

УДК 621.45.035:621.45.02

Я. В. ДВИРНИК¹, Д. В. ПАВЛЕНКО²¹ *АО "МОТОР СИЧ", Запорожье, Украина*² *Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина*

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕЧЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА ВО ВХОДНОМ УСТРОЙСТВЕ ВЕРТОЛЕТНЫХ ГТД

Приведены результаты численного моделирования течения воздушного потока с частицами пыли различного размера в проточной части воздухозаборника вертолетного газотурбинного двигателя при использовании и без использования пылезащитного устройства. Установлены основные закономерности течения двухфазного потока во входном устройстве ГТД в зависимости от размера частиц. Показано, что использование пылезащитных устройств не приводит к полному устранению частиц пыли. Произведена оценка возможности замещения моделирования двухфазного потока в проточной части компрессора ГТД однофазным.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, входное устройство, пылезащитное устройство, компрессор, поток, частица, метод конечных элементов, моделирование, износ.

Введение

Одной из тенденции развития современной авиации, диктуемой экономическими условиями, является переход к системе ремонта авиационной техники по "потребности" или "живучести". Их внедрение позволяет значительно снизить эксплуатационные затраты, связанные с необоснованным ремонтом или заменой узлов и отдельных деталей летательных аппаратов. Однако, внедрение прогрессивных систем ремонта невозможно без развития и совершенствования методов контроля и диагностики, разработки моделей изнашивания основных деталей и их разрушения. Активно развивающиеся в последнее время численные методы моделирования напряженно-деформированного состояния деталей, потоков газа в проточной части двигателя, горения и других процессов позволяют значительно ускорить переход к прогрессивным системам ремонта авиационной техники. При этом одна из задач, связанная с оценкой остаточного ресурса лопаток компрессора вертолетных газотурбинных двигателей, эксплуатирующийся в условиях запыленной атмосферы, требует установления основных закономерностей течения потока во входном устройстве и проточной части компрессора. Учитывая высокие требования к ресурсам вычислительной техники при трехмерном моделировании потока, актуальной становится также задача оценки возможности замещения моделирования двухфазного потока в проточной части компрессора ГТД однофазным.

1. Анализ исследований в области моделирования потоков в ГТД

Проблеме эксплуатации двигателей в условиях запыленной атмосферы посвящено достаточно большое количество исследований. Однако, малая часть из них раскрывают проблематику течения двухфазных потоков в тракте двигателя. В работе [1] проводились расчеты течений двухфазного потока численным методом с целью определения скорости и концентрации частиц пыли, однако экспериментальные исследования проводились в идеализированном окружном канале и в двухмерной постановке. В работе [2], используя известные данные генератора сжатого воздуха ГСВ-95, была построена расчетным путем нижняя граница пылевой зоны по высоте проточной части. Было установлено, что по мере удаления частиц от входа, нижняя граница зоны запыленности удаляется от втулки. Внутри этой зоны концентрация частиц неравномерна, она нарастает от нижней границы к периферии.

Таким образом, анализ существующих работ показал, что в настоящее время отсутствуют результаты исследований, которые могут являться надежной основой для установления закономерностей течения двухфазного потока.

Целью работы является установления основных закономерностей течения двухфазного потока во входном устройстве вертолетных ГТД, а также оценки возможности моделирования газодинамических процессов в проточной части двигателя однофазным потоком.

В настоящей работе двухфазный поток (воздух-пыль) моделировался методом конечных элементов в трехмерной постановке с учетом его движения в реальном входном устройстве ГТД с предустановленным пылезащитным устройством. Из опыта эксплуатации ГТД в условиях запыленной атмосферы известно, что в случае наличия в воздушном потоке частиц размером до 1 мм происходит процесс изнашивания лопаток компрессора по механизму пылевой эрозии. Интенсивность данного вида эксплуатационного повреждения зависит от концентрации посторонних частиц в воздухе, которое в наиболее запыленных мест эксплуатации может достигать до 3 г/см^2 [3].

Одной из особенностей эксплуатации отечественной авиационной техники в зоне пустынь (Северной Африки, Ближний Восток), помимо большой температуры атмосферного воздуха является высокая концентрация пыли и песка в атмосфере и подъем ее до высоты 6000 м. Так, например, в районе эксплуатации вертолетов Ми-8 с двигателями ТВЗ-117 – Северном Судане концентрация пыли составляет $1,3 \text{ г/м}^3$, а в Алжире $1,3...1,6 \text{ г/м}^3$ (рис. 1).

