

ПАЦКОВ В.П., ТОПАЛ А.И.,  
КРИЦКИЙ А.В., КОРНИЕНКО А.В.

*Институт угольных энерготехнологий НАН Украины и Минтопэнерго Украины*

## СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИКЛОННЫХ АППАРАТОВ (ОБЗОР)

Зроблено аналіз існуючих методів оцінювання пофракційної ефективності уловлювання твердих частинок у циклонних апаратах з метою обґрунтування можливості їх застосування при оцінюванні ККД циклонів-сепараторів установок з ЦКШ.

Проанализированы существующие методы оценки пофракционной эффективности улавливания твердых частиц в циклонных аппаратах с целью анализа возможности их применения при оценке КПД циклонов-сепараторов установок ЦКС.

The existed methods of evaluation for fractional efficiency effilace of caught of solid particle in cyclone apparatus for purpose of possible this utilization evaluation of coefficients of useful activity of cyclon-separator the plants win CFB.

$a, b$  – ширина и высота входного патрубка (в долях от диаметра циклона);

$C$  – концентрация частиц;

$D$  – диаметр;

$d$  – диаметр частиц;

$H$  – высота;

$h$  – высота выхлопной трубы;

$j$  – запыленность потока;

$K_A = a / D_u$  ;

$K_B = b / D_u$  ;

$K_C$  – коэффициент [10];

$K_D = 1$ ;

$K_E = D_{\text{вых}} / D_u$  ;

$K_H = H_u / D_u$  ;

$K_N = H_{\text{цил}} / D_u$  ;

$K_S = H_{\text{внут}} / D_u$  ;

$m$  – общее количество улавливаемых фракций;

$Q$  – объемный расход газа;

$r$  – степень рециркуляции газового потока на выходе из циклона;

$t$  – температура;

$U$  – скорость потока газа;

$\eta$  – эффективность улавливания частиц;

$\psi$  – исходный фракционный состав топлива;

$\mu$  – динамическая вязкость газа;

$\rho$  – плотность;

$\sigma$  – дисперсия распределения фракционной степени очистки;

$\Phi$  – фракция для оценки полной очистки [3];

$\Phi_{\text{ЖВХ}}^e$  – параметр интенсивности закрутки потока [5];

КПД – коэффициент полезного действия;

ЦКС – циркулирующий кипящий слой.

**Индексы нижние:**

$e$  – текущее значение запыленности;

$G$  – предельное значение запыленности;

$i$  – номер фракции твердых частиц;

$in$  – входное сечение;

$m$  – медианный;

$p$  – критический размер частиц;

out, вых – выходное сечение;

$r$  – рецикл;

recycle – входное количество рециркулирующих частиц;

usl – условная длина пылевидного отверстия;

внут – внутренняя высота выхлопного патрубка;

$г$  – газ;

$п$  – пыль;

фр – фракционное;

ц – циклон;

цил – цилиндрическая часть.

**Индексы верхние:**

50 – эффективность 50 %;

$T$  – теоретический.

## Постановка проблемы

Характерная черта установок с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС) – наличие устройств для улавливания твердых фракций (коксозольного остатка, золы и т. д.) и возврата материалов в топку (реактор-газогенератор). Эффективность работы этих устройств определяет большинство показателей установки: стабильность температуры в слое и надслоевом пространстве, отвод теплоты к настенным экранам, уровень выбросов  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$ , кратность циркуляции и размер частиц [1, 2].

Для оценки эффективности циклонов-сепараторов ЦКС необходима разработка методик вычисления пофракционного КПД улавливания твердых частиц. Известные рекомендации [3], базирующиеся на вероятностном подходе к процессу улавливания пыли, не могут быть использованы для этой цели, поскольку не отображают особенностей наличия во внутреннем пространстве циклонов-сепараторов ЦКС высококонцентрированных дисперсных потоков. Поэтому необходим анализ состояния исследований по методам оценки пофракционного КПД циклонных аппаратов для выяснения возможности их применения при оценке эффективности циклонов-сепараторов ЦКС.

### Существующие методы оценки эффективности циклонных сепараторов

Наиболее распространенный подход для оценки эффективности циклонных аппаратов – вероятностный подход [3, 4]. Базируется на законе логарифмического нормального распределения частиц пыли по размерам и зависимости эффективности пылеулавливания в циклоне от диаметра уловленных частиц. Использует информацию о следующих параметрах:  $d_{\eta}^{50}$  – диаметре частиц, уловленных в циклоне с эффективностью 50 %;  $\sigma_{\eta}$  – дисперсии распределения фракционной степени очистки;  $\sigma_n$  и  $d_m$  (дисперсия распределения частиц пыли по размерам и медианный диаметр для данного распределения). На их основе определяют значение параметра  $d_{\eta}^{50}$  при рабочих условиях, параметр  $x$ , величина  $\Phi(x)$  – полный коэффициент очистки газа  $\eta$  и

эффективность улавливания отдельных фракций частиц  $\eta_i$  (рис. 1а).

