

## РАСЧЕТ ГИДРОДИНАМИКИ ПОТОКОВ В ВОЗВРАТНО-ПОТОЧНЫХ ЦИКЛОНАХ ПРИ ПОМОЩИ ПАКЕТА ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ FLOW VISION

Ю.Г. Чесноков, И.Г. Лихачев, О.М. Флисюк, Н.А. Марцулевич, В.П. Мешалкин, А.В. Гарабаджиу

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Московский пр., 24-26/49 литера А, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 190013

E-mail: ygchesnokov@yandex.ru, ig.lihachev@gmail.com, flissiyk@mail.ru, tohm1950@mail.ru, vpmeshalkin@gmail.com, gar-54@mail.ru

*Статья посвящена исследованию возможности использования для математического моделирования движения газа в возвратно-поточных циклонах различных математических моделей турбулентности. Такие модели весьма многочисленны. Для анализа выбраны те из них, которые в наибольшей степени зарекомендовали себя при моделировании сложных течений. Известно, что из числа моделей, которые используют уравнения Рейнольдса, дополненные уравнениями для параметров, через которые выражается турбулентная вязкость, стандартная  $k - \epsilon$  модель не дает адекватное описание поля скорости газа в циклонах рассматриваемого типа. По этой причине изучалась возможность использовать модель транспорта турбулентных напряжений (SST модель), а также нелинейную  $k - \epsilon$  модель, которая включает квадратичные и кубические слагаемые в выражении для так называемых напряжений Рейнольдса. Эта модификация  $k - \epsilon$  модели рекомендуется для расчета закрученных течений. Кроме того, расчеты проводились с использованием модели Смагоринского. Последняя модель основывается на методе моделирования крупных вихрей. Результаты расчетов сопоставлялись с известными из литературы данными экспериментов, которые заключаются в измерении составляющих скорости газа внутри циклона при помощи лазерного доплеровского анемометра. Показано, что наилучшие результаты дает модель Смагоринского. Полученные результаты позволяют рекомендовать данный метод для моделирования процессов газоочистки в циклонах. Моделирование может позволить произвести оптимизацию геометрических параметров циклонов без использования трудоемких экспериментов. Кроме того, располагая надежным методом расчета аэродинамики циклона, возможно путем расчетов определить наилучшие условия эксплуатации циклона при заданных параметрах его работы.*

**Ключевые слова:** циклон, гидромеханические процессы, моделирование, турбулентные течения

## CALCULATION OF FLOW HYDRODYNAMICS IN REVERSE-FLOW CYCLONES USING THE FLOW VISION APPLIED SOFTWARE PACKAGE

Yu.G. Chesnokov, I.G. Likhachiev, O.M. Flisyuk, N.A. Martsulevich, V.P. Meshalkin, A.V. Garabadzhiu

Saint-Petersburg State Institute of Technology, Moskovsky pr., 24-26/49 A, Saint-Petersburg, Russia, 190013

E-mail: ygchesnokov@yandex.ru, ig.lihachev@gmail.com, flissiyk@mail.ru, tohm1950@mail.ru, vpmeshalkin@gmail.com, gar-54@mail.ru

*The article is devoted to the study of the possibility of using various mathematical models of turbulence for mathematical modeling of gas motion in reverse-flow cyclones. Such models are very numerous. Therefore, only models that have demonstrated the greatest efficiency in the modeling of complex flows were selected for the analysis. It is known that among the models that use the Reynolds equations supplemented with parameter equations that express turbulent viscosity, the standard  $k - \epsilon$  model does not give an accurate description of the gas velocity field in cyclones of the type under consideration. For this reason, the possibility of using the shear stress transport (SST) turbulence model and the nonlinear  $k - \epsilon$  model, which includes quadratic and cubic terms in the expression for the so-called Reynolds stresses, was studied. This modification of the  $k - \epsilon$*

