

Рис. 2. Распределение температуры вблизи поверхности конуса при наличии локального вдува.

На основании результатов экспериментально-теоретического исследования влияния локального вдува газа в пограничный слой при обтекании осесимметричной модели в диапазоне чисел Маха $M = (2 \div 5)$ определены основные термогазодинамические характеристики течения.

Качественный анализ полученных результатов при обтекании конуса со вдувом и без вдува показал существенное влияние вдува на динамику пограничного слоя и формирование конуса Маха.

ЛИТЕРАТУРА:

1. E.A. Maslov, V.V. Klochikhin, I.K. Zharova. Experimental research of supersonic flow around simulating rocket-ramjet, MATEC Web of Conferences 23,01026 (2015)
2. E.A. Maslov, V.V. Faraponov, N. N. Zolotorev, A.V. Chupashev, V.V. Matskevich, S.Yu. Chizhov, MATEC Web of Conferences 92, 01056 (2017)
3. V.G. Artonkin, P.G. Leutin, K.P. Petrov, Scientific works CAI. 92 1413 (1972)
4. Yu.V. Sheludko, *Physical and gas-dynamic ballistic studies* (Science, Leningrad, 1980)

Научный руководитель: Е.А. Маслов, к.ф.-м.н., доцент каф. ТПТ ЭНИН ТПУ.

МЕТОДЫ ОЦЕНОК КЛАССИФИКАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СЕПАРАТОРАХ

С.Р. Эсенбеков¹, Н. Жангарач уулу¹, А.С. Разва²
Томский политехнический университет^{1,2}
ЭНИН, ТПТ, группа 5ФМ61¹

Введение. Циклонные и вихревые аппараты широко используются в системах сепарации дисперсных материалов в технологиях пылеприготовления на

электростанциях, получения порошковой продукции в производствах строительных материалов, обогащения руд, химических, металлургических производствах. На рис. 1 приведена схема измельчения крупного материала, в которой неизмельченный материал из классификатора возвращается на вход мельницы.

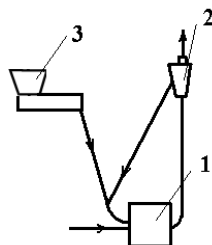


Рис. 1. Схема измельчения: 1—мельница, 2—классификатор, 3—бункер

В отличие от пылеуловителей в классификаторах эффективность процесса определяется степенью загрязненности мелкого продукта крупными частицами. Имеются несколько методов оценки эффективности классификации [1–3]. В пылеприготовлении топлив эффективность системы определяется относительным остатком $R_3(0,09)$ просеянной массы пробы мелкого продукта через сито 90 мкм. В обогатительной практике эффективность $E = \frac{\varepsilon - \gamma}{1 - \frac{\alpha}{\beta_T}} = \frac{\gamma(\beta - \alpha)}{\alpha \left(1 - \frac{\alpha}{\beta_T}\right)}$,

где $\varepsilon = \frac{\gamma\beta}{\alpha}$ извлечение ценного продукта, α —содержание ценного компонента в исходном материале, β —то же в обогащенном продукте, β_T —теоретически предельно возможное содержание ценного компонента, γ — выход обогащенного продукта [4]. Для классификаторов эффективность— отношение фактической разницы между извлечением данного класса крупности в мелкий продукт и выходом мелкого продукта к теоретически возможной их разнице [5]. В этом случае $E = \frac{\varepsilon_m - \gamma_m}{1 - \alpha}$. В общем случае, безотносительно к гранулометрическому составу, характеристикой процесса классификации является $\varphi_\delta(\delta)$ —зависимость доли фракции, выносимой из аппарата в мелкий продукт от размера этой фракции. Существует размер частицы δ_* , для которого $\varphi_\delta(\delta_*)=0,5$. Гранулометрический состав исходного материала характеризуется кривой остатков $R_1(\delta)$, крупного продукта $R_2(\delta)$, мелкого продукта $-R_3(\delta)$ на ситах с ячейкой размером δ . Если $\varphi_\delta(\delta)$ и $R_1(\delta)$ определены, можно найти связь $\varphi_\delta(\delta)$ и $R_1(\delta)$ [2]. Отклонение от идеальности процесса классификации, при котором $R_3(\delta)=0$ при размере ячейки сита $\delta > \delta_*$, определяется величиной $\chi_\varphi = \frac{\delta_{0,75}}{\delta_{0,25}}$, где $\delta_{0,75}$ и $\delta_{0,25}$ — размеры частиц фракций, выносимых в тонкий продукт на 75 и 25 %.