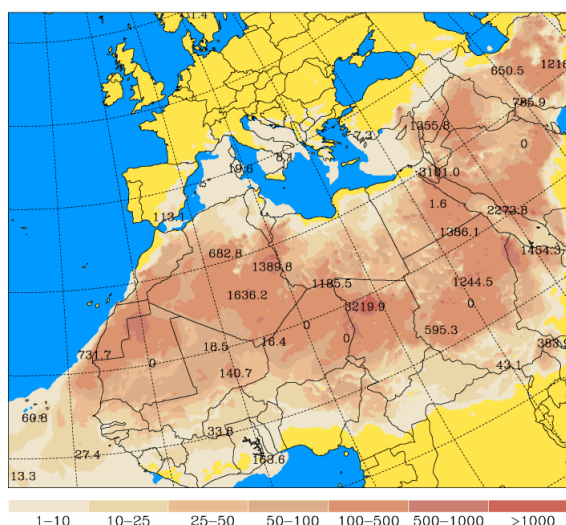


Рис. 1. Концентрация пыли в районе Африканского и Европейского континентов (мг/см^3) [4]

Компрессоры вертолетных ГТД подвержены значительной эрозии от песка и других частиц, которые попадают в воздухозаборник. Для их защиты на входе в тоннели воздухозаборников предусматривают пылезащитные устройства (ПЗУ). В настоящее время вкладываются большие инвестиции в создание ПЗУ различных конструкций, уменьшающих количество абразива, всасываемого в газоздушный тракт двигателя, и создание эрозионно-стойких защитных покрытий, повышающих устойчивость изделий к газоабразивному изнашиванию.

Как правило ПЗУ могут быть инерционного принципа действия, производимые в основном на постсоветском пространстве и получившие там большую популярность, и вихревого принципа действия, используемые на зарубежных летательных аппаратах. Пример инерционного ПЗУ, использующегося на вертолетах отечественного производства, показан на рис. 2.

Пылезащитное устройство состоит из входного тоннеля 5, центрального обтекателя 2, сепаратора 6, эжектора 1, переходника между входным тоннелем и капотом эжектора, трубопроводов и противообледенительной системы.

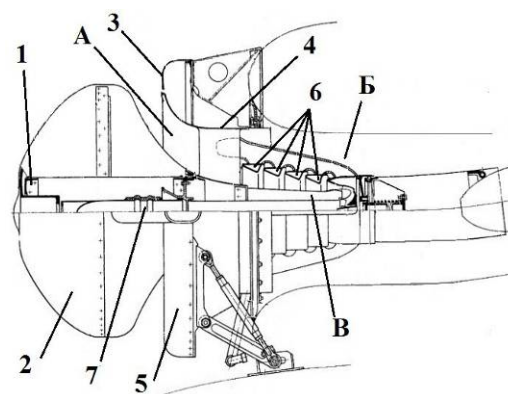


Рис. 2. Схема работы пылезащитного устройства инерционного типа:

- 1 – эжектор; 2 – центральный обтекатель;
- 3 –коллекторная губа; 4 – внешняя обечайка;
- 5 – входной тоннель; 6 – сепаратор;
- 7 – трубопровод; А – кольцевой тоннель; Б – канал;
- В – канал сепаратора

При работе двигателя, запыленный воздух проходит через входной кольцевой искривленный тоннель А, образованный задней частью обтекателя 2, коллекторной губой 3 и внешней обечайкой 4. При этом под действием центробежных сил частицы пыли прижимаются к поверхности обтекателя и, перемещаясь вместе с частью воздуха, попадают на вход сепаратора 6 в канал В, представляющий собой пылевую ловушку. Большая часть запыленного воздуха, очистившись от пыли в первой ступени ПЗУ (искривленном тоннеле А), проходит по каналу Б, образованному внешней обечайкой 4 и сепаратором 6, на вход в двигатель. Наиболее запыленный воздух (пылевой концентрат) проходит в канал В и далее в трубопровод 7 вывода пыли. За счет разрежения, создаваемого эжектором, пылевой концентрат отсасывается и выбрасывается за борт вертолета в атмосферу.

Однако, опыт эксплуатации вертолетных ГТД показывает, что использование ПЗУ описанного типа не избавляет эксплуатанта от проблемы эрозии

онного износа лопаток компрессора под воздействием частиц пыли.

