

Численное Исследование Модифицированного Центробежного Циклона

Муродил Эркинжон ўгли Мадалиев, Жахонгир Тожалиевич Орзиматов, Исмоилбек
Иброхимжон ўгли Исломов, Машрабжон Баходиржон ўгли Нўмонов
Фаргона политехника институти

Аннотация:

В работе проводится численное моделирование и исследование модифицированного центробежного циклона пылеуловителя. Модифицированный центробежный циклон был разработан одним из авторов статьи, который имеет высокую эффективность. Численное исследование проведено на основе пакета программ Comsol Multiphysics 5.6. В качестве модели турбулентности выбрана модель $k-\epsilon$. На основе полученных численных данных показано, что эффективность у модифицированного циклона существенно больше, чем у классического циклона.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 Feb 2022

Revised form 19 Mar 2022

Accepted 29 Apr 2022

Ключевые слова:

пылеуловитель, математическое моделирование, модели турбулентности, осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса.

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение атмосферы выбросами предприятий химической, строительной, машиностроительной и других отраслей промышленности стало поистине международной проблемой. Одними из наиболее распространенных техногенных загрязнителей атмосферного воздуха являются взвешенные частицы пыли, содержащиеся в отходящих газах промышленных предприятий. Очевидно, что решение задачи снижения выбросов пыли в окружающую среду лежит в области усовершенствования существующих, а также разработки и внедрении новых газоочистных оборудования. При этом, в некоторых производствах (таких как, производство красящих пигментов, цемента, технического углерода) требуется решить не только задачу эффективного выделения пыли из газового потока, но и ее классификации и возврата в производство, так как частицы определенного размера являются целевым продуктом. Очистка необходима не только для промышленных газов, но и для воздуха, поступающего в двигатели внутреннего сгорания. Известно, что добыча полезных ископаемых производится либо в карьерах, либо в шахтах. В тех и других случаях, транспортные и технические средства эксплуатируются в условиях высокой запыленности, что является вредной средой для их двигателей и силовых установок. Поэтому, срок бесперебойного функционирования эксплуатируемой техники в подобных условиях, существенно меньше, чем в обычных условиях.

Наибольшее распространение в промышленных предприятиях получили инерционные пылеуловители «сухого» типа, поскольку они просты в изготовлении и эксплуатации, надежны, обладают небольшим гидравлическим сопротивлением, а также способны работать при повышенной

температуре и большой начальной запыленности. Однако существующие конструкции инерционных аппаратов не всегда способны эффективно улавливать мелкодисперсную пыль [1,2].

Необходимо отметить, что развитие инерционных пылеуловителей нужно не только для уменьшения пылевых выбросов в окружающую среду или для защиты ДВС техники, но и стимулирует развитию других технологий. Например, инерционных пылеуловителей можно использовать в качестве сепаратора для разделения порошковых материалов по фракциям, а также как гидроциклон для извлечения твердых включений от жидкости и т.д.

Несмотря на множества различных конструкций инерционных пылеуловителей, используемые для промышленности проблема удержания мелкой пыли еще далека от своего решения. Потому, что эффективность инерционных пылеуловителей для стандартной пыли как правило не превышает 85%. Несмотря на разработку различных инерционных пылеуловителей, все еще они уступают по эффективности рукавным фильтрам. Однако известно, что рукавных фильтров не везде можно использовать. Поэтому разработка еще более эффективных инерционных пылеуловителей является важной проблемой, т.к. они долговечны и их можно использовать фактически во всех технологических процессах.

Во многих случаях для повышения эффективности устройства является не разработка принципиально нового, а модификация существующего. Поэтому в настоящей работе проводится исследование модифицированного циклона. Исследование носит в основном сравнительный характер, т.е. сравниваются эффективности классического циклона с модифицированным. На рисунке 1 представлена принципиальная схема классического центробежного пылеуловителя (циклон).

