

УДК 519.63

А. М. АЛКИБ, Д. А. БРЕГА, Р. А. ХОДАК

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА СЕПАРАТОРОВ ЦИКЛОННОГО ТИПА, ИНТЕГРИРОВАННЫХ В КОМПЛЕКС ГАЗИФИКАЦИИ СЫРЬЯ**

Предложена математическая модель расчета параметров сепараторов циклонного типа, использующихся в качестве ступени очистки генераторного газа. Модель описывает взаимодействие дискретной фазы с потоком газа, позволяя определять эффективность очистки в зависимости от геометрии сепаратора, параметров твердой фракции и расходов газа. Выполнен сравнительный анализ экспериментальных и численных результатов на примере тестовой задачи. Рассмотрена модель сепаратора, обеспечивающая наименьший перепад давления при высокой эффективности очистки. Расхождение полученных результатов с экспериментом составило менее 5%.

Ключевые слова: эффективность газоочистки циклонного типа, геометрия сепаратора, модель турбулентности, гидравлическое сопротивление.

Введение

В настоящее время проблема очистки воздуха является важной составляющей любого этапа производства, не только изделий аэрокосмической техники, но и общего машиностроения. Традиционно наиболее эффективно для очистки воздуха внутри производственных помещений зарекомендовали себя сепараторы циклонного типа благодаря своей надежности, эффективности и низкой стоимости [1]. Их широкое применение на участках покраски, гальванической обработки, предопределило их применение для более специализированного ряда задач в составе комплексов газификации, что продиктовано необходимостью предварительной очистки генераторного газа от твердой фракции. Наиболее массовой группой воздухоочистителей являются циклонные сепараторы, реализующие инерционный, а также гравитационный принцип очистки.

Степень очистки в циклоне сильно зависит от дисперсного состава частиц пыли в поступающем на очистку газе (с повышением диаметра фракции повышается эффективность очистки). Для распространенных циклонов типа ЦН степень очистки может достигать: для частиц с условным диаметром 20 микрон – 99.5%; для диаметра 10 микрон – 95%; для диаметра 5 микрон – 83%.

Недостатками являются высокое гидравлическое сопротивление, невозможность улавливания пыли с малым размером частиц и небольшая долговечность, обусловленная абразивными свойствами пыли. При использовании циклонов для газоочистки в составе установки для плазменной газификации возникает вопрос о корректном подборе параметров

циклона. Повышение эффективности фильтрации приводит к запырению генераторного газа внутри газификатора. Перепад давления между входом и выходом циклона может составлять более 20 кПа. Наиболее рациональным подходом для расчета геометрических параметров циклона является математическое моделирование. Применение таких вычислительных пакетов как Ansys CFX и Ansys Fluent во многом упрощает задачу проектирования циклонного сепаратора.

Цель работы: разработка в среде CAD / CAE - пакетов математической модели для определения эффективности газоочистки и гидравлического сопротивления сепараторов циклонного типа. Экспериментальное подтверждение результатов математического моделирования ступени очистки. Выполнение оптимизации геометрии циклонного сепаратора для снижения его гидравлического сопротивления. Математическое описание процессов, протекающих в сепараторе, выполнено с использованием метода Эйлер-Лагранжа, для непрерывной среды использовался подход Эйлера, а для описания дискретной фазы применялся метод Лагранжа. Описание движения сжимаемой жидкости осуществлялось посредством системы уравнений Навье-Стокса:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0,$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i,$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(u_i (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i \right) + \frac{\partial P}{\partial t} -$$

$$-\tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H,$$

где t – время;
 u – скорость газа;
 ρ – плотность газа;
 P – давление газа;
 S_i – внешние массовые силы, действующие на единичную массу газа;
 h – энтальпия;
 Q_H – тепло, выделяемое тепловым источником в единичном объеме газа;
 τ_{ij} – тензор вязких сдвиговых напряжений;
 q_i – диффузионный тепловой поток, нижние индексы означают суммирование по трем координатным направлениям.