Для определения эффективности ПЗУ, эксплуатирующего с двигателями семейства ТВ3-117, было смоделировано течение запыленного воздуха в виде многофазного потока методом конечных элементов. [5]

2. Методика моделирования

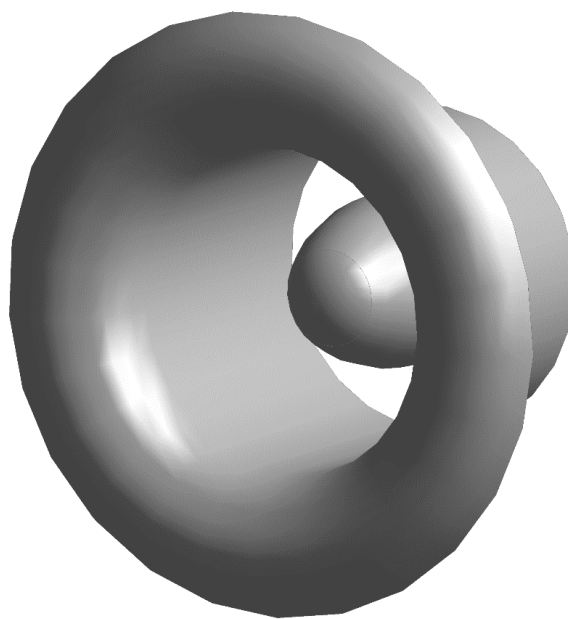
Моделирование многофазных потоков имеет ряд сложностей по сравнению с однофазными, поскольку необходимо решать уравнения массы, количества движения и сохранения энергии для каждой фазы в отдельности. Эти уравнения намного сложнее по сравнению с однофазными течениями, так как в них присутствуют дополнительные члены, регулирующие обмен массой и энергией между фазами. При этом вследствие различных сопутствующих физических явлений и возможных изменений режима течения, точное значение дополнительных членов не всегда известно.

Для решения поставленных задач рассматривались многофазные дисперсные течения, в которых присутствует одна непрерывная, а также одна дисперсионная фаза. Дисперсные фазы содержали множество частиц, распределенных в непрерывной фазе. Для моделирования использовали модель Эйлера и программный комплекс ANSYS CFX. Отдельно для каждой фазы решали уравнения массы, количества движения и сохранения энергии. В уравнениях движения учитывали межфазовую силу сопротивления и другие силы, наблюдаемые в многофазных дисперсных системах. В результате расчетов определяли локальную скорость потока, температуру и объемную долю дисперсной фазы. Использовали модель гранулирования, учитывающую столкновение частиц, трение и плотность их размещения [6].

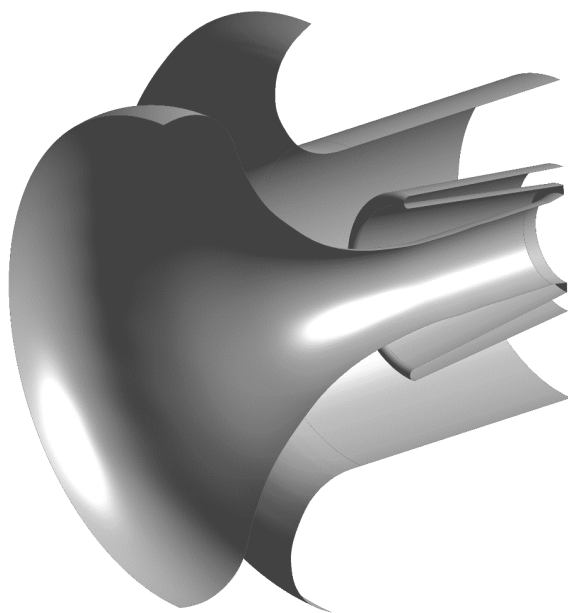
Для моделирования двухфазного течения и получения результатов по скорости движения и распределения частиц пыли в воздухе, были определены следующие граничные условия:

- геометрическая модель входного устройства;
- концентрация, размер и химический состав частиц пыли;
- давление и скорость воздушного потока во входном устройстве.

В качестве геометрической модели использовали твердотельную модель проточной части входного кольцевого тоннеля без ПЗУ (рис. 3 а) и с ПЗУ инерционного типа (рис. 3 б).



а



б

Рис. 3. Модель проточной части входного кольцевого тоннеля без:
а – без ПЗУ; б – с ПЗУ инерционного типа

Для твердотельных моделей проточной части в программном комплексе IcemCFD была построена расчетная сетка конечных элементов. Из условий окружной симметрии моделировали сектор с углом в 30 градусов (рис. 4).

