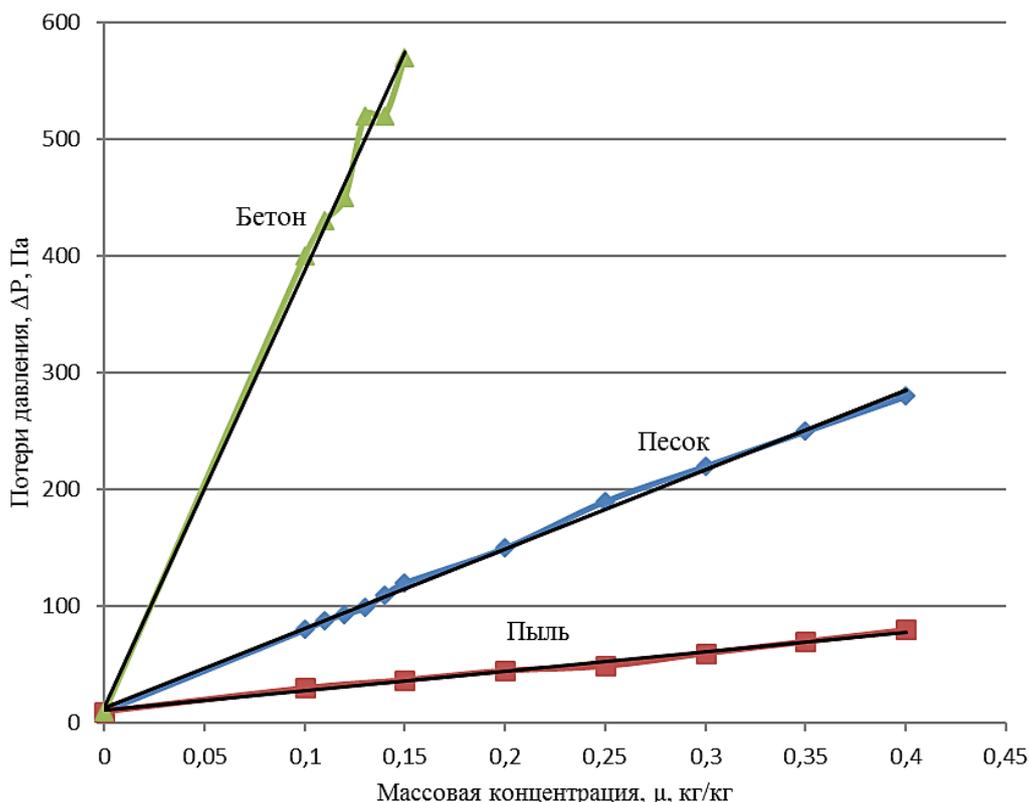


Рисунок 2. Зависимость потерь давления ΔP от массовой концентрации материала в ПЗУ μ .

Экспериментально были получены значения k , которые составили для частиц бетона $k=245\pm 10$, частиц песка $k=70\pm 5$ и частиц пыли $k=15\pm 3$.

Из Рис. 2 видно, что наибольший рост потерь давления наблюдается в системах с частицами бетона. Это связано с высокой удельной поверхностью (более $660 \text{ м}^2/\text{кг}$), насыпной плотностью (менее $1200 \text{ кг}/\text{м}^3$) и формой частиц бетона, которые способствуют удару частиц о стенки ПЗУ и их взаимодействию, вызванному поверхностной активностью частиц. Это связано с тем, что частицы имеют высокую поверхностную энергию и могут взаимодействовать друг с другом, что приводит к потере энергии и снижению давления в системе.

Поэтому совокупность физико-химических параметров, таких как плотность, удельная поверхность и взаимодействие частиц, определяет преобладание потерь давления в ПЗУ за счёт ударов жёстких частиц о стенки и их взаимодействия [9].

Полученный коэффициент аэродинамического сопротивления учитывает не только плотность материала, но и форму частиц и их размеры, что делает его более точным и универсальным для различных материалов. Как видно из рисунка 2, с увеличением плотности частиц возрастает коэффициент k в уравнении (1).