Для моделирования частиц порошка используется метод баланса сил, выражающийся следующей формулой:

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{18\mu C_D Re}{\rho d_p^2} \frac{24}{24} (u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p}.$$

Коэффициент аэродинамического сопротивления, C_D , с четырьмя эмпирическими константами для учета несферической природы частиц представлен как:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + \alpha_1 Re^{\alpha_2}) + \frac{\alpha_3 Re}{\alpha_4 + Re},$$

где
 $\alpha_1 = \exp(2,3288 - 6,4581\varphi + 2,44\varphi^2),$
 $\alpha_2 = 0,0964 + 0,5565\varphi,$
 $\alpha_3 = \exp(4,905 - 13,8944\varphi - 20,7322\varphi^2 - 10,2599\varphi^3),$
 $\alpha_4 = \exp(1,4681 - 12,2584\varphi - 20,7322\varphi^2 + 15,8855\varphi^3).$

Турбулентный поток дисперсных частиц получаем путем интегрирования уравнений, описывающих траекторию движения частицы, используя мгновенное значение скорости жидкости, $u_i^e + u_i^i(t)$, вдоль траектории движения частицы за время одной итерации T_L :

$$u_i^i = \zeta \sqrt{\frac{2k}{3}}, \quad T_L \approx 2C_L \frac{k}{\varepsilon}.$$

В качестве объекта исследования была выбрана модель циклона Lapple, $D = 0,2$ м, скорость газа на входе в циклон 20 м/с. Его геометрическая модель представлена на рис. 1, соответствующие параметры приведены в таб. 1.

Следует отметить, что представленная система уравнений Навье-Стокса не замкнута, а характеристики потока (скорость, давление, плотность) заменены суммами осреднённых и пульсационных со-

ставляющих, которые определяются исходя из принятой модели турбулентности.

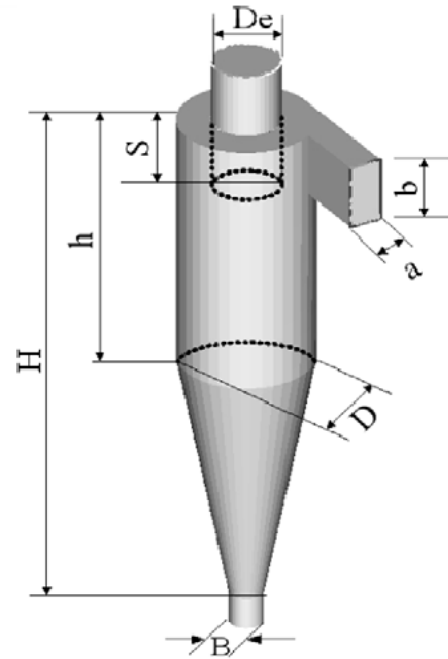


Рис. 1. Геометрическая модель циклона

Таблица 1
 Геометрические параметры расчетной модели циклона

a/D	b/D	De/D	S/D	h/D	H/D	B/D
0,25	0,5	0,5	0,625	2,0	4,0	0,25

При моделировании внутренних течений обычно используются RANS модели турбулентности: k-ε, модель напряжений Рейнольдса - ASM и RSM [2]. k-ε модель турбулентности построена на предположении об изотропной турбулентной вязкости, поэтому она не подходит для моделирования циклона, который имеет выраженную анизотропную турбулентность. ASM не можем предсказать зону рециркуляции и вихрь Ранкина в сильно закрученном потоке [3]. RSM модель не применяет изотропный подход, а решает уравнения переноса для каждого компонента напряжений Рейнольдса. Данная модель является наиболее подходящей для моделирования потока в циклоне в рамках RANS подхода. Недостатком RSM являются повышенные требования к вычислительным мощностям (7 уравнений в RSM против 2-х в k-ε). Наиболее точное решение можно получить используя DES или LES модели турбулентности [4], однако они требуют на несколько порядков большего разрешения конечно-элементных сеток (рис. 2).

Сравнительные характеристики указанных моделей турбулентности приведены ниже на рис. 3.

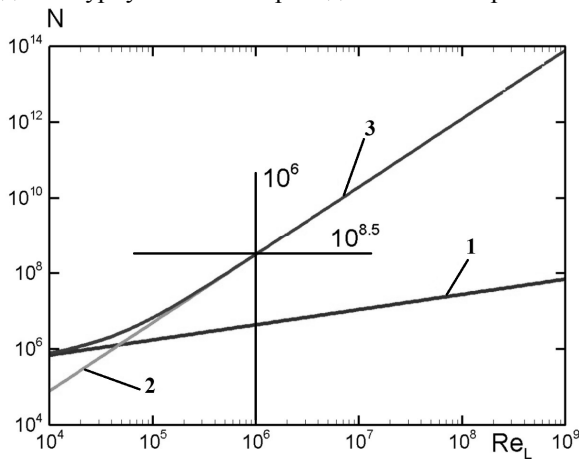


Рис. 2. Зависимость числа ячеек сетки во внутренней (1) и внешней областях (2) пограничного слоя на плоской пластине и общего числа ячеек (3), от числа Рейнольдса для LES модели [4]