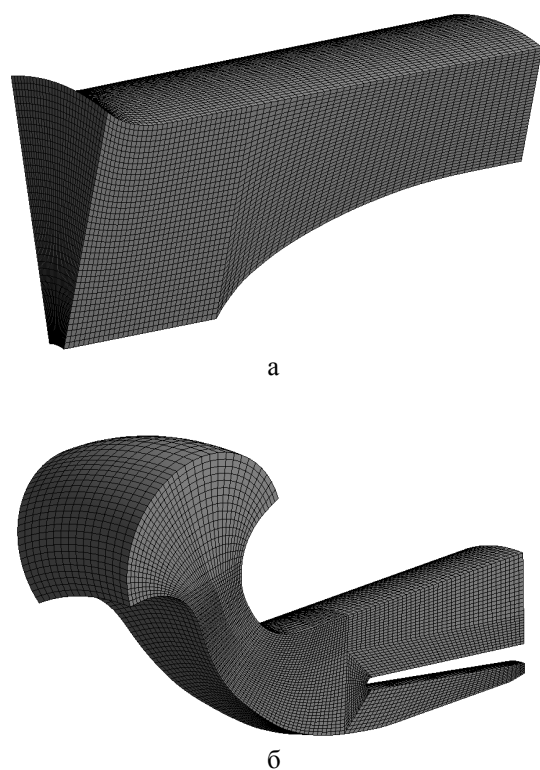


Рис. 4. Расчетная сетка проточной части:
а – без ПЗУ; б – с ПЗУ инерционного типа

В качестве граничных условий задавали:

- модель течения – двухфазное;
- полное давление на входе в двигатель – 101325 Па;
- скорость на выходе – 150 м/с;
- температура – 288 К;
- модель турбулентности – к-ε;
- концентрация пыли на входе – 2 г/см²;
- материал посторонних частиц – кварцевый песок;
- размер частиц – моделировались два варианта с диаметром частиц от 10 до 50 мкм и от 50 до 100 мкм.

3. Результаты моделирования и их анализ

Для сравнительного анализа поведения частиц пыли во входном аппарате двигателя был смоделирован входной тоннель без ПЗУ. Анализ полей скоростей и траекторий движения частиц во входном тоннеле ГТД без ПЗУ показал (рис. 5), что частицы песка распределены равномерно по объему потока, однако различается траектория их движения. В случае более мелкой фракции частиц, траектории движения более плавные и повторяют линии тока потока воздуха (рис. 5 а). Траектория движения более крупных частиц (рис. 5 б) подвержена действию

инерционных сил, в следствие чего частицы соударяются со стенками входного тоннеля, в последствии вызывая эрозию входного тракта ГТД.

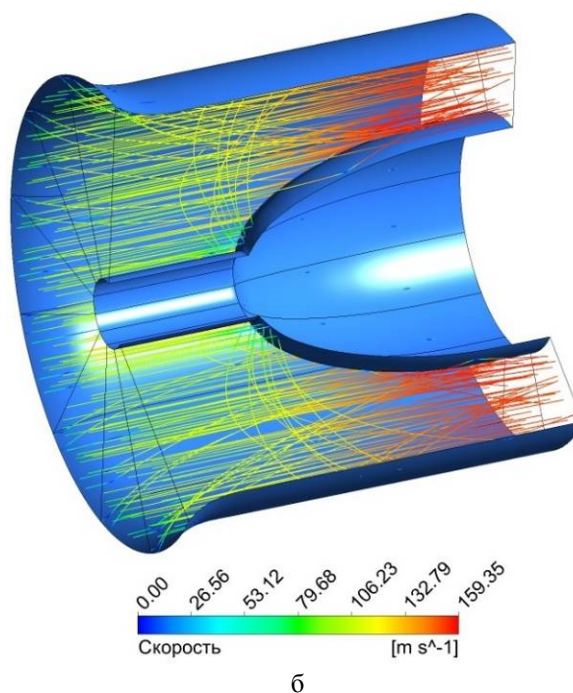
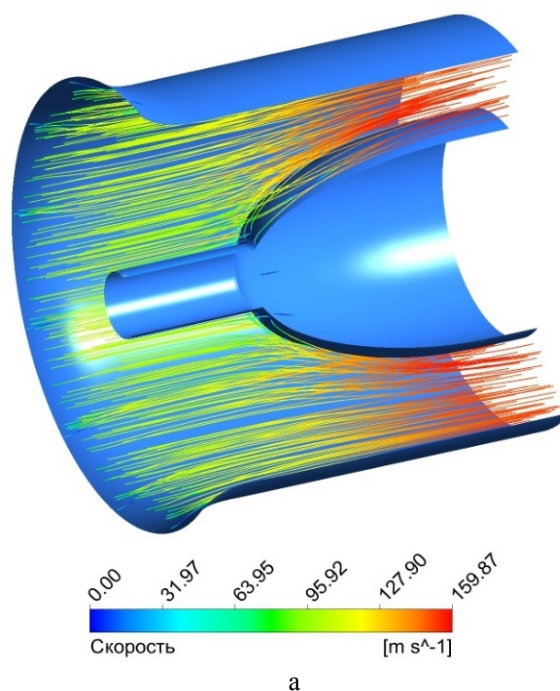