Метод [4] использует параметр интенсивности закрутки потока – критерия интегрального подобия внутренних закрученных потоков [5] при вычислении  $d_{\eta}^{50}$  (рис. 1б).

На рис. 2 приведены результаты сопоставления расчетов эффективности циклонов по методам НИИОГАЗ [3] и ИТТФ [4] и экспериментальных данных НИИОГАЗ [6] исследований циклонов на кварцевой пыли ( $d_{\eta}^{50} = 13$  мкм;  $\sigma_n = 3$ ;  $\rho_n = 2670$  кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_2 = 18 \cdot 10^{-6}$  Па\*с<sup>-1</sup>,  $D_u = 0,3$  м) и ВЦНИИОТ [7]. Средняя погрешность в оценке общей эффективности пылеулавливания по методам [3] и [4] соответственно составила 4 % и 0,86 %, т.е. для приведенных циклонов метод ИТТФ более чем в 4 раза точнее, тогда как погрешность в оценках эффективности пылеулавливания по методу НИИОГАЗ [3] может быть порядка 13 % [7].

Одним из простых методов повышения эффективности циклонных систем является частичное рециркулирование выходящих из циклона газов (рис. 3а). Для традиционного набора конструктивных размеров (рис. 3б) определяются входные режимные параметры, конструктивные размеры и пофракционная эффективность циклона (с учетом и без учета рецикла газа) (табл. 1). Влияние рецикла на эти уравнения состоит в увеличении газового потока через циклон в соответствии с коэффициентом  $(1+r)$ . В приведенных уравнениях  $K$  – конструктивная константа, рассчитанная по семи конструктивным размерам, приведенным на рис. 3б [9, 10];  $n$  – эмпирическая вихревая константа [8].

Анализ [1] показал, что одной из наиболее общих моделей для определения фракционного КПД есть трехзонная модель движения [11, 12]. В этой модели рассматриваются три зоны: входа, опускного и подъемного потоков. Турбулентное смешение выражается по профилю радиальных концентраций в каждой зоне с учетом обмена частиц. Таким образом, в анализ включается реальная геометрия циклона, учитывается обмен частиц между зонами 2 и 3, а также распределение времени релаксации. При этом в зонах 1 и 2 частицы движутся вниз, а в зоне 3 вектор скорости газа направлен преимущественно вверх.

a)

$$d_{\eta}^{50} = d_{\eta}^{50(T)} \sqrt{(D_u / D_u^T)(\rho_n^T / \rho_n)(\mu_z / \mu_z^T)(U_z^T / U_z)}$$

$$x = \frac{\lg d_m / d_{\eta}^{50}}{\sqrt{\lg^2 \sigma_{\eta} + \lg^2 \sigma_n}}$$

$$\eta = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^x \exp(-\frac{x^2}{2}) dx = \Phi(x),$$

$$\eta_i = \eta \bar{\psi}_i, i = 1, \dots, m.$$

б)

$$\Phi_{\text{жвх}}^T (H_u / D_{\text{вых}})^{2/3} \leq 15:$$

$$d_{\eta}^{50} = \left[ 13,5 - 0,69 \Phi_{\text{жвх}}^T (H_u / D_{\text{вых}})^{2/3} \right] \sqrt{\frac{D_u 1930}{0,6 \rho_n} \frac{\mu_T}{22 * 10^{-6} U_u} \frac{3,5}{U_u}}$$

$$\Phi_{\text{жвх}}^T (H_u / D_{\text{вых}})^{2/3} > 15:$$

$$d_{\eta}^{50} = \left[ 3,28 - 0,028 \Phi_{\text{жвх}}^T (H_u / D_{\text{вых}})^{2/3} \right] \sqrt{\frac{D_u 1930}{0,6 \rho_n} \frac{\mu_z}{22 * 10^{-6} U_u} \frac{3,5}{U_u}}$$

Рис. 1. Алгоритмы расчета методик оценки эффективности циклонных сепараторов: [3] (а), [4] (б).