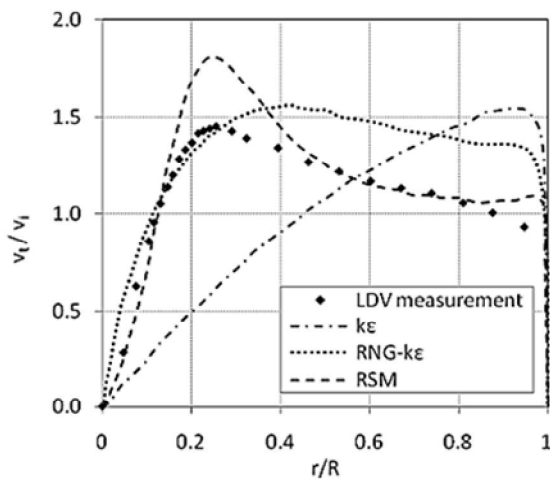


Рис. 3. Сравнительный анализ рассчитанных значений тангенциальной скорости для разных моделей турбулентности [5]

Как видно из рис. 3 ни одна из RANS моделей не дает достаточной точности при описании течения внутри сепаратора. Наиболее оправданным с точки зрения точности и вычислительных затрат будет выбор гибридной модели турбулентности SAS SST, которая имеет все преимущества моделей LES и DES при значительно меньших требованиях к количеству элементов сетки. [6]

Система уравнений Навье-Стокса замыкается уравнениями SAS-SST модели турбулентности:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j k) = P_k - \rho c_\mu k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right],$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \omega) = a \frac{\omega}{k} P_k - \rho \beta \omega^2 + Q_{SAS} +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + (1 - F_1) \frac{2\rho}{\sigma_{\omega 2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j},$$

$$Q_{SAS} = \max \left[\rho \zeta_2 k S^2 \left(\frac{L}{L_{vK}} \right)^2 - C \frac{2\rho k}{\sigma_\Phi} \max \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{1}{\omega^2} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \frac{1}{k^2} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right), 0 \right].$$

Результаты исследований

Численное решение рассмотренных систем дифференциальных уравнений осуществлялось в системе конечно-элементного анализа Ansys Fluent. Пример расчетной сетки модели приведен на рис. 4.

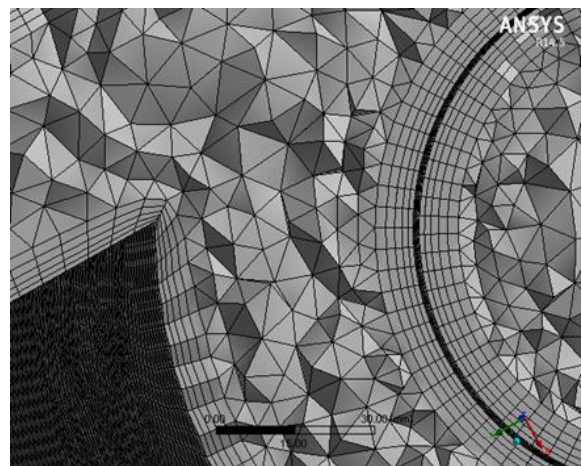
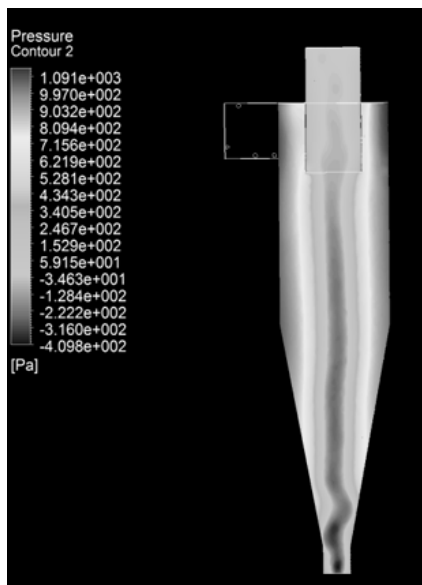