Рис. 5. Распределение скорости частиц во входном тоннеле без ПЗУ для частиц размером:
а – 10...50 мкм; б – 50...100 мкм

На рис. 6, 7 приведены результаты моделирования течения двухфазного потока во входном устройстве двигателя с установленным ПЗУ при размере посторонних частиц 10...50 мкм.

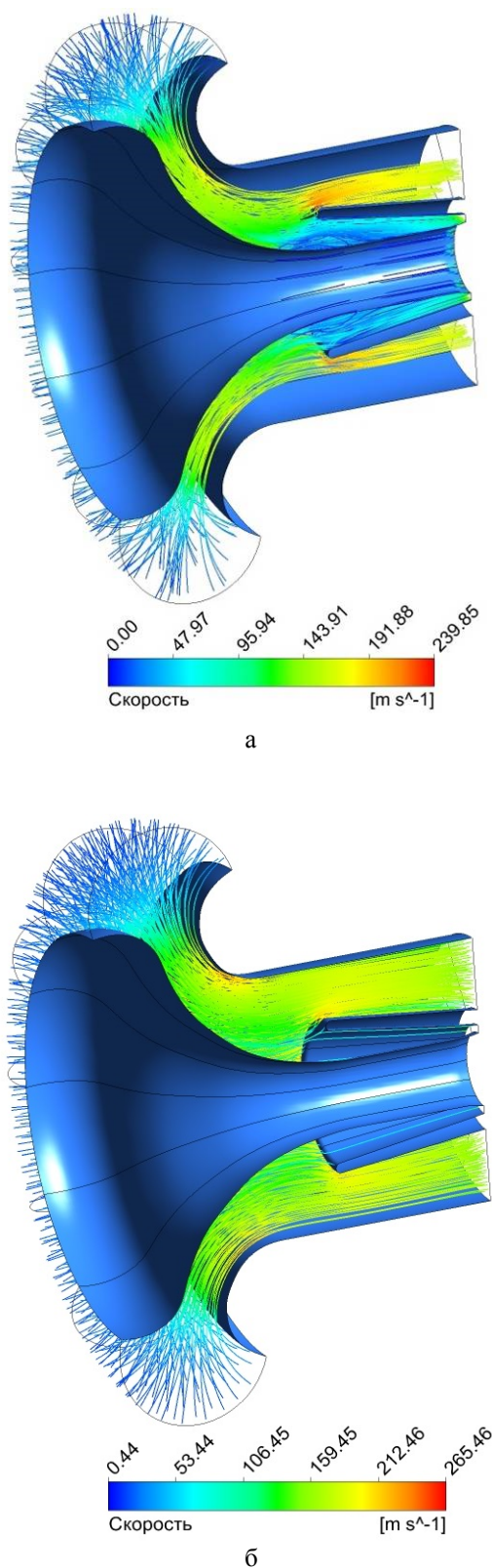


Рис. 6. Траектория и скорость движения:
 а – частиц во входном устройстве
 ГТД с ПЗУ (размер частиц 10...50 мкм);
 б – линий воздушного потока