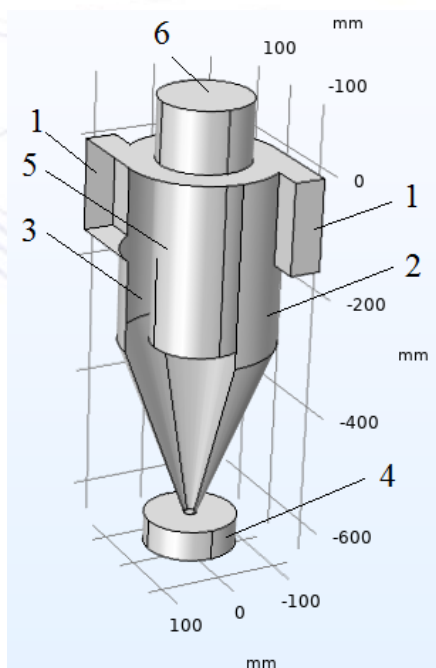


Рис. 1. Классический центробежный пылеуловитель. 1-вход в спиральный воздухозаборник, 2- цилиндрический корпус пылеуловителя, 3- конусный корпус пылеуловителя, 4-бункер, 5- труба для отвода очищенного воздуха, 6-выход очищенного воздуха.

Устройство работает в результате всасывания воздуха вентилятором разрежения через трубу для отвода 5. Следовательно, пылевой поток воздуха всасывается в спиральный воздухозаборник 1, где приобретает вращательное движение и движется вниз между цилиндрическим корпусом 2 и трубой для отвода воздуха 5. В данной зоне за счет центробежной силы частицы пыли будут смещаться к внутренней поверхности цилиндрического корпуса 2. В зоне, где начинается конусная часть корпуса происходит разделение потока воздуха от пыли, т.к. воздух будет стремиться во вход отводной трубы 5, а частицы пыли прижимаясь к внутренней поверхности конуса по инерции движутся в бункер, где они и оседают.

Выше было сказано, что эффективность пылеулавливания такого устройства для стандартной пыли не высока. Поэтому для повышения эффективности одним из авторов настоящей статьи была разработана конструкция высокоэффективного центробежного пылеуловителя [3], принципиальная схема которого показана на рисунке 2. Как видно из рисунка особенностью модифицированного центробежного пылеуловителя состоит в том, что в нем присутствуют такие элементы как стабилизатор потока 7 и внутренний конус. Из рисунка видно, что стабилизатор потока это патрубок который вставляется во вход отводящей трубы. Поэтому определенная часть воздуха поступает в отводную трубу через коаксиальное пространство между патрубком и отводной трубой, а остальная часть через сечения патрубка. Таким образом, патрубок распределяет поступающий поток воздуха в отводную трубу по высоте, что приводит к уменьшению возникающих вредных обратных вихрей. Это в свою очередь приводит и к уменьшению уноса мелких частиц пыли.

Анализ классического центробежного пылеуловителя (рис.1) показывает, что пыль собираясь на внутренней поверхности конуса образует слой определенной толщины. Ясно, что с увеличением толщины этого слоя будет увеличиваться и унос частиц в отводящую трубу. Следовательно, одним из способов увеличения эффективности пылеуловителя является уменьшения толщины пылевого слоя. Внутренний конус в модифицированном пылеуловителе как раз и служит для этой цели. Потому, что крупные частицы пыли собираясь около стенки поступают в пространство между конусами, а мелкие частицы накапливаются на поверхности внутреннего конуса. При этом мелкие частицы образуют существенно меньший слой. Поэтому унос частиц пыли также существенно уменьшится.

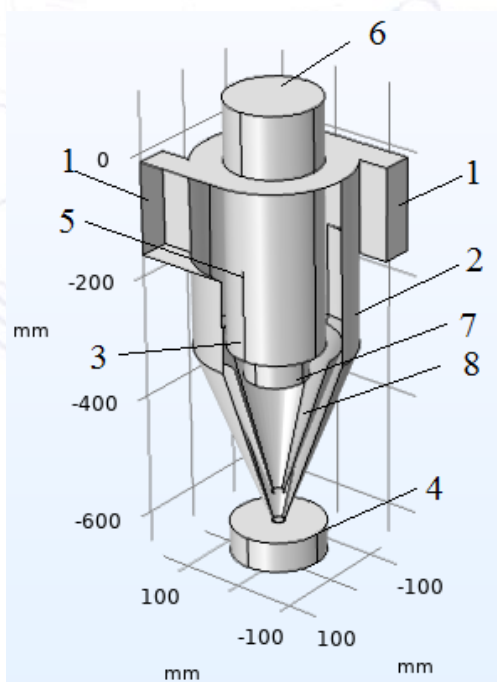


Рис. 2. Модифицированный центробежный пылеуловитель. 1-вход в спиральный воздухо-заборник, 2- цилиндрический корпус пылеуловителя, 3- конусный корпус пылеуловителя, 4-бункер, 5- труба для отвода очищенного воздуха, 6-выход очищенного воздуха. 7-стабилизатор потока, 8-внутренний конус.