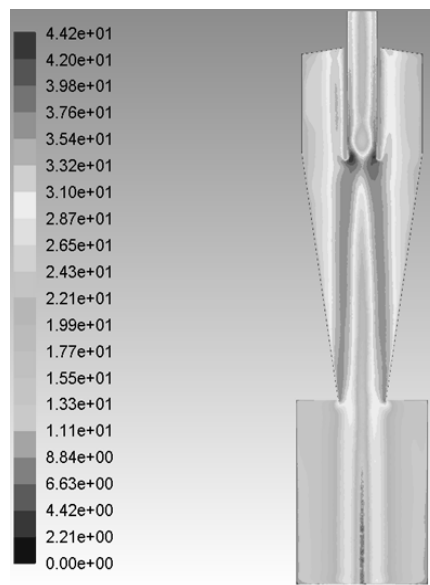
Рис. 4. Расчетная сетка модели

Результаты численного моделирования, а также сравнение с экспериментальными данными приведены на рис. 5, 6.

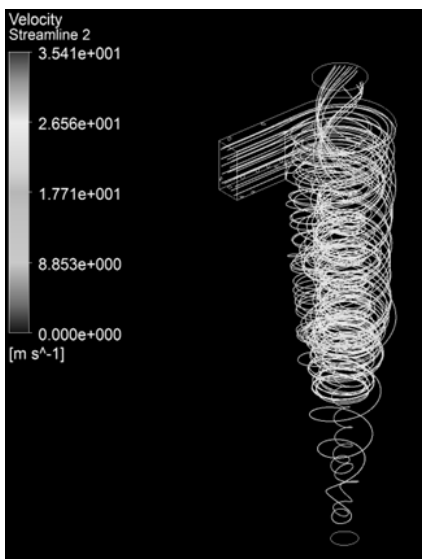
Наибольшее влияние на эффективность пылеулавливания играет геометрия входного патрубка и диаметр выходного отверстия. С уменьшением диаметра на выходе сепаратора эффективность его работы возрастает, однако при этом растет коэффициент гидравлического сопротивления циклона. Используя результаты гранулометрического анализа, значения размеров входного и выходного патрубка были пересчитаны для получения максимальной эффективности улавливания медианного диаметра дискретной фазы. В качестве начальных условий принят расход прокачиваемого через газификатор газа - 130 м³/час, насыпная плотность фракции - 1800 кг/м³, распределение по диаметрам - закон Розина-Раммлера. Результаты численного моделирования для оптимизированной геометрии приведены на рис. 7, 8.



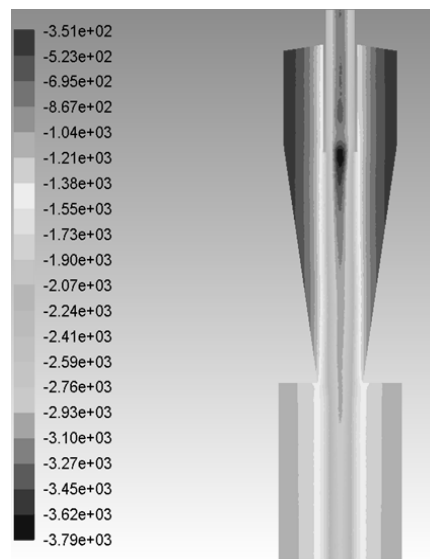
а



а



б



б

Рис. 5. Результаты расчетов:
а – поле давлений, Па; б – линии тока

Рис. 7. Результаты моделирования:
а – поле скоростей, м/с; б – поле давлений, Па

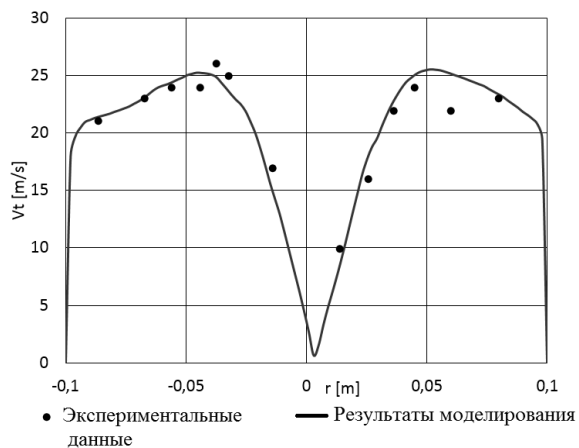


Рис. 6. Сравнительный анализ результатов численного расчета и эксперимента [7]