*model is recommended for the calculation of swirling currents. In addition, calculations were carried out using the Smagorinsky model. The latter is based on the method of modeling large vortices. The results of the calculations were compared with the experimental data known from the literature, which consist in measuring the components of the gas velocity inside the cyclone using a laser Doppler anemometer. It was shown that the best results are obtained by means of the Smagorinsky model. These results allow to recommend this method for the modeling of gas purification processes in cyclones. Modeling may allow to optimize the geometric parameters of cyclones and eliminate the need to perform time-consuming experiments. Moreover, establishing a reliable method for calculating the aerodynamics of a cyclone allows to use calculations to determine the best operating conditions of a cyclone under specified working parameters.*

**Key words:** cyclone, hydro-mechanical processes, modeling, turbulent flows

**Для цитирования:**

Чесноков Ю.Г., Лихачев И.Г., Флисюк О.М., Марцулевич Н.А., Мешалкин В.П., Гарабаджиу А.В. Расчет гидродинамики потоков в возвратно-поточных циклонах при помощи пакета прикладных программ flow vision. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2022. Т. LXVI. № 3. С. 56–60. DOI: 10.6060/rcj.2022663.8.

**For citation:**

Chesnokov Yu.G., Likhachiev I.G., Flisyuk O.M., Martsulevich N.A., Meshalkin V.P., Garabadzhiu A.V. Calculation of flow hydrodynamics in reverse-flow cyclones using the flow vision applied software package. *Ros. Khim. Zh.* 2022. V. 66. N 3. P. 56–60. DOI: 10.6060/rcj.2022663.8.

## ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности циклонов позволит улавливать большее количество твердой фазы, которая, как правило, может утилизироваться с получением полезных продуктов. Таким образом, решается не только экологическая проблема очистки отработанных газов, но и уменьшается количество отходов, выбрасываемых в атмосферу, следовательно, решается и проблема ресурсосбережения. Применение компьютерного моделирования движения газа и дисперсной фазы позволяет проводить более широкий анализ влияния конструктивных особенностей циклона на параметры его работы.

Компьютерная гидродинамика, т. е. расчет течений жидкости или газа при помощи тех или иных компьютерных программ, позволяющих осуществлять численное решение уравнений, описывающих течение, используется при моделировании циклонов, предназначенных для очистки газов от пыли, на протяжении последних 40 лет. Одной из первых работ в этом направлении является статья [1]. В этой работе было установлено, что стандартная  $k - \epsilon$  модель турбулентности применительно к сильно закрученным потокам дает завышенные значения турбулентной вязкости и нереалистичные значения тангенциальной скорости газа. Следует отметить, что полуэмпирические модели турбулентности, которые основываются на использовании уравнений Рейнольдса и дополнительных соотношений для расчета входящих в эти уравнения

напряжений Рейнольдса не являются универсальными, т.е. пригодными для расчета всех типов течений. Закономерности турбулентного пульсационного движения малого масштаба имеют универсальный характер. Однако на статистические характеристики турбулентности существенное влияние оказывают крупномасштабные, так называемые когерентные структуры. Закономерности этих крупномасштабных движений существенным образом зависят от геометрии потока. По этой причине возможность использования тех или иных полуэмпирических моделей для описания определенного класса течений, должна подтверждаться сравнением с экспериментом. В работе [2] для расчета течения газа в циклоне были использованы три различные модели турбулентности: стандартная  $k - \epsilon$  модель, основанная на теории ре-нормгруппы и модель переноса напряжений Рейнольдса. Результаты расчетов сопоставлялись с экспериментом. Эксперименты проводились при сравнительно небольших значениях критерия Рейнольдса (25000). Критерий Рейнольдса вычисляется по скорости газа во входном патрубке и ширине входного патрубка прямоугольного сечения. Авторы работы пришли к выводу о том, что первые две упомянутые модели дают нереалистичные распределения тангенциальной и осевой скорости газа по сечению циклона. Результаты расчетов по модели переноса напряжений Рейнольдса находятся в разумном соответствии с данными экспериментов. Однако в этом случае расчеты становятся существенно более сложными в результате того, что

необходимо решать отдельное уравнение для каждого из напряжений Рейнольдса.

