

УДК 519.248

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА В λ -ОБРАЗНОМ ПЫЛЕЗАЩИТНОМ УСТРОЙСТВЕ ПТД

А. Х. РАХИМОВ¹, А. С. ГИШВАРОВ²

¹mr.abdusattor@list.ru, ²kafedra.ad@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 21.03.2021

Аннотация. Проводится исследование эффективности моделирования двухфазного потока в инерционном пылезащитном устройстве (ПЗУ) λ -образного типа. Исследование проводилось с применением программного комплекса (ПК) Ansys Fluent. Результаты моделирования сравнивались с результатами экспериментального исследования λ -образного ПЗУ, изготовленного из композиционного материала и испытанного на стенде в ФГУП «ЦИАМ». Условия испытаний соответствовали взлетному режиму вертолетного двигателя, на котором наблюдается наибольшая запыленность воздуха, поступающего в двигатель через ПЗУ при эксплуатации.

Ключевые слова: пылезащитное устройство; эффективность; степень очистки воздуха; потеря давления; испытания; программный комплекс Ansys Fluent.

ВВЕДЕНИЕ

Пылезащитное устройство считается важнейшим элементом для сохранения работоспособности вертолетных двигателей при работе в условиях запыленного воздуха. К настоящему времени в зарубежных и отечественных ПЗУ достигнут примерно одинаковый уровень эффективности. Так, в ЦИАМ разработана и испытана базовая модель λ -образного ПЗУ со степенью очистки на взлетном режиме двигателя 97 % на пыли типа «С», 86 % – типа «крупная АС» и 65 % – типа «мелкая АС». Потери полного давления – до 1000 Па. Данная конструкция λ -образного ПЗУ предназначена для установки на двигатели ВК-800 и ТВ7-117В, а также двигатель вертолета Ка-226 [1–3].

Многофазные течения отличаются гораздо более сложной физикой, чем однофазные. Режимы двухфазного течения бывают различные: пузырьковый, снарядный, пенный, капельно-кольцевой, капельный. Существует три основных метода моделирования двухфазного течения: Лагранжевы, Эйлеровы и гибридные модели [4].

В основе Лагранжева метода лежит рассмотрение движения отдельных частиц (или группы частиц) дисперсной фазы.

В основе Эйлерава метода лежит рассмотрение изменений параметров течения (скоростей, давлений, температур) в точках пространства. Описание многофазного потока в качестве взаимопроникающих континуумов включает понятие объемной доли фазы. Объемные доли представляют объем, занимаемый каждой фазой, законы сохранения массы и импульса выполняются для каждой из фаз по отдельности. В рамках Эйлерава метода все фазы рассматриваются как сплошные.

В гибридном методе вводится усреднение по пространству и переход от реального распределения частиц к объемной доле. В гибридном методе чередуются Лагранжевы и Эйлеровы методы.

В Ansys Fluent Лагранжевы метод представлен моделями DPM (Discrete Phase Model – модель дискретной фазы) и DEM (Discrete Element Method – метод дискретного элемента) [4].

Эйлеров метод представлен моделями VOF (Volume of Fluid – метод объема жидкости), Mixture (модель многофазной смеси) и Eulerian (полная Эйлерова модель – модель взаимопроникающих сред).

Гибридный метод представлен моделью DDPM (Dense Discrete Phase Model – модель плотной дискретной фазы), построенной как комбинация моделей Eulerian и DPM.

В Ansys Fluent рассматриваются 2 вида двухфазных течений [5]: стратифицированный (с протяженной границей раздела фаз) и дисперсный, когда вторичная фаза присутствует в виде отдельных мелких элементов. В случае дисперсного режима задается плотность дисперсной фазы (ожидаемые локальные значения объемной доли) и характерный размер ее элемента (капли, пузырьки или зерна).

Полная Эйлерова модель Eulerian позволяет рассматривать как дисперсные течения, так и стратифицированные (специальная подмодель Multifluid VOF). Во всех случаях фазы считаются взаимопроникающими. Модель позволяет рассматривать смену режима течения – дисперсный-стратифицированный. В рамках модели решается свой набор уравнений сохранения для каждой фазы. Взаимодействие фаз описывается дополнительными слагаемыми в уравнениях сохранения. Виды взаимодействия зависят от класса и режима течения.

Лагранжева модель DPM подразумевает построение траекторий частиц дисперсной фазы в сплошной фазе на основе решения обыкновенных дифференциальных уравнений движения. Частицы могут быть как твердыми, так пузырьками и каплями. Модель учитывает двухсторонний обмен массой, импульсом и энергией частиц со сплошной фазой. Модель применима для небольших значений объемной концентрации частиц, когда взаимодействие частиц между собой учитывается опосредовано.