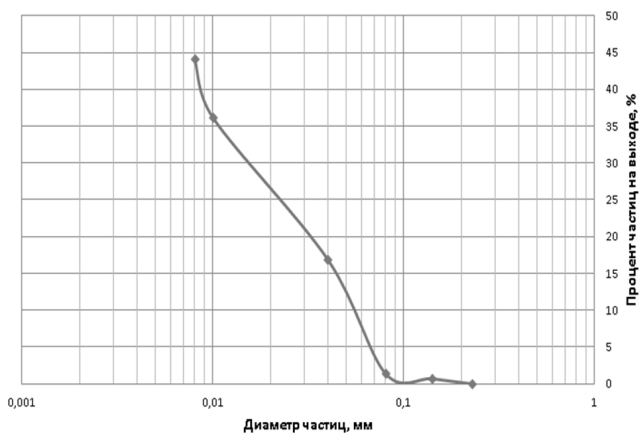


Рис. 8. Процентное содержание частиц различного диаметра на выходе из циклона

Исходя из полученных результатов, был изготовлен опытный образец сепаратора и проведена серия экспериментов по замеру перепада давления между входным и выходным патрубком – рис. 9.

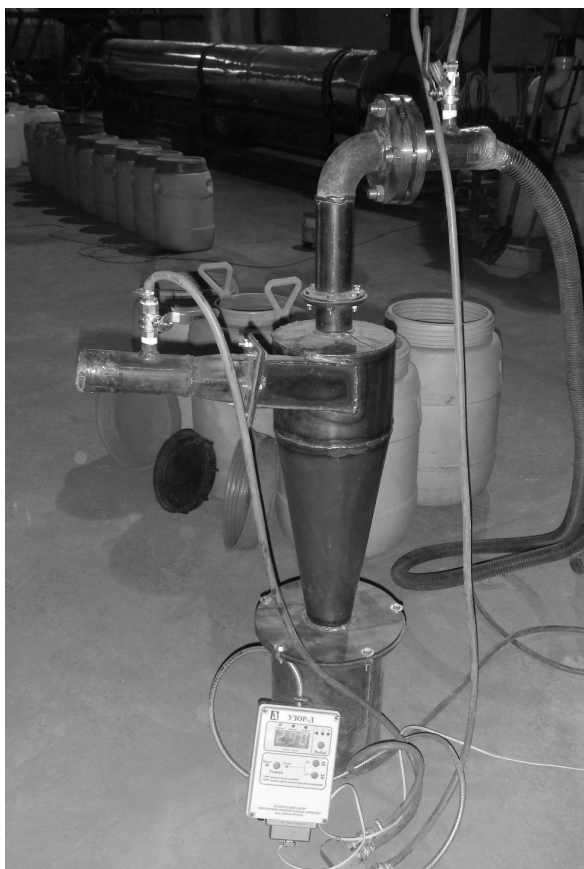


Рис. 9. Опытный образец циклонного сепаратора

Отклонение расчетного значения перепада давления (2490 Па) на циклоне от полученного в эксперименте (2640 Па) составило 5,6%.

Заключение

Предложена модель для расчета параметров сепараторов циклонного типа при использовании их в качестве ступени очистки генераторного газа. Модель описывает взаимодействие дискретной фазы с потоком газа, позволяя определять эффективность очистки в зависимости от геометрии сепаратора, параметров твердой фракции и расходов газа. На примере тестовой задачи показано количественное и качественное совпадение параметров циклона с экспериментальными данными. Предложена модель сепаратора, обеспечивающая наименьший перепад давления при высокой эффективности очистки. Полученные результаты подтверждены экспериментально.

Литература

1. Zhonglin, Xu. *Fundamentals of air cleaning technology and its application in cleanrooms [Text]* / Xu Zhonglin. – Springer Berlin Heidelberg, 2014. – P. 133-183.
2. Kajishima, T. *Numerical simulation of turbulent flows [Text]* / Takeo Kajishima, Kunihiko Taira. – Springer International Publishing, 2016. – P. 207-235.
3. Menter, F. R. *Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [Text]* / F. R. Menter // *AIAA-Journal*. – 1994. – № 32(8). – P. 269 – 289.
4. Piomelli, U. *Wall-layer models for large-eddy simulations [Text]* / U. Piomelli, E. Balaras // *Annual Rev. Fluid Mech.* – 2002. – № 34. – P. 349-374.
5. Utikar, R. D. *Hydrodynamic Simulation of Cyclone Separators [Text]* / R. D. Utikar // *Computational Fluid Dynamics*. – 2010. – № 11. – 247 p.
6. Menter, F. R. *A scale-adaptive simulation model for unsteady turbulent flow predictions [Text]* / F. R. Menter, Y. Egorov // *Flow, Turbulence and Combustion*. – 2010. – № 85. – P. 113 – 138.
7. Wang, B. X. *Numerical study of gas solid flow in a cyclone separator [Text]* / B. X. Wang // *Applied Mathematical Modeling*. – 2006. – № 30. – P. 1326-1342.