В этих ранних работах осредненное течение газа рассматривалось как осесимметричное и установившееся несмотря на не осесимметричную картину движения в окрестности входного патрубка. Для описания крупномасштабных нестационарных вихревых движений в циклоне требуется иной подход. В работе [3] использовался метод моделирования крупных вихрей. Применение указанного метода позволило авторам работы описать нестационарное квазипериодическое движение вихревого ядра потока относительно оси симметрии (так называемую прецессию вихревого ядра). Метод моделирования крупных вихрей предъявляет очень высокие требования к производительности компьютера. Расчеты возможны лишь при относительно небольших значениях критерия Рейнольдса (в этой работе 14000). В [4] метод моделирования крупных вихрей использован при разработке приближенных моделей для расчета эффективности пылеулавливания в циклоне. Влиянием присутствия твердых частиц на движение потока газа авторы статьи пренебрегали. В работе [5] метод моделирования крупных вихрей применялся при расчетах фракционной эффективности циклона. Этот же метод использовался позднее в [6] для более детального изучения прецессии вихревого ядра в циклонах.

В настоящее время метод моделирования крупных вихрей не может систематически использоваться для целей оптимизации параметров циклонов или для исследования условий проведения процесса очистки газа от пыли на параметры разделения в силу своей сложности. Для этих целей применяют расчеты, основанные на использовании уравнений Рейнольдса. Так, в работе [7] для сопоставления циклонов с различной геометрией патрубка для отвода пыли использовалась модель переноса напряжений Рейнольдса. В статье [8] для изучения влияния соотношения нагрузок по твердой и газовой фазам на параметры работы циклона использовался подход, в рамках которого движение газа описывалось при помощи уравнений Рейнольдса, а для описания движения твердых частиц – метод дискретных элементов. Обзор работ этого направления можно найти в [9]. В статьях [10–12] компьютерное моделирование использовалось для изучения различных способов подачи газа в циклон на характеристики его работы. Компьютерному моделированию аэродинамики циклонов, а также расчетам эффективности пылеулавливания, посвящены также работы [13–20].

Применение модели переноса напряжений Рейнольдса требует решения отдельного уравнения для каждого из этих напряжений. Это делает модель более гибкой, но и требует использования значительных вычислительных ресурсов. Цель данной работы заключается в изучении возможности использования для моделирования гидродинамики циклонов моделей SST (Shear Stress Transport)  $k - \omega$  модели, нелинейной  $k - \epsilon$  модели, которую рекомендуют использовать для моделирования закрученных потоков, а также модели Смагоринского, реализованных в пакете программ Flow Vision. Последняя модель использует метод моделирования крупных вихрей. Полное описание моделей и ссылки на оригинальные работы можно найти в руководстве пользователя [21].

#### СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Имеющиеся экспериментальные данные по изучению поля скорости газа в циклонах весьма немногочисленны. К их числу относятся измерения осевой и тангенциальной составляющих скорости, предпринятые в работе [2].

Для расчетов по моделям SST и нелинейной  $k - \epsilon$ , использовалась равномерная прямоугольная сетка, общее число узлов которой равно  $1.2 \cdot 10^6$ ; для модели Смагоринского число узлов в результате процесса оптимизации сетки составило  $5.3 \cdot 10^6$ . Параметры модели использовались выбираемые по умолчанию. Геометрические размеры приняты в соответствии с приведенными в работе [2] для цилиндрико-конического циклона диаметром 300 мм. Через  $w_0$  обозначим среднюю скорость газа во входном патрубке, которая в рассматриваемых экспериментах составляла 20.18 м/с. Через  $R$  обозначим радиус циклона (150 мм). На рис. 1 и 2 представлены результаты расчетов и экспериментальные точки на двух расстояниях от верхней крышки циклона (225 мм и 600 мм соответственно). Профили осевой (а) и нормальной к плоскости рисунка (б) составляющих скорости представлены в плоскости  $y, z$ , проходящей через ось циклона параллельно входному патрубку.