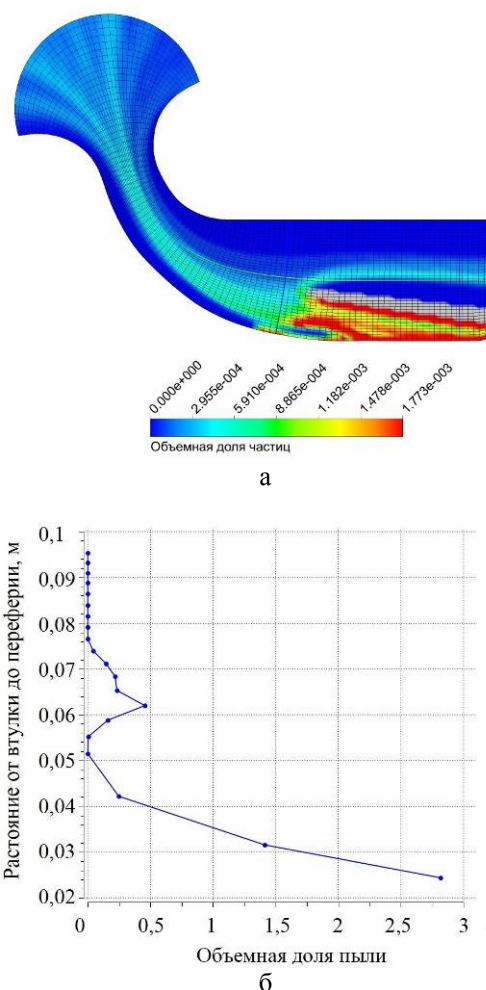


Рис. 7. Распределение удельного объема
 частиц размером 10...50 мкм:
 а – в продольном сечении входного устройства ГТД;
 б – радиальная зависимость удельного объема
 посторонних частиц на выходе из входного аппарата

На рис. 8, 9 приведены результаты моделирования течения двухфазного потока во входном устройстве двигателя с установленным ПЗУ при размере посторонних частиц 50...100 мкм.

Анализ результатов моделирования скорости и траектории движения посторонних частиц различного размера в воздушном тракте входного устройства ГТД показал, что большая часть частиц сепарируется по внутренней криволинейной поверхности гриба ПЗУ под действием центробежных сил. При этом ПЗУ инерционного типа хорошо сепарирует крупные фракции частиц размером от 50 до 100 мкм, практически полностью отчищая воздух, подаваемый в компрессор двигателя (рис. 8). В случае, если размер частиц относительно мал – от 10 до 50 мкм, около 20% частиц поступает в компрессор двигателя минуя сепаратор ПЗУ под воздействием вязких сил следуя за потоком (рис. 6).

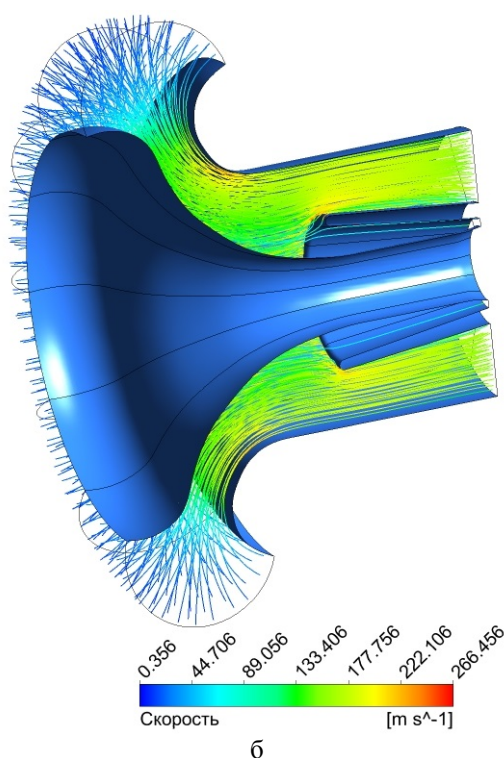
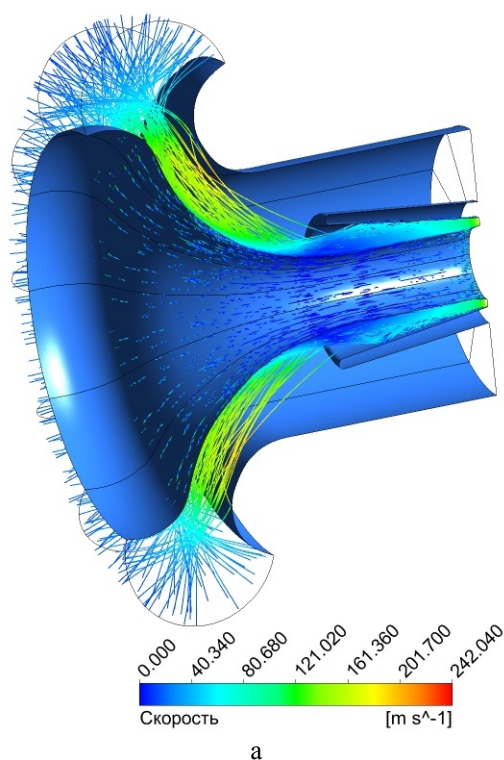