Для более точного учета взаимодействия частиц при увеличении концентрации используется гибридная модель DDPM. Модель подразумевает, что частицы не накапливаются в какой-либо части расчетной области, такую модель нельзя использовать для моделирования осаждения взвесей. Область применения: любые течения с относи-

тельно небольшой концентрацией частиц, если нужно учесть разброс или изменение размеров частиц, образование вторичных частиц, взаимодействие со стенкой [5].

Для моделирования траекторий частиц проводится интегрирование по времени уравнений баланса сил.

Траектории движения дискретной фазы вычисляются при отображении траекторий по ходу вычислений или при выполнении итераций решения. Есть два способа решения задачи: можно отображать траектории частиц, не влияя на непрерывную фазу, или учитывать влияние частиц на непрерывную фазу. В Ansys Fluent данные процедуры представлены как несвязанное (uncoupled) и связанное (coupled) вычисление дискретной фазы. Очевидно, что для ПЗУ необходимо учитывать межфазные взаимодействия, то есть использовать связанное вычисление (coupled calculations).

Для расчета связанного двухфазного потока вначале проводят расчет сплошной фазы для получения конвергентного поля сплошной фазы.

Для каждой итерации с дискретной фазой в Ansys Fluent вычисляются траектории частиц и обновляется межфазный обмен импульсом, теплом и массой в каждом контрольном объеме. Эти интерфазные обменные источники затем воздействуют на непрерывную фазу, когда выполняется итерация решения для сплошной фазы. Во время связанного расчета ANSYS Fluent выполняет итерацию дискретной фазы с заданными интервалами во время вычисления сплошной фазы. Расчет продолжается до тех пор, пока поле непрерывного фазового потока стабилизируется (то есть выполняются все критерии сходимости).

Таким образом последовательность взаимосвязанных вычислений следующая:

- вычисляется поле потока сплошной фазы;
- включается опция «Взаимодействие с сплошной фазой» в диалоговом окне «Модель дискретной фазы»;
- задается частота, с которой вычисляются траектории частиц. Оптимальное количество итераций между расчетами траекторий зависит от физики модели Ansys Fluent.



Рис. 1. Общий вид собранного ПЗУ с «улиткой» на испытательном стенде

Первым шагом в решении многофазной задачи является определение того, какой из режимов многофазного потока наилучшим образом соответствует исследуемому потоку.

Режимы многофазного потока разделяются на четыре категории: потоки «газ–жидкость» или «жидкость–жидкость»; потоки «газ–твердое вещество»; течение «жидкость–твердое вещество» и трехфазные потоки. Очевидно, что для ПЗУ приемлемым является поток вида «газ–твердое вещество», что характерно для циклонных сепараторов, воздушных классификаторов, пылеуловителей и пылевых экологических потоков [5].

Для потоков пузырьков, капель и частиц, в которых фракции фаз смешиваются и (или) объемные фракции с диспергированной фазой превышают 10 %, используется модель смеси (Mixture model) или модель Эйлера (Eulerian model).

Если частицы различаются по размеру и наибольшие частицы не отделяются от поля несущей фазы, то модель смеси может быть предпочтительной. В противном случае рекомендуется модель Эйлера, которая дает более точные результаты.

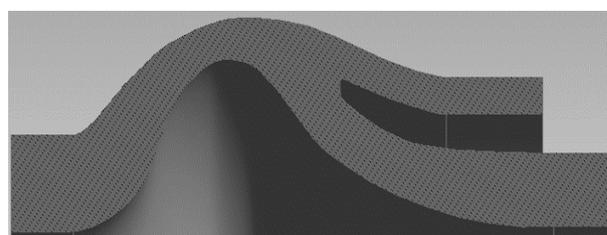
Для визуализации траекторий течения частиц используется модель дискретной фазы DPM. При этом:

1) выбирается тип инъекции (для ПЗУ используется тип «Поверхность»);

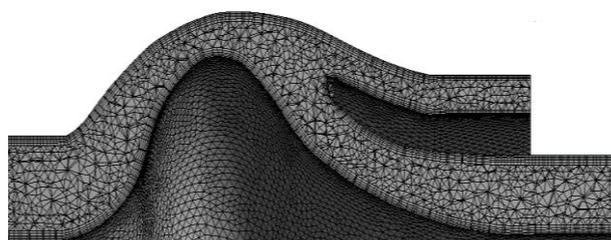
2) выбирается тип частиц (для ПЗУ подходящим типом частиц является «инертные частицы»);

3) задаются свойства частиц (скорость, диаметр, массовый расход и др).