При использовании модели SST расхождения между результатами расчетов и экспериментальными данными довольно заметные. Расчет осевой составляющей скорости неплохо согласуется с экспериментом вне зоны, примыкающей к оси. В осевой области согласование гораздо хуже. Так, на расстоянии 225 мм от крышки расчет дает зависимость осевой скорости от расстояния до оси,

которая не имеет локального минимума. Экспериментальная зависимость имеет другой характер. На других расстояниях до крышки хотя локальный минимум в этой области и появляется, расчетное значение максимальной осевой скорости примерно в два раза ниже экспериментального. Максимальное значение тангенциальной составляющей скорости, полученное расчетным путем, также заметно

меньше, чем максимальное значение, наблюдаемое в эксперименте. К тому же, согласно расчету, максимум достигается заметно ближе к стенке циклона. В целом, согласование расчетов с экспериментом, имеет преимущественно качественный характер. Делать какие-либо количественные выводы едва ли возможно, но общие закономерности расчет отражает верно.

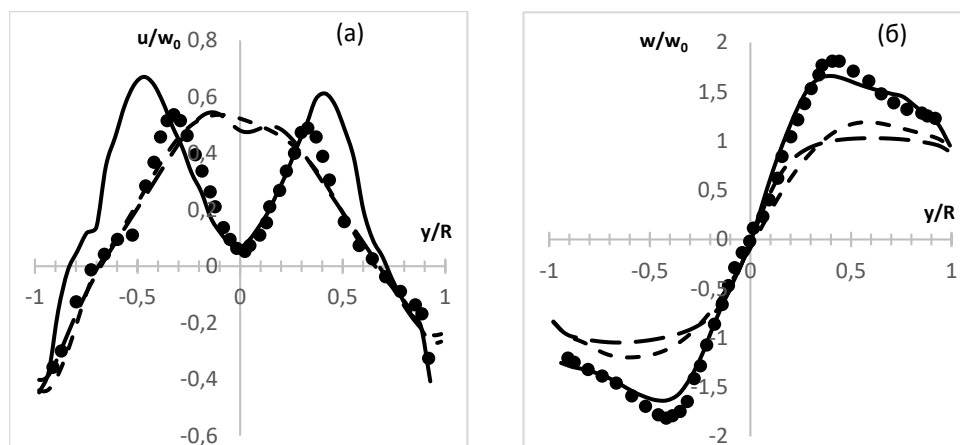


Рис. 1. Экспериментальные (точки) и расчетные (кривые) зависимости осевой (а) и тангенциальной (б) составляющих скорости от расстояния до оси циклона в безразмерных переменных на расстоянии 225 мм (1.5 R) от верхней крышки, цилиндрическая часть циклона. Штриховая линия с мелкими штрихами – расчет по SST модели, с крупными штрихами – по нелинейной  $k - \epsilon$  модели, сплошная – по модели Смагоринского