Величина χ_φ характеризует эффективность классификатора. К.п.д. классификатора определяется величиной [2]

$$\eta_{3M} = \int_0^1 \varphi_{\delta}(\bar{\delta}) d\bar{\delta}, \quad (1)$$

где $\bar{\delta} = \delta/\delta_*$ [2].

Другой оценкой эффективности классификации является соотношение [3], в которой эффективность реального процесса представляется как эффективность идеального процесса, уменьшенного на долю деления

$$\eta_{3P} = 1 - \frac{\int_0^{\delta_*} (1 - \varphi) dx + \int_0^{\delta_*} \varphi dx}{2 \int_0^{\delta_*} \varphi dx \left(1 - \int_0^{\delta_*} \varphi dx \right)}, \quad (2)$$

где $x = \frac{\delta - \delta_{\min}}{\delta_{\max} - \delta_{\min}}$. Барский М.Д. [6] предлагает эффективность классификации определять по соотношению

$$\eta_{3B} = \frac{\int_0^{y_*} \varphi dy}{y_*} - \frac{\int_0^1 \varphi dy}{1 - y_*}, \quad (3)$$

где $y = \delta/\delta_{\max}$, $y_* = \delta_*/\delta_{\max}$.

Циклонный пылеуловитель можно рассматривать как классификатор для микронных частиц. В пылеулавливании фракционная эффективность сепарации частиц в циклонах представляется функцией интеграла вероятности и может

быть записана в общем виде $\eta_{2i} = \Phi(X_{2i})$, где $\Phi(X_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{X_2} \exp\left(-\frac{X_2^2}{2}\right) dX_2$,

$X_{2i} = \frac{\lg \delta_i/\delta_{50}}{\lg \sigma_{2\eta}}$, $\sigma_{2\eta} = \frac{\delta_{84}}{\delta_{50}} = \frac{\delta_{50}}{\delta_{16}}$, где δ_{84} , δ_{50} – размер частиц улавливаемых циклоном с

эффективностью 84 и 50% [7]. По методу НИИОГАЗ экспериментально определяется диаметр частицы, улавливаемой циклоном с эффективностью 50%, а также определяется дисперсия эффективности $\lg \sigma_{2\eta}$ для других частиц, которая находится с привлечением интеграла вероятности [8], являющегося выражением фракционной эффективности обеспыливания газа в циклоне [7]. При этом для подобных циклонов экспериментально найденная дисперсия имеет одно и то же значение, а диаметр частицы δ_{50} , улавливаемой с эффективностью 50%, пересчитывается на другие условия с использованием числа подобия Стокса. Табличные значения $\lg \sigma_{2\eta}$, δ_{T50} для стандартных циклонов и условий приведены в [7]. $Stk_{50} = 2\tau_{50}W_{\text{ц}}/D$; $\tau_{50} = \rho_{\delta}\delta_{50}^2/18\mu$. При одной и той же эффективности обеспыливания, откуда $\delta_{50} = \delta_{T50} (D/D_T \cdot \rho_{T\delta}/\rho_{\delta} \cdot \mu/\mu_T \cdot W_{\text{ц}}/W_{\text{ц}})^{0,5}$, где динамическая вязкость газа [7] $\mu_T = 22,2 \cdot 10^{-6}$ Па·с; расходная плановая скорость, например циклона ЦН–15, $W_T = 3,5$ м/с; диаметр цилиндрической части циклона $D_T = 0,6$ м; плотность частиц $\rho_{T\delta} = 1930$ кг/м³.