Для рассматриваемого λ -образного ПЗУ твердотельная модель и расчетная сетка приведены на рис. 2.



a



б

Рис. 2. Твердотельная модель (а) и расчетная сетка (б) λ -образного ПЗУ

Условия проведения моделирования потока были следующими:

– рассматривался поток вида «газ–твердое вещество» с использованием модели DDPM (Dense Discrete Phase Model);

- частицы рассматривались как твердые сферы одинакового радиуса;
- частицы взаимодействовали друг с другом только попарно;
- аэродинамическое взаимодействие между частицами отсутствовало;
- на частицы воздействовали силы, моменты и тепловые потоки, причем эти воздействия были обусловлены мгновенными значениями параметров частиц – поступательной скоростью частиц и воздуха, угловой скоростью частиц, а также температурой частиц и воздуха.

Граничные условия были следующие:

- скорость потока на входе – 70 м/с;
- температура – 288 К;
- концентрация пыли на входе – 1 г/м³;
- материал частиц – кварцевый песок;
- размер частиц – 20, 200, 400 и 1000 мкм;
- использовалась модель турбулентности – RANS $k-\epsilon$ 1 [6].

Погрешность моделирования параметров ПЗУ оценивалась по формулам:

$$d_{\eta} = \frac{\eta_{\text{мод}} - \eta_{\text{экс}}}{\eta_{\text{экс}}} \cdot 100 \%;$$

$$d_{\Delta P} = \frac{\Delta P_{\text{мод}} - \Delta P_{\text{экс}}}{\Delta P_{\text{экс}}} \cdot 100 \%,$$

где $\eta_{\text{мод}}$ и $\Delta P_{\text{мод}}$ – значения степени очистки η и потери давления ΔP , полученные моделированием; $\eta_{\text{экс}}$ и $\Delta P_{\text{экс}}$ – значения параметров в эксперименте.

Результаты моделирования (табл. 1) сравнивались с результатами испытаний ПЗУ λ -образного типа, изготовленного из композиционного материала и испытанного на стенде в ФГУП «ЦИАМ» (рис. 1).

Условия испытаний соответствовали взлетному режиму вертолетного двигателя, на котором запыленность воздуха наибольшая.

Оценка степени очистки воздуха проводилась при подаче в ПЗУ кварцевой пыли двух типов – «Крупная АС» и «С» (размер частиц – от 0 до 1000 мкм), применяемых

в международной практике при испытаниях ПЗУ вертолетных двигателей [7–8].

Были получены следующие результаты:

- степень очистки воздуха от пыли типа «Крупная АС» – 79 ... 81 %, от пыли типа «С» – 86 ... 92 %;
- потери полного давления в ПЗУ составили 1100 – 1480 Па.