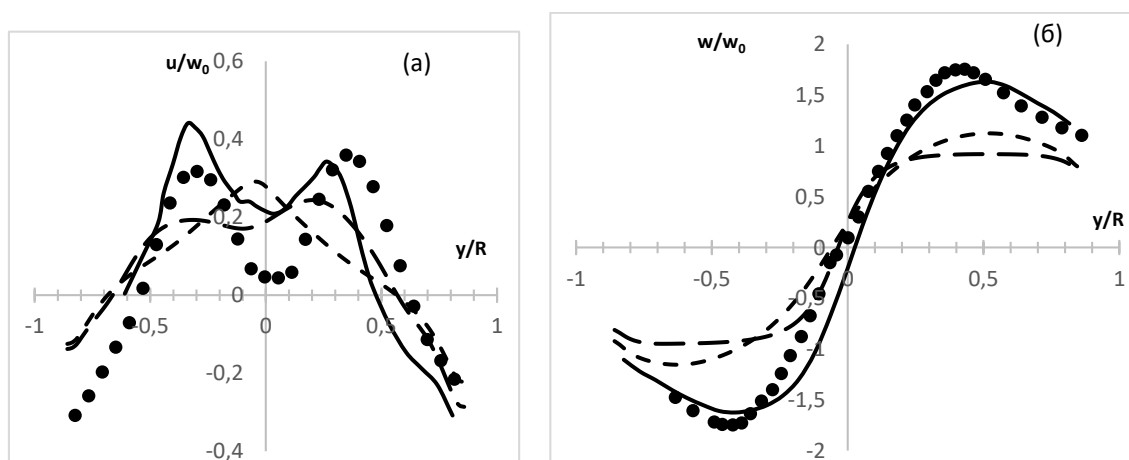


Рис. 2. Экспериментальные (точки) и расчетные (кривые) зависимости осевой (а) и тангенциальной (б) составляющих скорости от расстояния до оси циклона в безразмерных переменных на расстоянии 600 мм (4 R) от верхней крышки, коническая часть. Обозначения те же, что и на рис. 1.

Нелинейная  $k - \epsilon$  модель обладает теми же недостатками. На рис.2а видно, что при расчете по этой модели не появляется локальный минимум осевой скорости в приосевой зоне. Не реалистичным является характер изменения тангенциальной скорости по сечению в соответствии с этой моделью. В соответствии с расчетами зависимость тангенциальной скорости от расстояния до оси вне осевой зоны очень слабая.

При расчетах по модели Смагоринского затраты машинного времени на проведение вычислений гораздо более значительны. Кроме того, даже при значительном времени расчета сохраняются нерегулярные изменения решения. По этой причине требуется усреднение полученных результатов по некоторому временному интервалу. Зато согласование результатов расчета с данными эксперимента в значительной степени лучше, чем по

первым двум моделям. В особенности это относится к тангенциальной составляющей скорости. Максимальное значение этой величины по результатам расчетов оказывается несколько меньше экспериментальных значений, но различие сравнительно небольшое. Расположение точек, где достигаются эти значения, также неплохо согласуется с данными эксперимента. Наиболее заметными являются различия в зависимостях осевой скорости от поперечной координаты в осевой зоне.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты работы показывают, что использование модели Смагоринского, реализованное в пакете Flow Vision, позволяет адекватно рассчитывать течение газа в циклонах возвратно-поточного типа. Для успешного применения данного метода расчета необходимо верификация параметров расчетной модели на соответствие экспериментальным данным для подобных течений. В этом случае, результаты, полученные при компьютерном моделировании, становятся важным этапом по разработке газоочистного оборудования, позволяя выбрать наиболее перспективные конструкторские решения и сократить объем экспериментальных исследований.

*Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ (проект № 21-79-30029).*

*This work was supported by the Russian Science Foundation (project no. 21-79-30029).*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.*