Оценки классификационных эффектов в циклонных сепараторах

Очевидно, что фракционный унос $\varphi_{\delta}(\delta_i) = \Phi(X_{3i}) = 1 - \Phi(X_{2i}) = \Phi(-X_{2i})$, где

$$X_{3i} = -\frac{\lg(\delta_i/\delta_{50})}{\lg(\sigma_{2\eta})} = \frac{\lg(\delta_{50}/\delta_i)}{\lg \sigma_{2\eta}}. \text{ Величина } \sigma_3^2 = \frac{\delta_{0,84}}{\delta_{0,16}} = \frac{\delta_{0,84}}{\delta_{0,50}} \frac{\delta_{0,50}}{\delta_{0,16}} = \frac{1}{\sigma_{2\eta}^2} \text{ также представляет}$$

оценку отклонения процесса от идеальности. В последнем выражении $\delta_{0,84}$ и $\delta_{0,16}$ – размеры частиц, выносимых из циклона на 84 и 16%. Найдем связь

$$\chi_{\varphi} = \frac{\delta_{0,75}}{\delta_{0,25}} \text{ с величиной } \sigma_3 = \frac{1}{\sigma_{2\eta}} = \frac{\delta_{0,84}}{\delta_{0,5}} = \frac{\delta_{0,5}}{\delta_{0,16}}. \text{ Из табличных значений}$$

$\Phi(X_{3(0,75)}) = 0,75$. Для этого значения $\Phi(X_{3(0,75)}) = 0,75$ [7] имеем

$$X_{3(0,75)} = \frac{\lg \delta_{0,5}/\delta_{0,75}}{\lg(\sigma_{2\eta})} \approx 0,68; \frac{\delta_{0,75}}{\delta_{0,5}} = \left(\frac{1}{\sigma_{2\eta}}\right)^{0,68}; \frac{\delta_{0,84}}{\delta_{0,5}} = \frac{1}{\sigma_{2\eta}}; \text{ откуда } \frac{\delta_{0,75}}{\delta_{0,84}} = \sigma_{2\eta}^{0,32}. \text{ Аналогичный}$$

расчет показывает, что $X_{3(0,25)} = \frac{\lg \delta_{0,5}/\delta_{0,25}}{\lg(\sigma_{2\eta})} \approx -0,68; \frac{\delta_{0,25}}{\delta_{0,5}} = \sigma_{2\eta}^{0,68}; \frac{\delta_{0,16}}{\delta_{0,50}} = \sigma_{2\eta}^1$. Дальней-

ший расчет показывает, что

$$\chi_{\varphi} = \frac{\delta_{0,75}}{\delta_{0,25}} = \sigma_{2\eta}^{-1,36}. \quad (4)$$

Эффективность классификации (1) не учитывает проскок крупных частиц

в мелкий продукт. Пусть $S_3 = \int_0^1 \varphi_{\delta}(\bar{\delta}) d\bar{\delta} = 1 - \int_0^1 \eta_2 d\bar{\delta}$, $S_1 = 1 - \int_0^1 \varphi_{\delta}(\bar{\delta}) d\bar{\delta} = \int_0^1 \eta_2 d\bar{\delta}$,

$S_2 = \int_1^{\delta_m} \varphi_{\delta}(\bar{\delta}) d\bar{\delta} = \int_1^{\delta_m} \eta_2 d\bar{\delta}$, где δ_m – максимальный размер частицы, попавшей в мел-

кий продукт (рис.2). Очевидно $S_3 + S_1 = 1$. Примем за максимальный размер частицы, размер частицы, улавливаемый с эффективностью 99%, минимальный размер частицы, размер частицы, улавливаемой с эффективностью 1%. Определим эффективность классификации в циклоне, учитывая проскок крупных частиц по отношению к целевому продукту, как

$$\eta_{3\Sigma} = S_3 - S_2. \quad (5)$$

Сравним величины $\chi_{\varphi}, \eta_{3M}, \eta_{3P}, \eta_{3\Sigma}, \eta_{3B}$ в предположении, что распределение эффективности классификации частиц для тонкого продукта в циклоне подчиняется нормально-логарифмическому закону. Сравнение проведем для циклонов ЦН-15у и СДК-ЦН-33 [7]. Схемы циклонов приведены на рис. 3.