References

- 1 Zhonglin, Xu. *Fundamentals of air cleaning technology and its application in cleanrooms*, Springer Berlin Heidelberg Publ., 2014, pp. 133-183.
2. Kajishima, Takeo, Taira, Kunihiko. *Numerical simulation of turbulent flows*, Springer International Publishing Publ., 2016, pp. 207-235.
3. Menter, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA-Journal*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 269 – 289.
4. Piomelli, U., Balaras, E. Wall-layer models for large-eddy simulations. *Annual Rev. Fluid Mechanic*, 2002, vol. 34, pp. 349-374.
5. Utikar, R. D. Hydrodynamic Simulation of Cyclone Separators. *Computational Fluid Dynamics*, 2010, vol. 11, 247 p.
6. Menter, F. R., Egorov, Y. A scale-adaptive simulation model for unsteady turbulent flow predictions. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2010, vol. 85, pp. 113 – 138.
7. Wang, B. X. Numerical study of gas solid flow in a cyclone separator. *Applied Mathematical Modeling*, 2006, vol. 30, pp. 1326-1342.

Поступила в редакцию 2.02.2017, рассмотрена на редколлегии 15.03.2017

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ СЕПАРАТОРІВ ЦИКЛОННОГО ТИПУ, ЯКІ ІНТЕГРОВАНО В КОМПЛЕКС ГАЗИФІКАЦІЇ СИРОВИНИ

А. М. Алкиб, Д. А. Брега, Р. А. Ходак

Запропоновано математичну модель розрахунку параметрів сепараторів циклонного типу, що використовуються в якості ступені очищення генераторного газу. Модель описує взаємодію дискретної фази з потоком газу, дозволяючи визначати ефективність очищення в залежності від геометрії сепаратора, параметрів твердої фракції і витрат газу. Розглянуто модель сепаратора, що забезпечує найменший перепад тиску при високій ефективності очищення. Отримані результати підтверджено експериментально, похибка склала менше 5%.

Ключові слова: ефективність газоочистки циклонного типу, геометрія сепаратора, модель турбулентності, гідравлічний опір.

ENHANCEMENT OF METHODS FOR CALCULATING THE CYCLONE SEPARATORS EFFICIENCY INTEGRATED TO THE GASIFICATION COMPLEX

A. M. Alkeeb, D. A. Brega, R. A. Khodak

A mathematical model is proposed for calculating the parameters of cyclone separators used as the purification stage of the generator gas. The model describes the interaction of the discrete phase with the gas flow, allowing to determine the cleaning efficiency depending on the geometry of the separator, the parameters of the solid fraction and gas flow rates. The separator model providing the smallest pressure drop at high cleaning efficiency is considered. The obtained results are confirmed experimentally, the error was less than 5%.

Key words: cyclonic type gas cleaning efficiency, separator geometry, turbulence model, hydraulic resistance.

Алкиб Ахмет – аспірант кафедри технологій виробництва летательних апаратів, Национальний аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: ah87ah@yahoo.com.

Брега Дмитрий Андреевич – канд. техн. наук, доцент кафедри технологій виробництва летательних апаратів, Национальний аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: brega10.04@gmail.com.

Ходак Роман Александрович – аспірант кафедри технологій виробництва летательних апаратів, Национальний аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: roma.khodak@gmail.com.

Alkeeb Ahmed – post-graduate student of aircraft manufacturing technologies department, National Aerospace University. N. Ye. Zhukovsky "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: ah87ah@yahoo.com.

Brega Dmitry Andreevich – Ph.D., Associate Professor of aircraft manufacturing technologies department, National Aerospace University. N. Ye. Zhukovsky "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: brega10.04@gmail.com.

Khodak Roman Aleksandrovich – post-graduate student of the department of aircraft production technologies, National Aerospace University. N. Ye. Zhukovsky "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: roma.khodak@gmail.com.