Целью настоящей работы является моделирование двухфазного течения в центробежных пылеуловителях и сравнение эффективностей пылеулавливания классического и модифицированного циклонов. Моделирования аэродинамических процессов двухфазного потока внутри пылеуловителей проведены на основе пакета программ Comsol Multiphysics 5.6, где была использована модель турбулентности $k-\epsilon$.

Физическая И Математическая Постановки Задачи.

Для исследования динамики потока рассмотрим систему уравнений гидродинамики. При этом сделаем предположение, что объемная плотность частиц в основной зоне потока пренебрежимо мала по сравнению с плотностью потока газа. Действительно, в реальных пылеуловителях плотность пыли

не превосходит 10 г/м^3 , а плотность воздуха $1,29 \text{ кг/м}^3$. Однако плотность пыли около стенки за счет скопления может намного превосходить данный показатель. Но это происходит довольно в узком слое, размером которого по сравнению с характерными параметрами пылеуловителя можно пренебречь.

Для численного исследования поставленной задачи используется система уравнений Навье-Стокса осредненные по Рейнольдсу [4, 5]. В системе уравнений не учитываются силы, обусловленные эффектами турбулентной миграции, Сэфмена, Магнуса (подъемная сила) и Кориолиса. Потому, что они существенно меньше чем центробежная сила. Таким образом, для математического моделирования процессов переноса пылевых частиц и аэрозолей в пылеуловителях является достаточным учет центробежной, гравитационной и Стоксовской силы.

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + F + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + v_t) \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \right], \\ \frac{\partial \bar{U}_{pi}}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_{pi}}{\partial x_j} = k_m (\bar{U}_i - \bar{U}_{pi}), \quad \frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \bar{U}_{pi} \frac{\partial \rho_m}{\partial x_j} = D \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial \rho_m}{\partial x_j} + \frac{\partial \rho_m}{\partial x_i} \right], \quad \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_j} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

здесь \bar{U}_i – соответственно аксиальная, радиальная и тангенциальная составляющие скорости воздушного потока; \bar{U}_{pi} – аналогичные составляющие скорости для m -ой фракции пыли; \bar{p} – гидростатическое давление; ρ – плотность газа; v, v_t – молекулярная и турбулентная вязкостей; ρ_m – массовая плотность пыли; k_m – коэффициент взаимодействия между воздухом и m -ой фракции пыли; N – число фракций пыли; $D = \frac{\rho}{S_c(\rho + \rho_p)}(v + v_t)$ – коэффициент диффузии для твердой фазы, $S_c = 0.8$ – коэффициент Шмидта.

Коэффициент взаимодействия между фазами определялся через параметр Стокса:

$$k_m = \frac{18\rho v}{\rho_p \delta_m^2}.$$

В данном выражении ρ_p – плотность материала частиц пыли, δ_m – “эффективный» диаметр частиц.

В работе [6] подробно было описана модель турбулентности k - ϵ . Модель турбулентности k - ϵ в тензорном виде имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \rho k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \epsilon \rho, \\ \frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \rho \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} P_k - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}. \end{cases} \quad (2)$$

где P_k — генерация энергии турбулентных пульсаций, турбулентная вязкость вычисляется как

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad v_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

По моделированию кинематики движения частиц в турбулентном двухфазном потоке отсутствует единое представление, которое позволило бы правильно описать объект [7]. Модель, основанная на концепции «траекторных частиц», считается некорректной из-за отсутствия учета фактора взаимодействия рейнольдсовых напряжений и частиц. С другой стороны, неоспоримы преимущества лагранжева подхода, более близкого к реальным процессам и позволяющего получить необходимую информацию о траекториях частиц, времени нахождения частиц в аппарате, минимальном размере улавливаемых частиц [8–11]. В связи с этим в настоящей работе для моделирования эффективности центробежного пылеуловителя использован лагранжев подход.

Численное решение представленных систем уравнений проводилось в физических переменных скорость–давление путем физического расщепления полей скорости и давления [12]. Численное решение уравнения переноса проводится на гибридной, шахматной разностной сетке методом контрольного объема. При численном решении систем уравнений (1-2) использован одинаковый метод.