Рис. 8. Траектория и скорость движения:
а – частиц во входном устройстве ГТД с ПЗУ (размер частиц 50...100 мкм);
б – линий воздушного потока

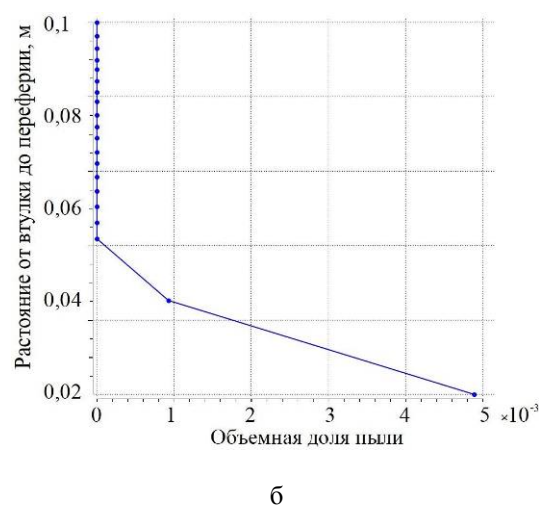
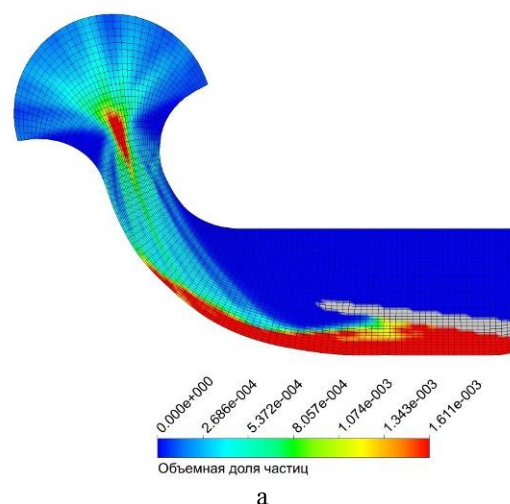


Рис. 9. Распределение удельного объема частиц размером 50...100 мк:
а – в продольном сечении входного устройства ГТД;
б – радиальная зависимость удельного объема посторонних частиц на выходе из входного аппарата

Заключение

Таким образом, по результатам моделирования двухфазного потока в проточной части воздухозаборника ГТД с различными условиями можно сделать следующие выводы.

1. Объемная доля абразива, по отношению к воздуху поступающего в компрессор двигателя, не превышает $5 \cdot 10^{-3}$ ед. (0,5%) в различных радиальных сечениях на выходе из воздухозаборника ГТД. Несмотря на то, что данная концентрация посторонних частиц вызывает интенсивный износ пера рабочих лопаток компрессора, она достаточно мала и не оказывает существенного влияния на закономерности движения потока. Это позволяет пренебречь дисперсной фазой при последующем газодинамическом

расчете осевого компрессора целиком и вместо двухфазного течения использовать однофазное.

2. Наличие пылезащитных устройств на входном устройстве вертолетных ГТД эксплуатирующихся в условиях запыленных атмосфер не приводит к полному устранению пыли и, как следствие, эрозионному изнашиванию деталей проточной части ротора и статора компрессора.

Литература

1. Гумеров, А. В. *Предельное состояние осевого компрессора ГТД в условиях эксплуатации в запыленной атмосфере* [Текст] : дис. ... канд. тех. наук : 05.07.05 : защищена 2011 : утв. 30.06.2011 / Гумеров Александр Витальевич. – Уфа, 2011. – 146 с.

2. Кривошеев, И. А. *Особенности движения частиц пыли в проточной части и изменения геометрии лопаток компрессоров в процессе эксплуатации газотурбинных установок* [Текст] / И. А. Кривошеев, Р. Ф. Камаева, С. А. Струговец // Вестник УГАТУ. – Уфа : УГАТУ, 2011. – Т. 15, № 3 (43). – С. 18–24.

3. *Основы конструирования, производства и эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей и энергетических установок в системе CALS технологий: Эксплуатация и надежность ГТД и ЭУ* [Текст] / Н. Н. Сиротин, Е. Ю. Марчуков, А. Н. Сиротин и др. – М. : НАУКА, 2012. – 615 с.

