

УДК 66.01
DOI 10.47367/0021-3497_2021_5_212

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДВУХФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ С ЗАКРУТКОЙ ПОТОКА

MODELING AND ANALYSIS OF SPATIAL TWO-PHASE STREAMS WITH A SWINGED FLOW

А.С. БЕЛОУСОВ, Д.А. ОВСЯННИКОВ, В.Ю. АБРАМИН

A.S. BELOUSOV, D.A. OVSYANNIKOV, V.YU. ABRAMIN

(Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))

(Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art))

E-mail: as.belousov-2@yandex.ru

Проведен анализ новых возможностей вычислительной гидродинамики для задач текстильной экологии. Выявлены проблемы теории турбулентности для прикладных задач. Показана необходимость подбора модели турбулентности для аппаратов разной геометрии. На примере устройств с закруткой потока представлены различные способы пространственного анализа двухфазных течений. Предложены новые способы построения функций распределения времени пребывания частиц, позволяющие выявить особенности двухфазных течений с сильной закруткой в устройствах различного типа.

The analysis of new possibilities of computational fluid dynamics for aims of textile ecology was carried out. Some problems of the turbulence theory for applied purposes were established. The necessity of turbulence model selecting for a specific geometry devises was shown. Various methods of spatial analysis of two-phase flows were presented on the example of devices with swirling flow. New special functions for the distribution of the particle residence time in the apparatus were proposed, which made it possible to identify the features of two-phase flows with strong vorticity in various types of devices.

Ключевые слова: вычислительная гидродинамика, турбулентность, закрученные потоки, вихревые устройства, циклоны.

Keywords: computational fluid dynamics, turbulence, swirling flows, vortex devices, cyclones.

Цифровые технологии играют все большую роль в различных сферах развития России, в том числе и в текстильной промышленности [1]. Значительная часть экологических и технологических задач связана с расчетом пространственных движений воздуха с плотными частицами. Это может быть движение воздуха внутри промышленных зданий, но чаще это движение двухфазного потока в различных устройствах.

В последние 30 лет произошли значительные изменения в наборе инструментов для пространственных исследований – расчетных пакетах CFD (Computational Fluid Dynamics) [2]. Автоматизация и интерфейс пакетов возросли настолько, что ими стали широко пользоваться ученые в прикладных областях. Однако значительное расширение круга задач выявило недостаточность самих моделей турбулентности, заложенных в эти системы, особенно для расчета технологических характеристик устройств с двухфазными потоками [3...7]. Более детальное исследование проблемы [8...11] показало, что универсальную полуэмпирическую модель турбулентности, пригодную для произвольных геометрических объектов, процессов и устройств, до настоящего времени создать не удалось. Приходится проверять или дорабатывать какую-либо из классических моделей [3], или строить нестандартную модель турбулентности [11], учитывающую особенности данного класса течений.

Целью данной работы была демонстрация возможностей и разработка средств анализа пространственных течений на примере закрученных потоков, для которых удалось подобрать достаточно адекватные

модели. Закрученные потоки широко применяются в пылеуловителях, например, на стадиях первичной обработки сырья. Особый интерес представляют аппараты типа СЦН-40, в которых удалось реализовать сильную закрутку потоков. Такие циклоны могут улавливать тонкодисперсные пыли, которые характерны для последующих стадий технологических процессов [13]. Еще большая степень крутки реализуется в устройствах вихревого прядения прядильных машин серии MVS, что обеспечивает производительность до 400 м/мин [14], [15].