Вычислительный эксперимент проводился при трех скоростях потока 1) $U_0 = 7 \text{ м/с}$, $U_0 = 10 \text{ м/с}$, 2) 3) $U_0 = 13 \text{ м/с}$. Суммарная плотность твердой фазы на входе была равна $\rho_m = 10 \text{ г/м}^3$ и распределена по сечению однородно.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основными факторами, влияющими на эффективность работы пылеуловителя, являются скорость газового потока во входном патрубке, размеры и плотность частиц пыли. Поэтому в работе проведены сравнения при скоростях на входе 1) $U_0 = 7 \text{ м/с}$, 2) $U_0 = 10 \text{ м/с}$, 3) $U_0 = 13 \text{ м/с}$. На рис. 3 представлены изолинии и векторы поля скоростей в пылеуловителях.

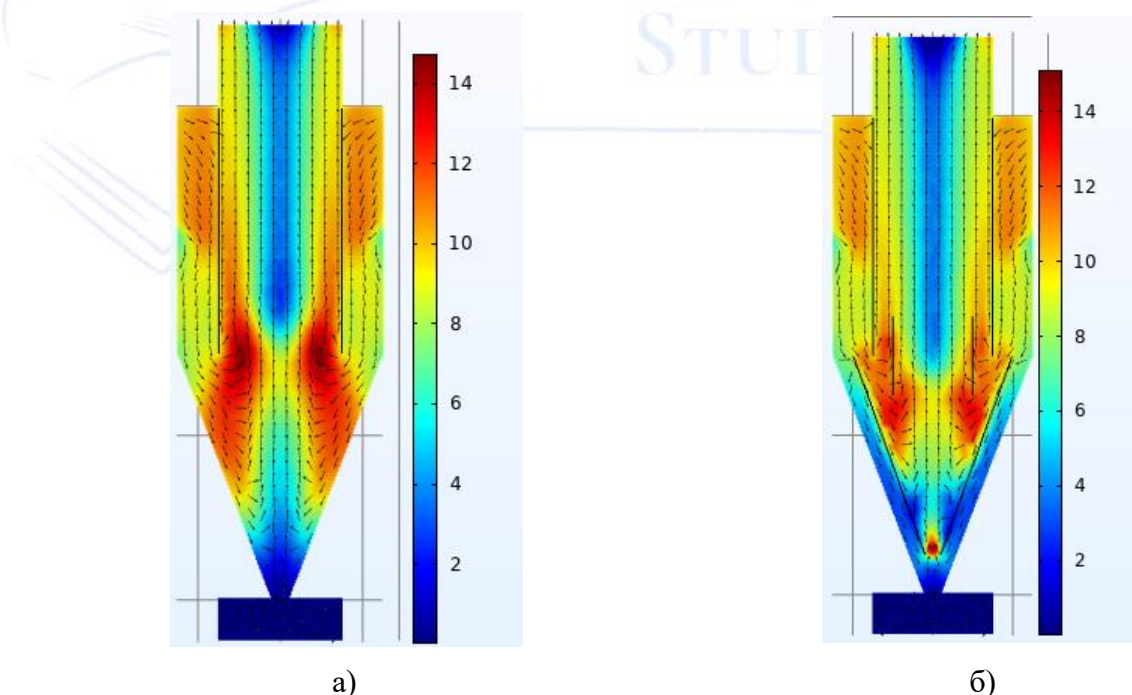


Рис.3. Изолинии и векторы поля скорости в пылеуловителях при $U_0 = 7 \text{ м/с}$. а) Классический центробежный пылеуловитель, б) Модифицированный центробежный пылеуловитель

В рис. 4 представлены изолинии давления в пылеуловителях.