*The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.*

#### ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. *Boysan F., Ayers W., Swithenbank J.* A fundamental mathematical modelling approach to cyclone design. *Trans. Inst. Chem. Eng.* 1982. V. 60. P. 222–230.
2. *Hoekstra A.J., Derksen J.J., Van den Akker H.E.A.* An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclone. *Chem. Eng. Sci.* 1999. V. 54. P. 2055–2065. DOI: 10.1016/S0009-2509(98)00373-X.
3. *Derksen J.J., Van den Akker H.E.A.* Simulation of vortex core precession in a reverse-flow cyclone. *AIChE J.* 2000. V. 46. P. 1317–1331. DOI: 10.1002/aic.690460706.
4. *Derksen J.J.* Separation performance predictions of a Stairmand high efficiency cyclone // *AIChE J.* 2003. V.49. P. 1359-1371. DOI: 10.1002/aic.690490603.
5. *de Souza F.J., de Vasconcelos Salvo R., de Moro Martins D.A.* Large Eddy Simulation of gas-particle flow in cyclone separators. *Sep. Purif. Technol.* 2012. V. 94. P. 61–70. DOI: 10.1016/j.seppur.2012.04.006.
6. *Brar L.S., Derksen J.J.* Revealing the details of vortex core precession in cyclones by means of large-eddy simulation. *Chem. Eng. Res. Des.* 2020. V. 159. P. 339–352. DOI: 10.1016/j.cherd.2020.04.030.
7. *Elsayed K., Lacor C.* The effect of the dust outlet geometry on the performance and hydrodynamics of gas cyclone. *Comput. Fluids.* 2012. V. 68. P. 134–147. DOI:10.1016/j.compfluid.2012.07.029.
8. *Chu K.W., Wang B., Xu D.L., Chen Y.X., Yu A.B.* CFD-DEM simulation of the gas-solid flow in a cyclone separator. *Chem. Eng. Sci.* 2011. V. 66. P. 834–847. DOI: 10.1016/j.ces.2010.11.026.
9. *El-Emam M.A., Zhou L., Shi W., Han C., Bai L., Agarwal R.* Theory and application of CFD-DEM coupling approach for granular flow: a review. *Arch. Comp. Meth. Eng.* 2021. V. 28. P. 4979–5020. DOI: 10.1007/s11831-021-09568-9
10. *Winfield D., Cross M., Croft N., Paddison D., Craig I.* Performance comparison of a single and triple tangential inlet gas separation cyclone: a CFD study. *Powder Technol.* 2013. V. 235. P. 520–531. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.10.026.
11. *Nassaj A.R., Toghraie D., Afrand M.* Effect of multi inlet guide channels on the performance of a cyclonic separator. *Powder Technol.* 2019. V. 356. P. 352-372. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.08.038.
12. *Gao Z., Wang J., Liu Z., Wei Y., Wang J., Mao Y.* Effects of different inlet structures on the flow field of cyclone separators. *Powder Technol.* 2020. V. 372. P. 519–531. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.06.014.
13. *Gao Z., Wang J., Wang J., Mao Y., Wei Y.* Analysis of the effect of vortex on the flow field of a cylindrical cyclone separator. *Sep. Purif. Technol.* 2019. V. 211. P. 438–447. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.08.024.
14. *Balestrin E., Decker R.K., Noriler D., Bastos J.C.S.C., H.F. Meier H.F.* An alternative for the collection of small particles in cyclones: Experimental analysis and CFD modeling. *Sep. Purif. Technol.* 2017. V. 184. P. 54–65. DOI: 10.1016/j.seppur.2017.04.023.
15. *Nakhaei M., Lu B., Tian Y., Wang W., Dam-Johansen K., Wu H.* CFD Modeling of Gas–Solid Cyclone Separators at Ambient and Elevated Temperatures. *Processes.* 2019. V. 8. P. 228. DOI: 10.3390/pr8020228.
16. *Yao Y., Huang W., Wu Y., Zhang Y., Zhang M., Yang H., Lyu J.* Effects of the inlet duct length on the flow field and performance of a cyclone separator with a contracted inlet duct. *Powder Technol.* 2021. V. 393. P. 12–22. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.07.044.
17. *Gao Z. W., Liu Z. X., Wei Y. D., Li C. X., Wang S. H., Qi X. Y., Huang W.* Numerical analysis on the influence of vortex motion in a reverse Stairmand cyclone separator by using LES model. *Petroleum Science.* 2022. V. 19(2). P. 848–860. DOI: 10.1016/j.petsci.2021.11.009.
18. *Bumrungthaiachan E.* How can the appropriate near-wall grid size for gas cyclone CFD simulation be estimated. *Powder Technol.* 2022. V. 396. P. 327–344. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.10.031.
19. *Celis G. E., Loureiro J. B., Lage P. L., Freire A. P. S.* The effects of swirl vanes and a vortex stabilizer on the dynamic flow field in a cyclonic separator. *Chem. Eng. Sci.* 2022. V. 248. 117099. DOI: 10.1016/j.ces.2021.117099.
20. *Zhang Z. W., Li Q., Zhang Y. H., Wang H. L.* Simulation and experimental study of effect of vortex finder structural parameters on cyclone separator performance. *Sep. Purif. Technol.* 2022. V. 286. 120394. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.120394.
21. *Flow Vision.* Руководство пользователя. Версия 3.12.04. – М. ООО «ТЕСИС», 1999-2021. 1593 с.

*Поступила в редакцию (Received) 17.08.2022*

*Принята к опубликованию (Accepted) 16.09.2022*