Рассмотрим обычную схему построения модели двухфазного течения с турбулентностью. При малой запыленности потока расстояние между твердыми частицами велико по сравнению с их размерами. В данном случае можно не учитывать влияния твердой фазы на газовую, то есть рассматривать так называемую Эйлеро-Лагранжеву модель одностороннего взаимодействия. В этом случае моделирование и расчет распадается на два этапа: сначала моделируется газовая фаза, а затем рассматривается движение частиц в полученном поле скоростей газа. Представим скорость и давление (V, P) в виде суммы осредненных (\bar{V}, \bar{P}) и пульсационных (V', P') величин: $V = \bar{V} + V'$, $P = \bar{P} + P'$. Используя принятый при исследовании турбулентных течений способ осреднения [3] из уравнений Навье-Стокса, получаем уравнения Рейнольдса, решение которых зависит от так называемых напряжений Рейнольдса. Для расчета напряжений Рейнольдса необходимо решить транспортные уравнения:

$$\rho \bar{V}_k \frac{\partial \overline{V_i' V_j'}}{\partial X_k} = -\rho \left(\overline{V_i' V_k'} \frac{\partial \bar{V}_j}{\partial X_k} + \bar{V}_j' \overline{V_k'} \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial X_k} \right) + \overline{P' \left(\frac{\partial V_i'}{\partial X_j} + \frac{\partial V_j'}{\partial X_i} \right)} - \rho \frac{\partial}{\partial X_k} (\overline{V_i' V_j' V_k'}) - \left[\frac{\partial}{\partial X_i} (\overline{P' V_j'}) + \frac{\partial}{\partial X_j} (\overline{P' V_i'}) \right] + \mu \left(\overline{V_i' \frac{\partial^2 V_j'}{\partial X_k^2}} + \overline{V_j' \frac{\partial^2 V_i'}{\partial X_k^2}} \right). \quad (1)$$

Помимо шести компонентов тензора турбулентных напряжений σ_{ij} , уравнение (1) также содержит новые неизвестные, в частности, корреляционные моменты третьего порядка $\rho V_i' V_j' V_k'$, следовательно, для решения системы (1) необходимо вводить дополнительные гипотезы, модели и упрощения. Десятки существующих моделей турбулентности для системы (1), разработанные в последние 40 лет, пытались отразить различные характеристики течений, но, тем не менее, универсальная модель пока не создана.

В данной работе, используя вычислительный пакет ANSYS 2020/R2 ACAD-EMIC, удалось подобрать адекватную модель (в обозначениях системы ANSYS это модель – RSM/LPR) для течения с большой закруткой в циклоне СЦН-40. Расчетная сетка насчитывает около полумиллиона ячеек. Поскольку линий тока в пространственной задаче нет, то возникает нетривиальный вопрос: а как представить результаты? В данном случае, нас интересовала структура течений при сильной закрутке, поэтому были использованы возможности обработки векторного поля системы ANSYS. Строились осредненные и разреженные проекции векторов аксиальной скорости на заданное сечение, подбирались размеры и форма векторов, их цветовая палитра.

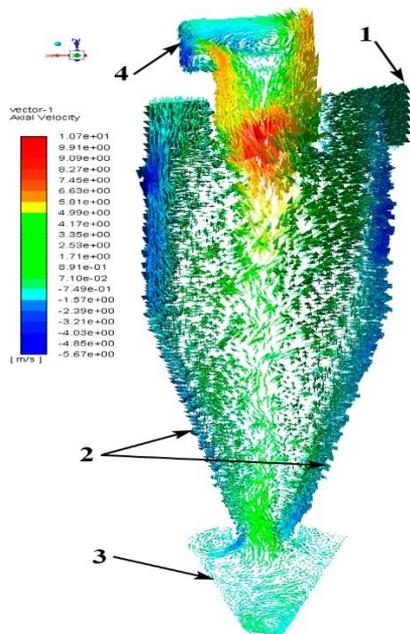


Рис. 1

На рис. 1 приведен построенный таким образом разрез поля скоростей газа в аппарате СЦН-40 (1 – вход потока; 2 – пристеночные слои газа, стекающие к бункеру; 3 – бункер; 4 – выход потока). Как видно в данной конструкции, сильная закрутка обеспечивает достаточно тонкие пристеночные слои, нисходящие к бункеру. Именно такая структура обеспечивает удерживание в пристеночном слое тонкодисперсных частиц и их удаление в бункер.