Частицы пыли и песка, имеющие невысокую насыпную плотность ($\rho_{\text{нас}} = 200\text{-}800 \text{ кг}/\text{м}^3$), имеют форму, значительно отличающуюся от шарообразной, с коэффициентом формы от 2 до 4.

Для вычисления коэффициента k используется формула Дюрана [10]:

$$k = \frac{v_{\text{сум}}}{\sqrt{d_q}} \left(\frac{gD}{v^2} \cdot \frac{v_{\text{сум}}}{\sqrt{gd_q}} \right)^{3/2} \quad (2)$$

где D – диаметр воздухозаборника, м.

Результаты расчёта по формуле (2) показывают, что коэффициент k для частиц диаметром 1 мм составляет 16 для пыли, 75 для песка и 237 для бетона. Согласование расчётных данных с результатами экспериментов подтверждает достоверность полученных результатов.

На основе проведённых исследований определена зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления двухфазного потока от плотности твёрдой фазы (Рис. 3) и предложено уравнение для определения коэффициента k , которое применимо к материалам с плотностью от 1200 до 2600 кг/м³ и удельной поверхностью от 400 до 800 м²/кг в пределах изменения коэффициента μ до 0,5 кг_T/кг_B:

$$k = 0,22 \cdot \rho_m - 0,16 \cdot S - 21; R_{xy} = 0,974, \quad (3)$$

где ρ_m – плотность материала, кг/м³, S – удельная поверхность, м²/кг.

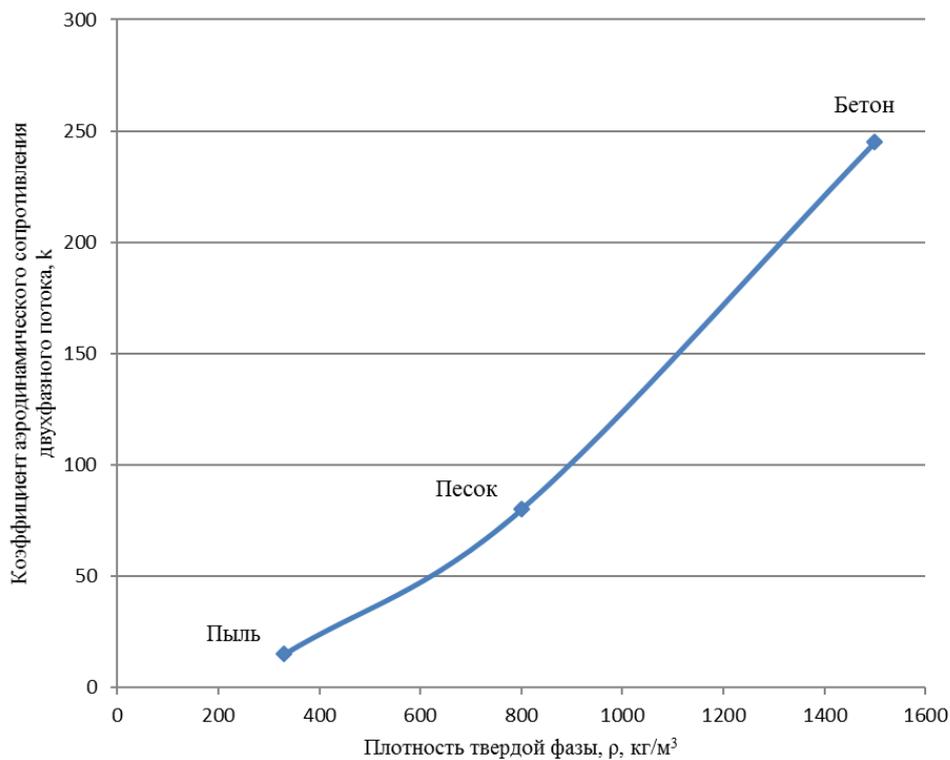


Рисунок 3. Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления двухфазного потока от плотности твёрдой фазы.