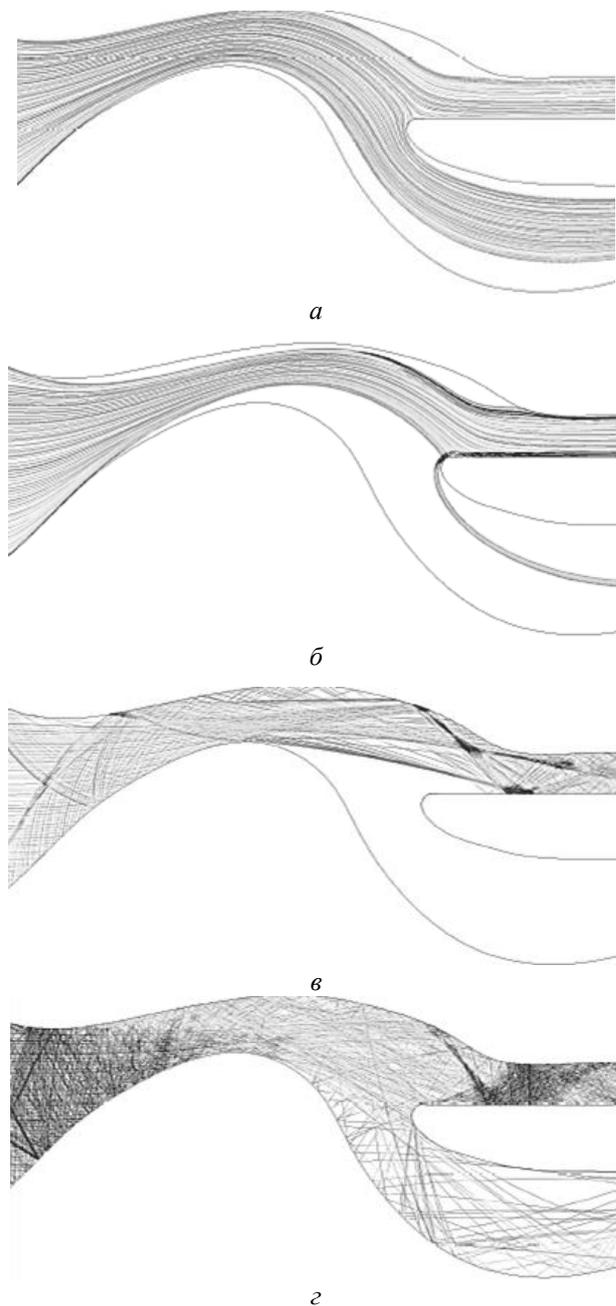


Рис. 3. Траектория движения частиц пыли в ПЗУ: а – 20 мкм; б – 200 мкм; в – 400 мкм; з – 1000 мкм

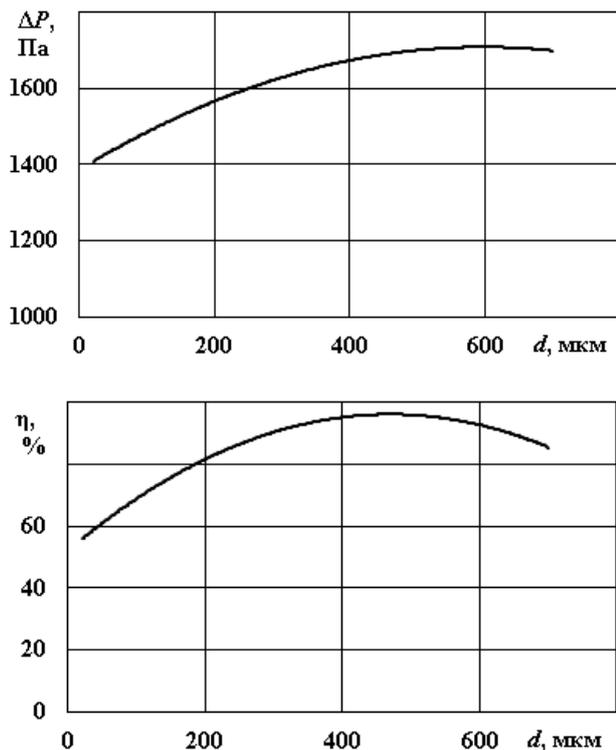


Рис. 4. Зависимость параметров ПЗУ η и ΔP от размера частиц

Таблица 1

Результаты сравнения моделирования с экспериментом

Параметр	Результаты моделирования	Эксперимент	Погрешность моделирования, %
диаметр частиц 20 мкм			
η , %	54	65	17
ΔP , Па	1402	1100–1500	7,7
диаметр частиц 200 мкм			
η , %	86,5	86–92	4
ΔP , Па	1584	1100–1500	21,5
диаметр частиц 400 мкм			
η , %	91,3	86–92	2,2
ΔP , Па	1660	1100–1500	23
диаметр частиц 1000 мкм			
η , %	83,2	86–92	6,7
ΔP , Па	1702	1100–1500	30,8

Из таблицы видно, что для рассматриваемого ПЗУ отличие модельных значений от экспериментальных составляет:

- при $d = 20$ мкм отличие по η – 17 %, по ΔP – 7,7 %;
- при $d = 200$ мкм отличие по η – 4 %, по ΔP – 21,5 %;
- при $d = 400$ мкм отличие по η – 2,2 %, по ΔP – 23 %;
- при $d = 1000$ мкм отличие по η – 6,7 %, по ΔP – 31 %.