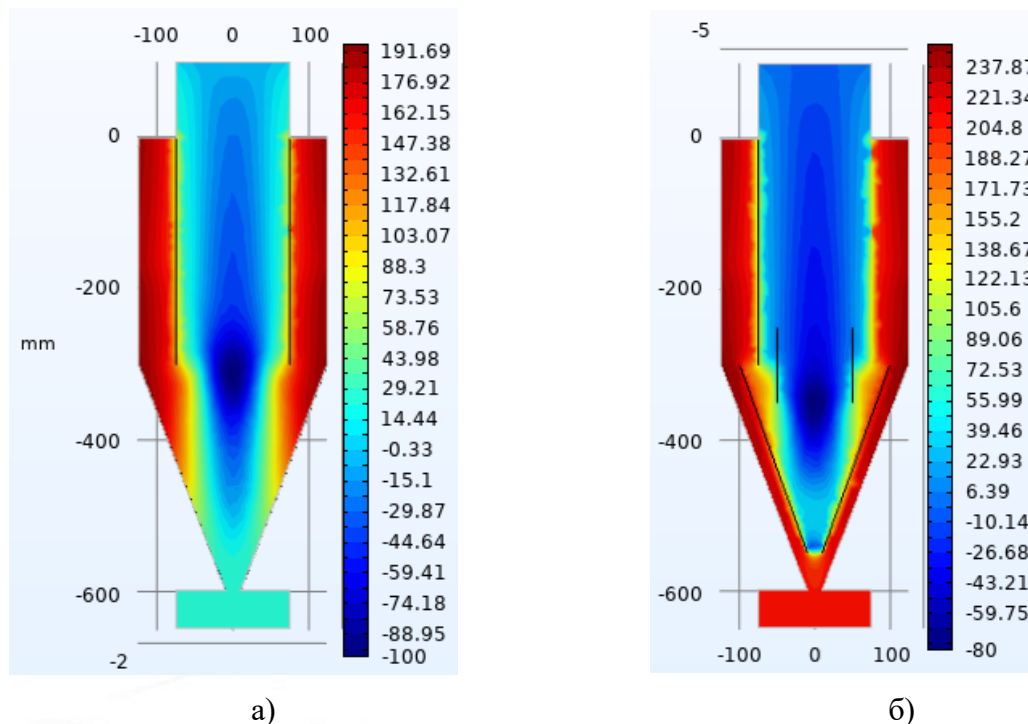
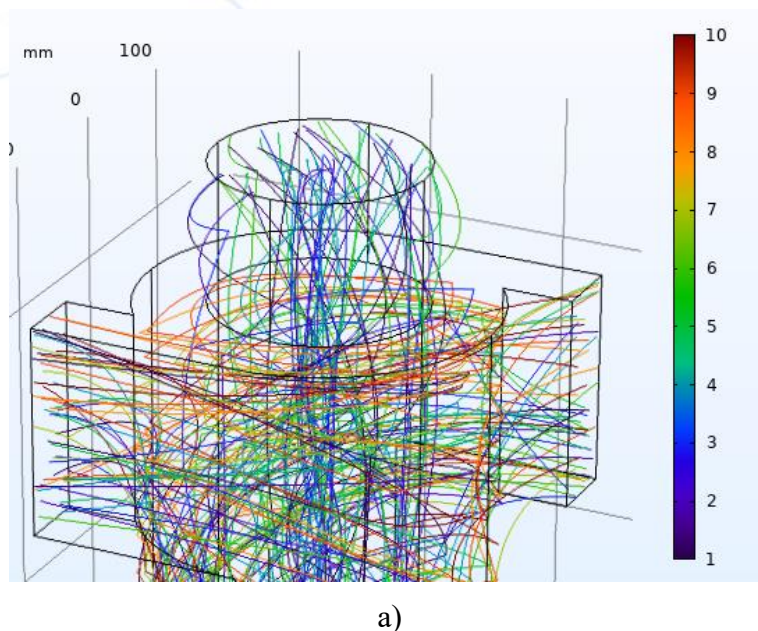
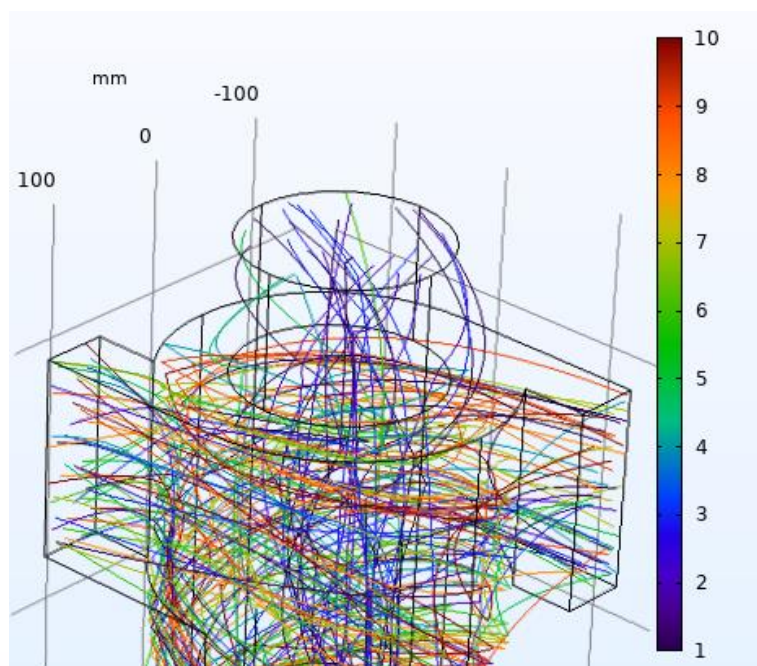


Рис.4. Изолинии давления центральной части пылеуловителя при $U_0 = 7 \text{ м/с}$, а) Классический центробежный пылеуловитель, б) Модифицированный центробежный пылеуловитель

В рис. 5 представлены траектории движения частиц (окрашенные в соответствии с их размерами) в верхней части пылеуловителей при скорости на входе в аппарат $U_0 = 7 \text{ м/с}$.