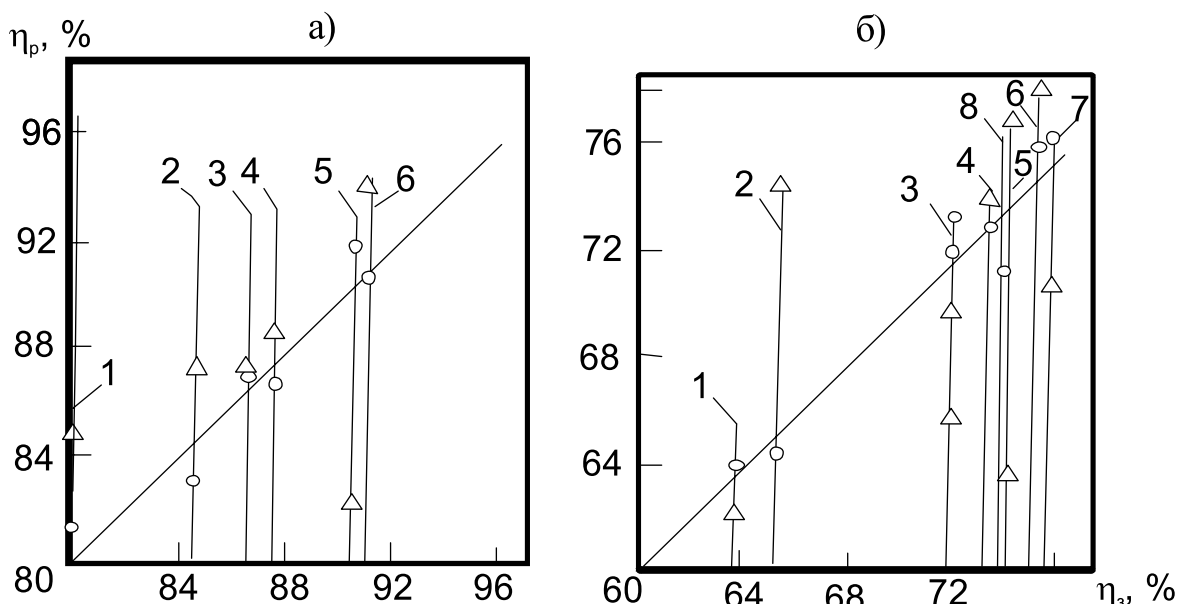


Рис. 2. Точность расчетов эффективности пылеулавливания циклонов по методу НИИОгаз (D) и ИТТФ НАНУ (O).  
 Экспериментальные данные НИИОгаз (а) и ВЦНИИОТ – (б) 1 – ЦН-24; 2 – ЦН-15У; 3 – ЦН-15; 4 – ЦН-11; 5 – СК-ЦН-34; 6 – СК-ЦН-34; 7 – ЦН-15(D<sub>E</sub> = 0,4); 8 – ЦН-15; ЦН-15(D<sub>E</sub> = 0,5) [3–5].