Результаты исследований двухфазных потоков показали, что для более тяжёлых и плотных частиц потери давления будут выше при той же концентрации твёрдой фазы, чем для лёгких и менее плотных частиц. Однако точные значения коэффициента зависят от многих факторов, таких как форма частиц, их размер, скорость потока и других. Установлено, что при увеличении плотности дисперсных частиц возрастает значение коэффициента в уравнении потерь давления.

Заключение

В ходе исследования получены следующие результаты:

1) Выявлена зависимость потерь давления от массовой концентрации твёрдой фазы в системе. Результаты экспериментальных исследований позволяют оценить влияние массовых концентраций дисперсных частиц на потери давления в двухфазных системах и могут быть использованы при проектировании и исследовании процессов, связанных с движением двухфазных сред.

2) Получены значения коэффициента k для формулы Гастерштадта, которые составили для частиц бетона $k=245\pm 10$, для частиц песка $k=70\pm 5$ и для частиц пыли $k=15\pm 3$. Так как исследуемые материалы отличаются формой и размерами, то с увеличением плотности частиц

возрастает коэффициент k , который представляет собой опытный коэффициент, зависящий от основных характеристик газодисперсного потока.

3) Выявлен наиболее высокий рост потерь давления у двухфазных потоков, твёрдую часть которых составляют частицы бетона, так как у его многогранных частиц физико-химические свойства обуславливают преобладание потерь давления за счёт удара жёстких частиц о стенки пылезащитного устройства, а также их взаимодействия, обусловленного высокой поверхностной активностью совокупности частиц.

Литература:

1. Гинзбург Л.Е., Никитин Е.И. Исследование запыленного воздуха вблизи вертолетов Ми-1 и Ми-4 в эксплуатационных условиях. М.: Машиностроение. 1966. 145-165 с. [L.E. Ginzburg, E.I. Nikitin Investigation of dusty air near Mi-1 and Mi-4 helicopters in operational conditions. (in Russian). Moscow: Mashinostroenie. 1966. 145-165 p.]
2. Гишваров А.С., Аитов Р.Р., Айтумбетов А.М. Исследование эффективности пылезащитных устройств вертолетных газотурбинных двигателей // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19. №2 (68). С. 100-110. [A.S. Gishvarov, R.R. Aitov, A.M. Aytumbetov. Study the effectiveness of the dust devices. (in Russian). Vestnik UGATU. 2015. Vol. 19. No. 2 (68). pp. 100-110.]
3. Minko V.A., Il'ina T.N., Emelyanov D.A. Methodological bases for calculation of the aspiration ventilation systems // International Journal of Pharmacy Technology. 2016. Vol. 8, № 4. P. 26644-26652.
4. Sevostyanov M.V., Il'ina T.N., Sevostyanov W.S., Emelyanov D.A. About the role of surface phenomena in the processes of processing of the dispersed materials // Research Journal of Applied Sciences. 2015. №10. P. 684-689.
5. Емельянов Д.А., Ильина Т.Н. О скорости витания техногенных волокнистых материалов // Актуальные проблемы развития науки и образования: сборник научных трудов по материалам междунар. научн.-практ. конф. 5 мая 2014 г. М.: «АР-Консалт». 2014. С. 109-112. [D.A. Emelyanov, T.N. Il'ina On the soaring speed of technogenic fibrous materials. (in Russian). Topical Problems of the Development of Science and Education: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference held on May 5, 2014. Moscow: AR-Consult. 2014. pp. 109-112.]
6. Гастерштадт И. Пневматический транспорт. Л.: Северо-Западное промбюро. 1927. 119 с. [I. Gasterstadt Pneumatic Transport. (in Russian). Leningrad: Severo-Zapadnoe Promburo. 1927. 119 p.]
7. Минко В.А., Ильина Т.Н., Минко А.В., Емельянов Д.А. К расчету воздухопроводов для двухфазных потоков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2016. №4. С. 648-656. [V.A. Minko, T.N. Il'ina, A.V. Minko, D.A. Emelyanov Calculation of ducts for two-phase flows. (in Russian). Transactions of TSTU. 2016. No. 4. pp. 648-656.]
8. Севостьянов В.С., Ильина Т.Н., Севостьянов М.В., Емельянов Д.А., Кошуков А.В. Устройство для пневмомеханического гранулирования техногенных материалов. Патент на изобретение РФ № 2538579. 10.01.2015. Бюл. №1. [V.S. Sevost'yanov, T.N. Il'ina, M.V. Sevost'yanov, D.A. Emel'janov, A.V. Koshchukov Device for pneumatic mechanical granulating of man made materials. (in Russian). Russian Federation patent No. 2538579. 10.01.2015. Bul. No. 1.]
9. Клячко Л.С. Аналитический метод учета потери давления в трубопроводе с потоками, несущими твердую дисперсную фазу // Сб. тр. ВНИИГИС. 1970. № 28. С. 125-127. [L.S. Klyachko Analytical method of accounting for pressure loss in a pipeline with flows carrying a solid dispersed phase. (in Russian). Collection of papers of VNIIGIS. 1970. No. 28. pp. 125-127.]
10. Шиляев М.И., Шиляев А.М. Аэродинамика и тепломассообмен газодисперсных потоков: Учебное пособие. Томск: Изд-во Томск. гос. архит.-строит. ун-та. 2003. 272 с. [M.I. Shilyaev, A.M. Shilyaev Aerodynamics and Heat and Mass Transfer of Gas-Dispersed Flows: study guide. (in Russian). Tomsk: Tomsk State University of Architecture and Building. 2003. 272 p.]