Для этих циклонов $(\delta_{T50})_{\text{цн}} = 6$ мкм; $(\lg \sigma_{2\eta})_{\text{цн}} = 0,283$; $(\delta_{T50})_{\text{сдк}} = 2,3$ мкм; $(\lg \sigma_{2\eta})_{\text{сдк}} = 0,364$ [7].

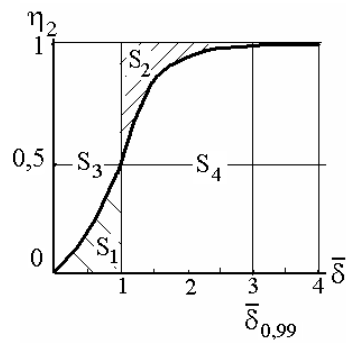


Рис. 2. Интегральные значения эффективностей перераспределения частиц

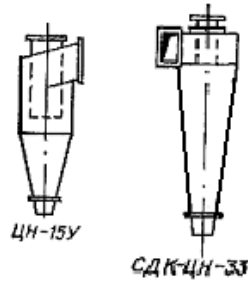


Рис.3. Схемы циклонов.

Парциальные эффективности циклонов в вероятностно логарифмической сетке представлены на рис. 4.

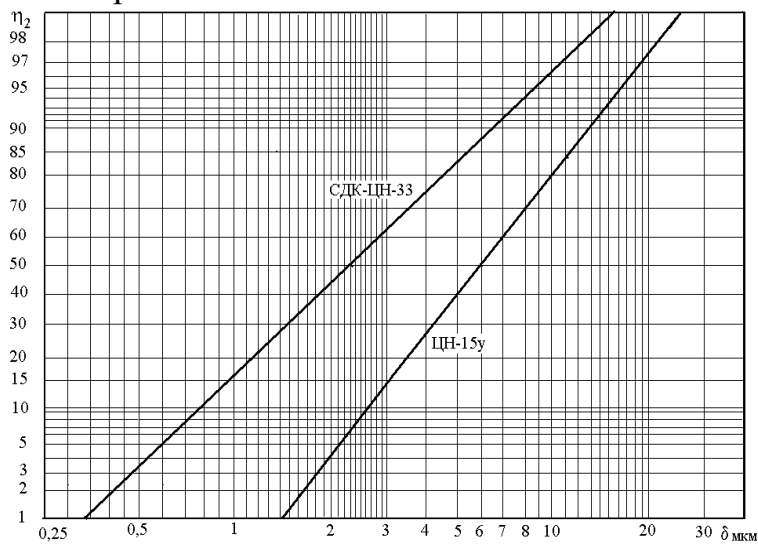


Рис. 4. Парциальные эффективности циклонов в вероятностно-логарифмической сетке.

На рис. 5. те же эффективности представлены в координатах $\eta_2, \bar{\delta}$, $\bar{\delta} = \delta / \delta_{50}$, где δ_{50} – размер частиц, улавливаемых с эффективностью 50 %.

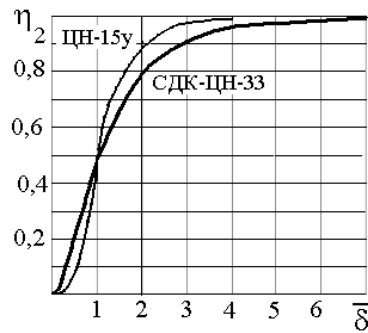


Рис. 5. Парциальные эффективности циклонов от безразмерного диаметра частиц

Формулу (2) в соответствии с рисунком 2 преобразуем в виде

$$\eta_{3P} = 1 - \frac{1}{2} \frac{S_1 + S_2}{(S_3 + S_2) \left[1 - \frac{1}{\bar{\delta}_{0,99} - \bar{\delta}_{0,01}} (S_3 + S_2) \right]}, \quad (6)$$