б)

Рис. 5. Траектории движения частиц (окрашенные в соответствии с их размерами) в верхней части пылеуловителя при скорости на входе в аппарат $U_0 = 7 \text{ м/с}$. а) Классический центробежный пылеуловитель, б) Разработанный центробежный пылеуловитель

Для определения эффективности пылеуловителей на рис. 6 представлены процентные значения уходящих частиц пыли определенной фракции при скорости воздуха на входе $U_0 = 7 \text{ м/с}$.

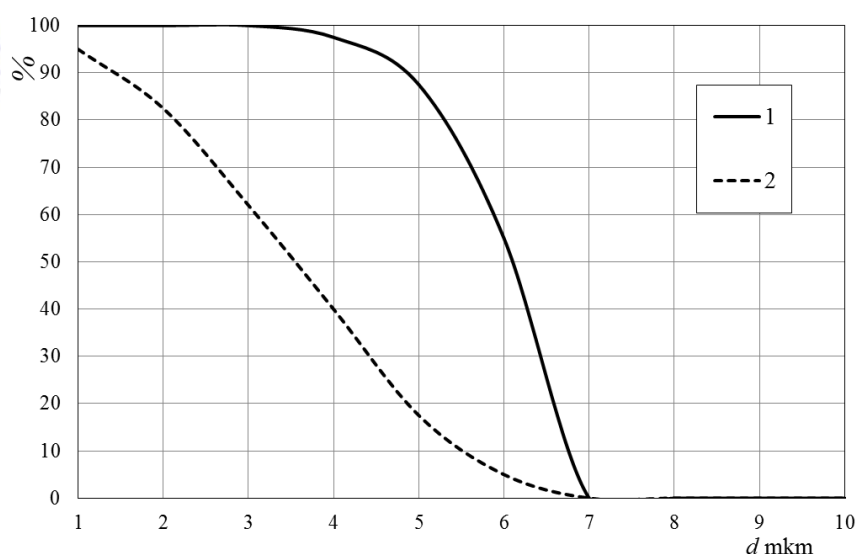
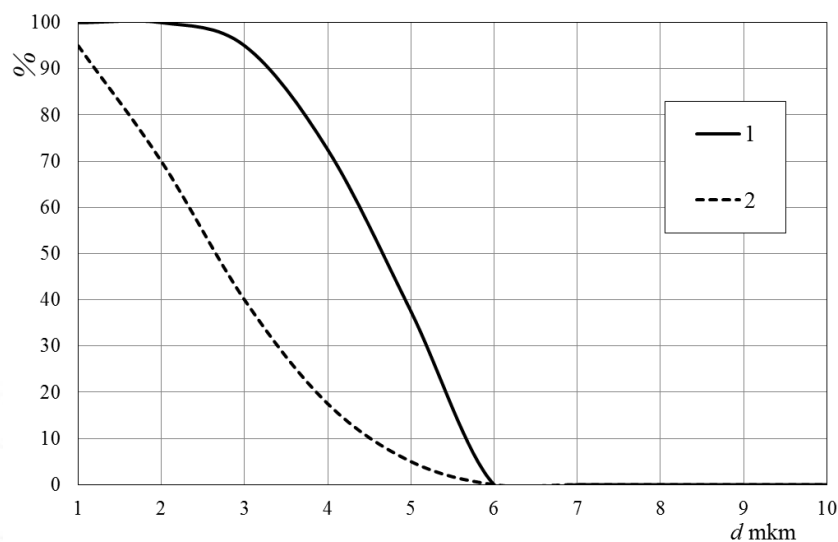