На рис. 2 показаны экспериментальные и теоретические данные по основной характеристике аппаратов – фракционной эффективности улавливания (ФЭУ) различных циклонов.

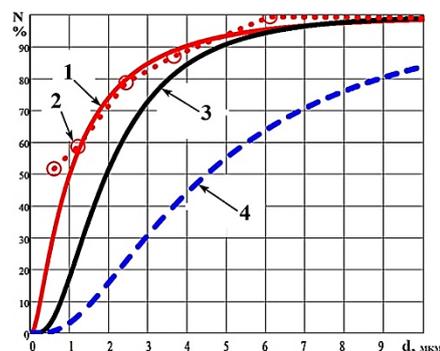


Рис. 2

На рис. 2 экспериментальные данные представлены в виде вероятностно-логарифмической функции (ВЛНР), где 1,3,4 соответственно характеристики циклонов СЦН-40, СКЦН-34 и ЦН-15; 2 – крупными точками показаны расчетные значения ФЭУ СЦН-40. Расчетные точки получены в результате имитационного моделирования движения частиц по уравнениям движения в турбулентном потоке:

$$\begin{cases} \frac{d\vec{r}_p}{dt} = \vec{V}_p \\ \frac{d\vec{V}_p}{dt} = \frac{3C_d\rho}{8\rho \cdot r_p} |\vec{V} - \vec{V}_p| (\vec{V} - \vec{V}_p) \end{cases} \quad (2)$$

где \vec{r}_p – вектор – координата частицы; \vec{V}_p – вектор скорости частицы; \vec{V} – вектор пульсационной скорости газа, которая представ-

лена в виде суммы осредненной скорости и пульсации: $V = \bar{V} + V'$. Частицы инжектировались на входе в аппарат, для построения одной точки обрабатывались около 1500 ансамблей реализаций траекторий.

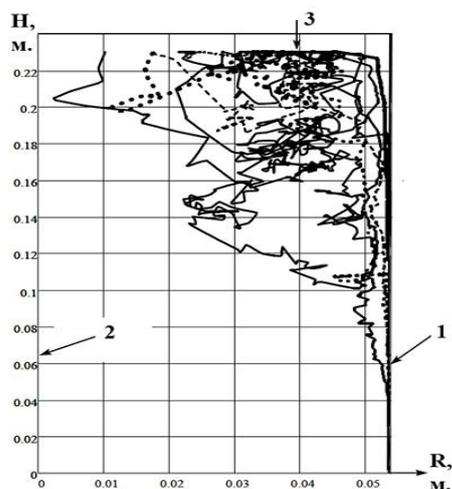


Рис. 3

На рис. 3, 4 анализируется непосредственно характер траекторий частиц в аппаратах с разной закруткой. На рис.3 представлена реализация 10 траекторий движения частиц в плоскости (z, r) , проходящей через ось аппарата, причем угловая координата этой плоскости равна угловой координате частицы. Здесь моделировался аппарат с нестандартной анизотропной моделью турбулентности [11], [12], опирающейся на гипотезу приосевой генерации турбулентности в вихревых потоках и показавшей хорошее совпадение с экспериментами. Результаты на рис. 3 получены для цилиндрического аппарата со средней степенью закрутки (1 – боковая стенка цилиндра; 2 – ось; 3 – вход частиц). В данном случае, при средней закрутке, модель (2) показывает, что для частиц размером 1 мкм унос в основном происходит из верхней части аппарата.

Более полную информацию о характере движения частиц можно получить, применив специальные функции распределения времени пребывания (РВП). В этом случае задача решается в 3 этапа: 1) – расчет поля скоростей газа; 2) – расчет и сохранение полных характеристик 1500-3000 траекто-

Как видно, аппроксимация расчетных точек достаточно хорошо совпадает с экспериментальной ФЭУ, что подтверждает высокую эффективность этого аппарата.