В целом, по результатам исследования видно, что хорошая сходимость модели и эксперимента обеспечивается по степени очистки воздуха (2,2 ... 17 %). Причиной большого расхождения по ΔP является отличие геометрии модельной ПЗУ от геометрии экспериментальной ПЗУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Полимерные** композиционные материалы для изготовления пылезащитного устройства перспективного вертолетного двигателя / Г. Ф. Железина [и др.] // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 1 (50) С. 58–63. [G. F. Zhe-lezina, et al., "Polymer composite materials for the manufacture of a dustproof device for a promising helicopter engine", (in Russian), in *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, no. 1 (50), pp. 58-63, 2018.]
2. **Рысин Л. С.** Еще раз о пыли // *Двигатель*. 2009. № 2. [Электронный ресурс]. URL: <http://engine.aviaport.ru/issues/65/page10.html> (дата обращения 15.04.2021) [L. S. Rysin (2021, Apr. 15), "One more time about dust" [Online], (in Russian), in *Dvigatel'*, no. 2, 2009. Available: <http://engine.aviaport.ru/issues/65/page10.html>]
3. **Степанов Г. Ю., Цицер И. М.** Инерционные воздухоочистители. М.: Машиностроение, 1986. 184 с. [G. Y. Stepanov, I. M. Zicer, *The inertial air cleaner*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1986.]
4. **Волков К. Н., Емельянов В. Н., Курова И. В.** Лагранжев подход к моделированию турбулентных течений газ-взвеси в приложении к проблемам внутренней газодинамики РДТТ. Санкт-Петербург: Воентех. 2008. С. 320–332. [K. N. Volkov, V. N. Emel'ianov, I. V. Kurova, *Lagrangian approach to modeling turbulent flows of a gas suspension as applied to the problems of internal gas dynamics of solid propellants*, (in Russian). Sankt-Peterburg: Voentekh, 2008.]
5. **Вычислительная** гидродинамика // Инженерная Компания Технополис. С. 30. [Электронный ресурс]. URL: <https://tpolis.com/ansys/liquieds.php> (дата обращения 15.04.2021) [Computational fluid dynamics // Engineering Company Technopolis (2021, Apr. 15). [Online]. Available: <https://tpolis.com/ansys/liquieds.php>]
6. **Моделирование** потока частиц в инерционном сепараторе частиц с помощью двухфазного потока, повторно связанного со скоростью Эйлера / Дэн Сан [и др.] // *Материалы 54-го совещания AIAA по аэрокосмическим наукам*, 2016 г. Сан-Диего, Калифорния, США. 2016. Т. 17. С. 13865–13878. [Dan Sun, et al., "Simulation of particle flow in an inertial particle separator with an Eulerian velocity re-associated two-node quadrature-based method of moment", in *Proceedings of the 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, San Diego, California, USA*, vol. 17, pp. 13865-13878, 2016.]

7. **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, "Modeling and optimization features dustproof device helicopter turboprop", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 19, no. 2 (68), pp. 100-110, 2014.]

8. **Гишваров А. С., Салимзянова А. А., Рахимов А. Х.** Исследование влияния геометрии вертолетного пылезащитного устройства на его эффективность // Мавлютовские чтения: материалы XI Всероссийский молодежной научной конференции УГАТУ, 2017. Т. 7. С. 62–67. [A. S. Gishvarov, A. A. Salimzyanova, A. Kh. Rakhimov, "Investigation of the influence of the geometry of a helicopter dust-proof device on its effectiveness", (in Russian), in *Mavlyutov readings: Materials of the XI All-Russian youth scientific conference UGATU*, 2017. Vol. 7. Pp. 62-67.]

ОБ АВТОРАХ

РАХИМОВ Абдусаттор Хасанович, асп. каф. авиац. двиг. Дипл. маг. по авиастр. (УГАТУ, 2017). Иссл. в обл. надежности и ресурса авиац. двиг.

ГИШВАРОВ Анас Саидович, проф., зав. каф. авиац. двиг. Дипл. инж.-мех. по авиац. двиг. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по тепл. двиг. летательных аппаратов (УГАТУ, 1993). Иссл. в обл. надежности, ресурса, испытаний и прогнозирования состояния техн. систем.

METADATA

Title: Study the effectiveness of the dust devices.

Authors: A. X. Rakhimov¹, A. S. Gishvarov²

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹mr.abdusattor@list.ru, ²kafedra.ad@mail.ru

Language: Russian.

Source: *Vestnik UGATU* (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 25, no. 2 (92), pp. 56-61, 2021. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The study of efficiency is carried out. Modeling of a two-phase flow in an inertial dust-proof device of the V-type using various types of modeling of a two-phase flow "air-dust particles" was carried out using the software package (PC) Ansys Fluent. The simulation results were compared with the results of an experimental study of a λ -shaped ROM made of a composite material and tested at the stand at the FSUE "CIAM". The test conditions corresponded to the take-off regime of the helicopter engine, on which the highest dust content of the air entering the engine through the particle separator during operation is observed.

Key words: particle separator; efficiency; degree of air purification; pressure loss; testing; Ansys Fluent software package.

About authors:

RAHIMOV, Abdusattor Hasanovich, PhD Stud., Dept. of Aircraft Engines. Accident (USATU, 2017).

GISHVAROV, Anas Saidovich, Prof., Dept. of Aircraft Engines. Dipl. engineer (USATU, 1973). Dr. of Tech. Sci. (USATU, 1993).