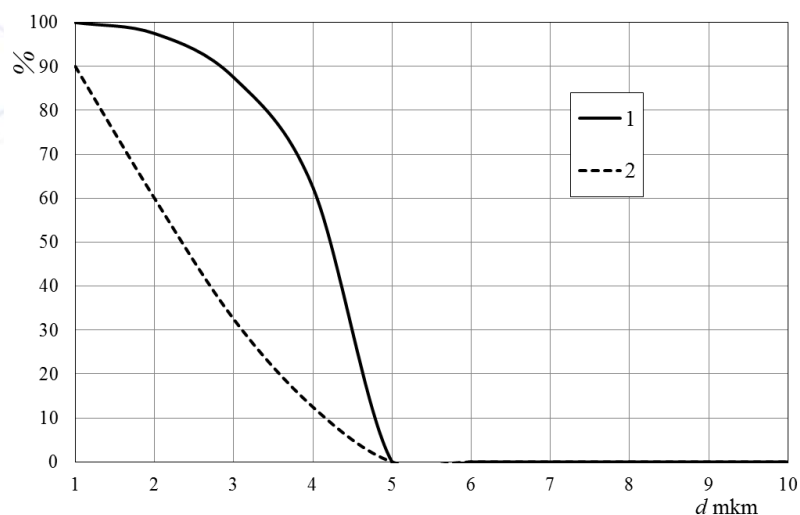
Рис. 6. Процентный показатель уходящих частиц из пылеуловителей при а) $U_0 = 7 \text{ м/с}$. 1) Классический центробежный пылеуловитель, 2) Разработанный центробежный пылеуловитель

Из рис. 6 видно, что оба пылеуловителя полностью улавливают частиц более 7 мкм. Преимущество модифицированного [13] пылеуловителя проявляется для частиц менее 7 мкм. Например для частиц 4 мкм классический центробежный пылеуловитель улавливает только 2%, а модифицированный центробежный пылеуловитель 60%.

С целью увеличения эффективности пылеуловителей проведены расчеты для скоростей воздуха на входе $U_0 = 10, 13 \text{ м/с}$. На рис. 7 представлены численные результаты уноса частиц пыли.



а)



б)

Рис. 7. Выходящий частиц из пылеуловителях при а) $U_0 = 10 \text{ м/с}$, б) $U_0 = 13 \text{ м/с}$. 1) Классический центробежный пылеуловитель, 2) Разработанный центробежный пылеуловитель

Из приведенных графиков видно, что увеличение скорости потока воздуха с 7 м/с до 13 м/с приводит к уменьшению от 40% до 10% уноса для частиц диаметром 4 мкм, т.е. унос уменьшается в четыре раза.

ВЫВОДЫ

В работе использован пакет программ Comsol Multiphysics 5.6 для моделирования аэродинамических процессов двухфазного потока внутри классического и модифицированного центробежных пылеуловителей. При этом использована модель турбулентности $k-\varepsilon$. Полученные результаты подтверждают, что модифицированный центробежный пылеуловитель эффективнее, чем классический циклон. Таким образом, можно утверждать, что моделирование аэродинамических процессов с помощью современных пакетов программ является эффективным инструментом для проектирования различных пылеуловителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Л.В.Чекалова, Экотехника. Защита атмосферного воздуха от выбросов пыли, аэрозолей и туманов/ под ред. Ярославль: Русь, Кондор-Эко, 2004.
2. Н.И. Володин [и др.], Пылеуловители инерционно-центробежного типа // Экология и промышленность России. 2002. № 7. С. 13-14.
3. Маликов З.М. Разработка высокоэффективных центробежных пылеуловителей на основе теории аэродинамических процессов: Дисс.. д-ра тех. наук (01.02.05), Ташкент, 2016. – 211 с.
4. M.E. Madaliev. Numerical Calculation of an Air Centrifugal Separator Based on the SARC Turbulence Model // Journal of Applied and Computational Mechanics. 6(SI), 2020, – P.1133-1140. ISSN: 2383-4536, DOI: 10.22055/JACM. 2020.31423.1871.
5. Z. M. Malikov, M. E. Madaliev. Numerical Simulation of Two-Phase Flow in a Centrifugal Separator. Fluid Dynamics, 2020, Vol. 55, No. 8, pp. 1012–1028. © Pleiades Publishing, Ltd., 2020.
6. Launder, B.E.; Spalding, D.B. (1974). "The numerical computation of turbulent flows". Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 3 (2): 269–289. Bibcode:1974CMAME...3..269L. doi:10.1016/0045-7825(74)90029-2
7. Старк С.Б. Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве. - М.: Металлургия, 1990 г. - 396 стр.
8. Тимонин А.С. Инженерно-экологический справочник, т.2. - Калуга: изд-во Н. Бочкаревой, 2003 г. - 884 стр.
9. Чуянов Г.Г. Обезвоживание и пылеулавливание. - Екатеринбург, 2003 г. - 196 стр.
10. Швыдкий В.С. Очистка газов, справочное издание. – М.: Машиностроение, 2001, 501 с.
11. Штокман Е.А. Очистка воздуха.-М.: Изд. АСВ. 1999.
12. Patankar S.V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Taylor&Francis. ISBN 978-0-89116-522-4, 1980.
13. Патент IAP 04154. Узбекистан. Центробежный пылеуловитель / З.М. Маликов [и др.].- Оpubл. 20.06.2008.
14. Madraximov, M. M., Nurmuxammad, X., & Abdulkhaev, Z. E. (2021, November). Hydraulic Calculation Of Jet Pump Performance Improvement. In *International Conference On Multidisciplinary Research And Innovative Technologies* (Vol. 2, pp. 20-24).
15. Usarov, M. K., & Mamatisaev, G. I. (2020, November). Calculation on seismic resistance of box-shaped structures of large-panel buildings. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 971, No. 3, p. 032041). IOP Publishing.