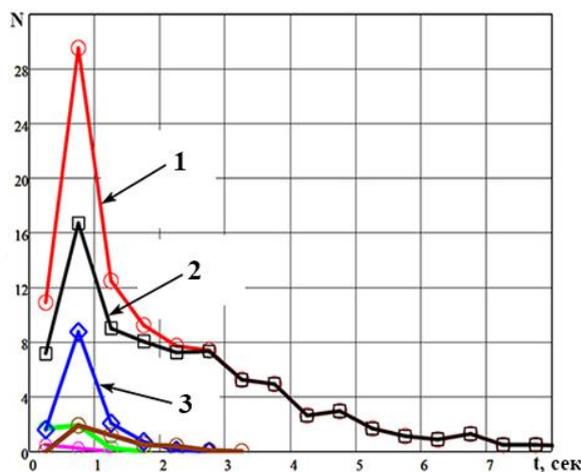


Рис. 4

рий частиц для каждой функции РВП; 3) – обработка ансамблей траекторий отдельным пакетом программ и расчет каждой спецфункции РВП. На рис. 4 представлены спецфункции РВП для частиц размером 1 мкм, выносимых из различных по высоте зон аппарата СЦН-40 (1 – суммарное РВП для всех областей; 2 – доля РВП частиц, прошедших через бункер; 3 – доля РВП частиц, унесенных из нижней половины конуса). Как видно, при сильной закрутке потока частицы двигаются в узком пограничном слое, практически не покидая его.

Следует ожидать, что в устройствах вихревого прядения (УВП) при еще более сильной закрутке потока волокна будут идти, плотно прижимаясь к стенке внешнего цилиндра. Затем, при переходе на шпиндель [14], [15] волокна будут сбрасывать сорные частицы и формироваться в прядильную нить.

ВЫВОДЫ

1. Показана необходимость специального подбора модели турбулентности для аппаратов разных геометрий в прикладных задачах.

2. Предложены методы моделирования и анализа двухфазных вихревых течений.

3. Установлено, что при сильной закрутке вихревого потока плотные частицы двигаются в узком пристеночном слое, практически до конца конуса.

4. Установленные свойства определяют наиболее высокую эффективность циклона СЦН-40 при очистке выбросов газозвесей, а также теоретически обосновывают некоторые закономерности двухфазного потока в устройствах вихревого прядения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нидзий Е.Н., Чугумбаев Р.Р. Аналитическое обоснование стратегии инновационных изменений предприятий легкой промышленности // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020, № 1. С.43...49.

2. Notes on Numerical Fluid Mechanics; 40 Years of Numerical Fluid Mechanics and Aerodynamics in Retrospect // Ed. E.H. Hirschel, E. Krause. – Springer-V. Berlin. 2009. 498 P.

3. Гарбарук А. В., Стрелец М. Х., Шур М. Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.

4. Hoffmann A.C., Stein L.E. Gas Cyclones and Swirl Tubes. – Berlin-Heidelberg-New York: Springer. 2008.

5. Souza F. J., Salvo R.V., Martins D.A.M. Large Eddy Simulation of the gas-particle flow in cyclone separators // Separation and Purification Technology. – V.94, 2012. P.61..70.

6. Sambasivam D., Bhattacharya A. K. Synthesis of CFD and Monte-Carlo simulations for improved design and operation of Dense Medium Cyclones //Computers & Fluids. – V. 96, 2014. P. 47..62.

7. G.Zhang, G.Chen, X.Yan. Evaluation and improvement of particle collection efficiency and pressure drop of cyclones by redistribution of dustbins// Chemical Engineering Research and Design. – V.139, 2018. №11. P.52..61.

8. Spalart P. R. Philosophies and fallacies in turbulence modeling. // Progress in Aerospace Sciences. – №74(1), 2015. P. 1..15.