4. *Прогноз от пыли* [Электронный вариант]. – Режим доступа: <http://forecast.uoa.gr/dustindx.php>. – 12.09.2016.

5. ANSYS CFX, Release 18.0 user guide [Text].

6. ANSYS Advantage. Русская редакция [Text]. – 2009. – Р. 38–40

References

1. Gumerov, A. V. *Predel'noe sostojanie oseвого kompressora GTD v uslovijah jekspluatacii v zapylennoj atmosfere : dis. ... kand. teh. nauk* [The ultimate state of the axial compressor GTE under operating conditions in a dusty atmosphere PhD thesis]. UFA, 2010. 146 p.

2. Krivosheev, I. A., Kamaeva, R. F., Strugovec, S. A. *Osobennosti dvizhenija chastic pyli v protochnoj chasti i izmenenija geometrii lopatok kompressorov v processe jekspluatacii gazoturbinyh ustanovok* [Peculiarities of the movement of particles of dust in the flowing part and changes in the geometry of the compressor blades during the operation of gas turbine units]. Vestnik UGATU Publ., 2011, vol. 15, no. 3 (43), pp. 18–24.

3. Sirotn, N. N., Marchukov, E. Ju., Sirotn, A. N., Agul'nik, A. B. *Osnovy konstruirovaniya, proizvodstva i jekspluatacii aviacionnyh gazoturbinyh dvigatelej i jenergeticheskikh ustanovok v sisteme CALS tehnologij: Jekspluatacija i nadezhnost' GTD i JeU* [Fundamentals of design, production and operation of aviation gas-turbine engines and power plants in the CALS technology system. Operation and reliability of gas turbine engines and power plants]. Moscow, Nauka Publ., 2012. 615 p.

4. Dust forecast. Available at: <http://forecast.uoa.gr/dustindx.php> (accessed 12.09.2016)

5. ANSYS CFX, Release 18.0 user guide.

6. ANSYS Advantage. Russian Edition, 2009, pp. 38–40.

Поступила в редакцию 17.02.2017, рассмотрена на редколлегии 8.06.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедры А. Я. Качан, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

ЗАКОНОМІРНОСТІ ТЕЧІЇ ДВОФАЗНОГО ПОТОКУ У ВХІДНОМУ ПРИСТРОЇ ВЕРТОЛІТНОГО ГТД

Я. В. Двірник, Д. В. Павленко

Наведено результати чисельного моделювання течії повітряного потоку з частинками пилу різного розміру в проточній частині повітряозабірника вертолітного газотурбінного двигуна при використанні і без використання пилозахисного пристрою. Встановлено основні закономірності течії двофазного потоку у вхідному пристрої ГТД в залежності від розміру часток. Показано, що використання пилозахисних пристроїв не призводить до повного усунення частинок пилу. Зроблено оцінку можливості заміщення моделювання двофазного потоку в проточній частині компресора ГТД однофазним.

Ключові слова: газотурбінний двигун, вхідний пристрій, пилозахисні пристрій, компресор, потік, частка, метод кінцевих елементів, моделювання, зношування.

LAWS OF MULTIPHASE FLOW BEHAVIOR IN THE HELICOPTER GAS TURBINE ENGINE INLET DUCT

Ya. V. Dvirnyk, D. V. Pavlenko

The results of finite element modeling of the airflow contains dust particles of various sizes in the helicopter gas turbine engine air inlet duct with mounted and dismounted dust protective device are given. The main laws of the behavior of multiphase flow in the gas turbine engine inlet duct in response to the particle size are determined. It clarifies that the use of dust-protective devices does not eliminate dust particles in full manner. An estimation of the possibility of replacing the simulation of a two-phase flow with one-phase in the GTE compressor has been made.

Keywords: gas turbine engine, inlet device, dust protective device, compressor, flow, particle, finite element method, modeling, wear.

Двирник Ярослав Викторович – аспирант кафедры технологии авиационных двигателей Запорожского национального технического университета, АО "МОТОР СИЧ", Запорожье, Украина, e-mail: dvirnyk@gmail.com.

Павленко Дмитрий Викторович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии авиационных двигателей Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: dvp1977dvp@gmail.com.

Dvirnik Yaroslav Victorovych – postgraduate student of aircraft engine technology department, Zaporizhzhya National Technical University, JSC "Motor Sich", Zaporizhzhya, Ukraine, e-mail: dvirnyk@gmail.com.

Pavlenko Dmytro Victorovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of aircraft engine technology, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine, e-mail: dvp1977dvp@gmail.com.