16. Рашидов, Ю. К., Исмоилов, М. М., Орзиматов, Ж. Т., Рашидов, К. Ю., & Каршиев, Ш. Ш. (2019). Повышение эффективности плоских солнечных коллекторов в системах теплоснабжения путём оптимизации их режимных параметров. In *Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность-2019* (pp. 1366-1371).
17. Madraximov, M., Yunusaliev, E., Abdulhayev, Z., & Akramov, A. (2021). *Suyuqlik va gaz mexanikasi fanidan masalalar to'plami*. GlobeEdit.
18. Madaliev, M. E. U., Rakhmankulov, S. A., Shoev, M. A. U., & Ibrokhimov, A. R. U. (2021). Modeling of Deformation Processes and Flow of Highly Concentrated Suspensions in Cylindrical Pipelines. *Middle European Scientific Bulletin*, 18, 128-136.
19. Abdulkhaev, Z., Madraximov, M., Abdurazaqov, A., & Shoyev, M. (2021). Heat Calculations of Water Cooling Tower. *Uzbekistan Journal of Engineering and Technology*.
20. Arifjanov, A., Otaxonov, M., & Abdulkhaev, Z. (2021). Model of groundwater level control using horizontal drainage. *Irrigation and Melioration*, 2021(4), 21-26.
21. Abdulkhaev, Z. E., Abdurazaqov, A. M., & Sattorov, A. M. (2021). Calculation of the Transition Processes in the Pressurized Water Pipes at the Start of the Pump Unit. *JournalNX*, 7(05), 285-291.
22. Rashidov, Y. K., Rashidov, K. Y., Mukhin, I. I., Suratov, K. T., Orzimatom, J. T., & Karshiev, S. (2019). Main reserves for increasing the efficiency of solar thermal energy in heat supply systems. *Applied Solar Energy*, 55(2), 91-100.
23. АБДУЛҲАЕВ, З., & МАДРАХИМОВ, М. (2020). Гидротурбиналар ва Насосларда Кавитация Ҳодисаси, Окибатлари ва Уларни Бартараф Этиш Усуллари. *Ўзбекгидроэнергетика” илмий-техник журнали*, 4(8), 19-20.
24. Usarov, M., Ayubov, G., Mamatisaev, G., & Normuminov, B. (2020, July). Building oscillations based on a plate model. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 883, No. 1, p. 012211). IOP Publishing.
25. Usarov, M., Ayubov, G., Usarov, D., & Mamatisaev, G. (2022). Spatial Vibrations of High-Rise Buildings Using a Plate Model. In *Proceedings of MPCPE 2021* (pp. 403-418). Springer, Cham.
26. Madaliev, M. E. U., Maksudov, R. I., Mullaev, I. I., Abdullaev, B. K., & Haidarov, A. R. (2021). Investigation of the Influence of the Computational Grid for Turbulent Flow. *Middle European Scientific Bulletin*, 18, 111-118.
27. Madaliev, M. E. U., Rakhmankulov, S. A., & Tursunaliev, M. M. U. (2021). Comparison of Finite-Difference Schemes for the Burgers Problem. *Middle European Scientific Bulletin*, 18, 76-83.
28. Рашидов, Ю. К., Рашидов, К. Ю., Мухин, И. И., Суръатов, Х. Т., Орзиматов, Ж. Т., & Каршиев, Ш. Ш. (2019). Основные резервы повышения эффективности использования солнечной тепловой энергии в системах теплоснабжения. *Гелиотехника*, 55(1), 19.