9. Spalart P. R. Editorial: RANS modeling into a second century. //Special issue of International J. of CFD. – V.23, 2009. №4. P.291..293.

10. Piomelli U., Balaras E. Wall-layer models for large-eddy simulations. //Annual Rev. Fluid Mech. – V.34? 2002. P. 349..374.

11. Белоусов А.С., Сажин Б.С. Поля скоростей в вихревых аппаратах // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2006, № 2. С.100..105.

12. Белоусов А.С., Сажин Б.С. Структура потоков в вихревых устройствах // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2006, № 5. С.98..103.

13. Халезов Л.С., Шиков Ю.А., Чесноков А.Г. Очистка запыленного воздуха на текстильных предприятиях. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981.

14. Basal G., Oxenham W. Vortex Spun Yarns vs. Air-Jet Spun Yarn//AUTEX Research Journal. – V.3, №3, 2003. P. 96..101.

15. Oxenham W. Current and Future Trend in Yarn Production//Journal of Textile and Apparel Technology and Management. – V.2, №2, 2002. P.1..10.

REFERENCES

1. Nidziy E.N., Chugumbaev R.R. Analiticheskoe obosnovanie strategii innovatsionnykh izmeneniy predpriyatiy legkoy promyshlennosti // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2020, №1. S.43...49.

2. Notes on Numerical Fluid Mechanics; 40 Years of Numerical Fluid Mechanics and Aerodynamics in Retrospect // Ed. E.H. Hirschel, E. Krause. – Springer-V. Berlin. 2009. 498 P.

3. Garbaruk A. V., Strelets M. Kh., Shur M. L. Modelirovanie turbulentsnosti v raschetakh slozhnykh techeniy. – SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2012.

4. Hoffmann A.C., Stein L.E. Gas Cyclones and Swirl Tubes. – Berlin-Heidelberg-New York: Springer. 2008.

5. Souza F. J., Salvo R.V., Martins D.A.M. Large Eddy Simulation of the gas-particle flow in cyclone separators // Separation and Purification Technology. – V.94, 2012. P.61..70.

6. Sambasivam D., Bhattacharya A. K. Synthesis of CFD and Monte-Carlo simulations for improved design and operation of Dense Medium Cyclones //Computers & Fluids. – V. 96, 2014. P. 47..62.

7. G.Zhang, G.Chen, X.Yan. Evaluation and improvement of particle collection efficiency and pressure drop of cyclones by redistribution of dustbins // Chemical Engineering Research and Design. – V.139, 2018. №11. P.52..61.

8. Spalart P. R. Philosophies and fallacies in turbulence modeling. // Progress in Aerospace Sciences. – №74(1), 2015. P. 1..15.

9. Spalart P. R. Editorial: RANS modeling into a second century. //Special issue of International J. of CFD. – V.23, 2009. №4. P.291..293.

10. Piomelli U., Balaras E. Wall-layer models for large-eddy simulations. //Annual Rev. Fluid Mech. – V.34? 2002. P. 349..374.

11. Belousov A.S., Sazhin B.S. Polya skorostey v vikhrevykh apparatakh // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2006, № 2. S.100..105.

12. Belousov A.S., Sazhin B.S. Struktura potokov v vikhrevykh ustroystvakh // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2006, № 5. S.98..103.

13. Khalezov L.S., Shikov Yu.A., Chesnokov A.G. Ochistka zapylennogo vozdukha na tekstil'nykh predpriyatiyakh. – M.: Legkaya i pishchevaya promyshlennost', 1981.

14. Basal G., Oxenham W. Vortex Spun Yarns vs. Air-Jet Spun Yarn//AUTEX Research Journal. – V.3, №3, 2003. P. 96..101.

15. Oxenham W. Current and Future Trend in Yarn Production//Journal of Textile and Apparel Technology and Management. – V.2, №2, 2002. P.1..10.

Статья опубликована по материалам Косыгинского форума. Поступила 20.09.21.