где $\bar{\delta}_{0,99} = \delta_{0,99} / \delta_{0,5} = \sigma^{2,33}$, $\bar{\delta}_{0,01} = \delta_{0,01} / \delta_{0,5} = \sigma^{-2,33}$. Аналогично формулу (3) преобразуем в виде

$$\eta_{3B} = S_3 - \frac{S_2}{\bar{\delta}_{0,99} - 1}. \quad (7)$$

Запишем, аналогично (6), средне интегральную эффективность пылеулавливания циклоном

$$\eta_{2\Sigma} = \frac{S_1 + (\bar{\delta}_{0,99} - 1) S_2}{\bar{\delta}_{0,99}} = 1 - \frac{S_2 - S_1 + 1}{\bar{\delta}_{0,99}}. \quad (8)$$

Расчет показывает, что $\eta_{2\Sigma\text{СДК}} = 0,80$, $\eta_{2\Sigma\text{ЦН}} = 0,734$.

Сравнение оценок эффективностей классификации мелких частиц в циклонах по приведенным соотношениям представлено в таблице 1.

Табл. 1. Расчетные величины.

Циклон	σ	S_3	S_2	$\chi_\varphi(4)$	η_{3M}	η_{3P}	η_{3B}	$\eta_{3\Sigma}(5)$
СДК-ЦН	2,31	0,80	0,54	0,32	0,80	0,66	0,72	0,26
ЦН-15у	1,91	0,84	0,36	0,42	0,84	0,70	0,76	0,48

Из таблицы видно, что корреляция прослеживается у формул (4) и (5), причем в большинстве случаев при сравнительной оценке эффективности различных аппаратов используют величину $\chi_\varphi = \frac{\delta_{0,75}}{\delta_{0,25}}$ [2]. Для объективной оценки

эффективности классификации следует проскок крупных частиц сопоставлять с целевым продуктом на входе в аппарат (5). В циклонах, чем меньше граница разделения, тем меньше эффективность, и для повышения эффективности классификации требуется перемешивание мелкого продукта. В [9, 10] приведены результаты исследования эффективностей сепарации частиц в спиральных аппаратах.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ушаков С.Г., Зверев Н.И. Инерционная сепарация пыли.– М.: Энергия. 1974, 168 с.
2. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г. Аэродинамическая сепарация порошков. – М.: Химия, 1989. –160 с.
3. Росляк А.Т., Бирюков Ю.А., Пачин В.Н. Пневматические методы и аппараты порошковой технологии.– Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1990.– 272 с.
4. Барский Л.А., Плаксин И.Н. Критерии оптимизации разделительных процессов. М.: Наука, 1967. –119 с.
5. Барский М.Д., Ревнивцев В.И., Соколкин Ю.В. Гравитационная классификация зернистых материалов. М., «Недра», 1974. –232 с.
6. Барский М.Д. Фракционирование порошков. М.: Недра, 1980. – 237 с.
7. Справочник по пыле- и золоулавливанию //Под ред. М.И . Биргер, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков и др. Под общей ред. А.А. Русанова – 2 изд. М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
8. Справочник по специальным функциям. М.: Наука, 1979.– 832 с.
9. Hukki R.T. and Airaksinen T. A study of the improved pneumatic classification on production of micropowder // Fine Particles Processing. Proceedings of the International Symposium on Fine Particles Processing Las Vegas, Nevada, February 24-28. 1980. V1, p. 181–208.
10. Василевский М.В., Мальцев А.А., Перков В.В., Танков Н.К., Богданов А.Л. Эффективность сепарации частиц в вихревых камерах // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Доклады конференции. – Томск: Изд-во Том. ун-та 1998, с. 276 –277.

Научный руководитель: А.С. Разва, к.т.н., доцент каф. ТПТ ЭНИН ТПУ.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ МОДЕЛЬНОГО ГПВРД ПРИ ОБТЕКАНИИ СВЕХРЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ

В.В. Мацкевич¹, В.В. Фарапонов¹, Е.А. Маслов^{1,2}

Томский государственный университет
ФТФ, ДП¹

Томский политехнический университет
ЭНИН, ТПТ²

Современные исследовательские интересы требуют синергетического развития междисциплинарных отраслей науки. Не остается в стороне и интерес аэродинамического исследования, включающий в себя, например, нахождение эмпирических констант для верного описания физических процессов в таких прикладных областях как теплоэнергетика, авиа и судостроение.