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; vvavrn@bk.ru.

ЕЛИСЕЕВ Сергей Яковлевич, канд. хим. наук, ст. преп. каф. авиационных двигателей ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина». Дипл. инженера-химика (ВГУ, 1989). Иссл. в обл. технической термодинамики; el-c@bk.ru.

МОРОЗОВ Дмитрий Александрович, курсант 5-го курса ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина». Иссл. в обл. пылезащитных устройств; dimon8-8@mail.ru.

Metadata:

Title: Investigation of the aerodynamic resistance of gas turbine engine dust protection devices during two-phase flows.

Author 1: Dmitry Alexandrovich Emelyanov, Cand. of Tech. Sci., Assoc. Prof. at the Dept. of Aviation Engines of the Air Force Education and Research Center “Air Force Academy named Prof. N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin”. Dipl. engineer (BSTU, 2013). Research in the field of two-phase flows.

Author 2: Sergey Yakovlevich Eliseev, Cand. of Chem. Sci., Senior Lecturer at the Dept. of Aviation Engines of the Air Force Education and Research Center “Air Force Academy named Prof. N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin”. Dipl. chemical engineer (VSU, 1989). Research in the field of technical thermodynamics.

Author 3: Dmitry Alexandrovich Morozov, 5th year cadet of the Air Force Education and Research Center “Air Force Academy named Prof. N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin”.

Abstract: The paper deals with the topical problem of preventing dust and other foreign objects from entering the air intakes of helicopter turboshaft engines. A review of existing dust protection devices and methods for calculating pressure losses in them is presented. Based on experimental investigations, the values of the experimental coefficient for the Gasterstadt formula were obtained, which takes into account the effect of the mass concentration of the solid phase on pressure losses in dust protection devices. It was found that the pressure loss coefficient increases with increasing particle density. It has been established that the highest increase in pressure losses is observed in systems with concrete particles, which is associated with their high specific surface area, bulk density and shape. An equation is proposed for determining the pressure loss coefficient applicable to materials of different densities and specific surface area. The results obtained can be used in the design and study of processes related to the movement of two-phase media, in particular, in the development of dust protection devices for helicopter turboshaft engines.

Keywords: dust protection device, aerodynamic resistance, pressure loss, dispersed particles, two-phase flow, concentration, dust collection.