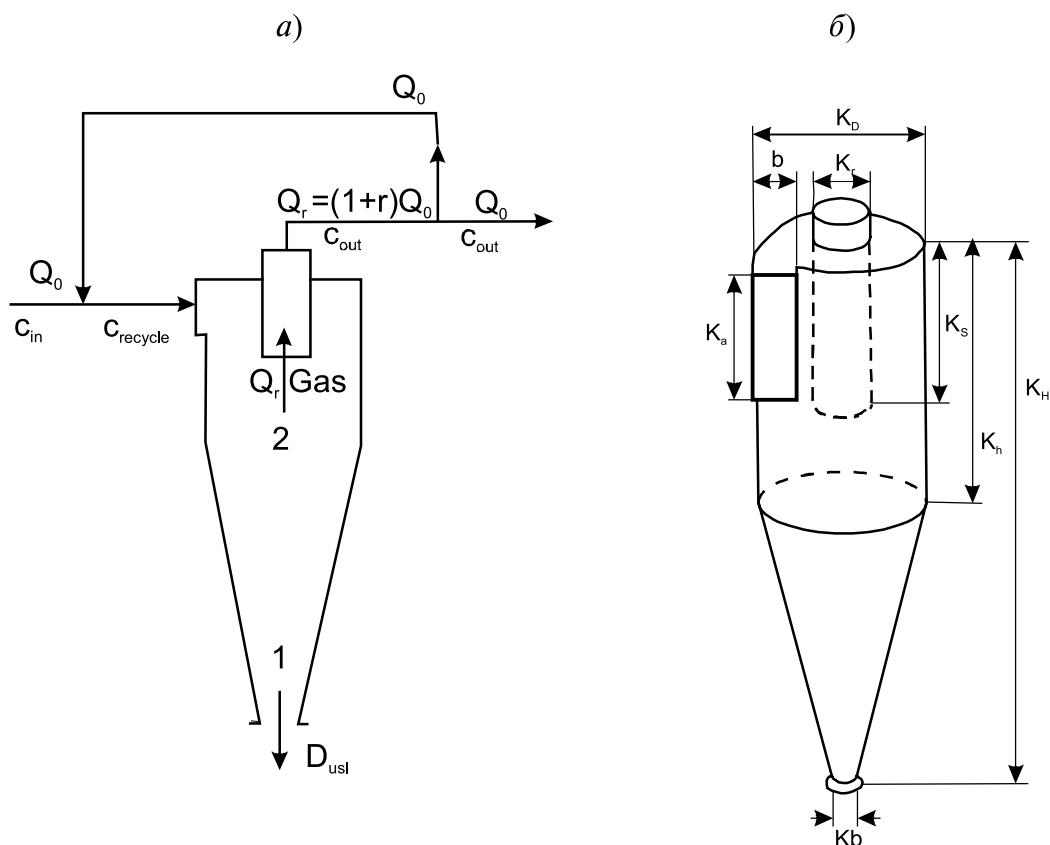


Рис. 3. а) схема циклона с рециклом:  $G$  – объемный расход газа;  $C$  – содержание пыли в газе;  $in$  – вход;  $out$  – выход; 1 – пыль; 2 – газ [10]; б) противоточный циклон с тангенциальным входом [10].

Таблица 1. Расчет режимных параметров циклона при отсутствии и наличии рецикла газовой фазы ( $r$ -степень рециркуляции газа на выходе)

		Параметры	Попфракционная эффективность
Диаметр циклона	С рец.	$D_{u,r} = (1+r)^{0,454} D_u$	С рец.
	Без рец.	$D_u = 0,0262 \left[ \frac{Q \rho_z (1 - K_B)}{\mu_z K_A K_B^{2,2}} \right]^{0,454}$	$\eta_i = 1 - \exp - 2 \left[ \frac{(1+n) Q_z K \rho_p d_i^2}{D_u^3 18 \mu_z} \right]^{1/2(n+1)}$ $n = 1 - (1 - 0,67 D_u^{0,4}) (T/283)^{0,3}$
Расход газа	С рец.	$Q_r = (1+r) Q_0$	
Входная скорость	С рец.	$U_{in,r} = (1+r)^{0,091} U_{in,0}$	$\eta_i = 1 - \exp - 2 \left[ \frac{(1+n) Q_z K \rho_p d_i^2}{D_{u0}^3 (1+r)^{0,363} 18 \mu_z} \right]^{1/2(n+2)}$ $n = 1 - (1 - 0,67 D_{u0}^{0,14}) (1+r)^{0,0636} (T/283)^{0,3}$
	Без рец.	$U_{in,r} = (1+r)^{0,091} U_{in,0}$	
Гидравлическое сопротивление	С рец.	$\Delta P_r = (1+r)^{0,183} \Delta P_0$	
	Без рец.	$\Delta P_0 = 0,0049 \rho_r U_{in,0} (16 K_A K_B / K_C^2)$	

a)

$$\eta_{\text{фр}} = 1 - (K_0 + \sqrt{K_1 + K_2}) \exp(-f/d);$$

$$K_2 = \left(\frac{D_{mp}}{D_u}\right)^{1,4}; \quad K_0 = \frac{1 - K_2}{2} + \frac{K_2}{f(d)}; \quad K_1 = \frac{1 - K_2}{2} - \frac{K_2}{f(d)};$$

$$f(d) = 0,565 \left(\frac{h_{mp} - a/2}{l}\right)^{0,44} \left(\frac{t_e + 273}{293}\right)^{0,3} \left(\frac{d_i}{d_p}\right)^{1,04}.$$

б)

$$j_e < j_G: \quad \eta_i \left(\frac{d_i}{d_p}\right) = 0,5 \left[ 1 + \cos \left\{ \pi \left( 1 - \frac{\log \left( \frac{d_i}{d_p} \right) + \log D}{2 \log D} \right) \right\} \right];$$

$$j_e < j_G: \quad \eta_i \left(\frac{d_i}{d_p}\right) = 1 - \frac{j_G}{j_e};$$

$$D = \frac{\left(\frac{d_i}{d_p}\right)_{(\eta_r=1)}}{\left(\frac{d_i}{d_p}\right)_{(\eta_r=0,5)}};$$

$$\eta = \sum_{e=1}^k \eta_e(d_e) \bar{\psi}_e;$$

$$\eta = \left(1 - \frac{j_G}{j_e}\right) + \frac{j_G}{j_e} \sum_{e=1}^k \eta_e(d_e) \bar{\psi}_e.$$

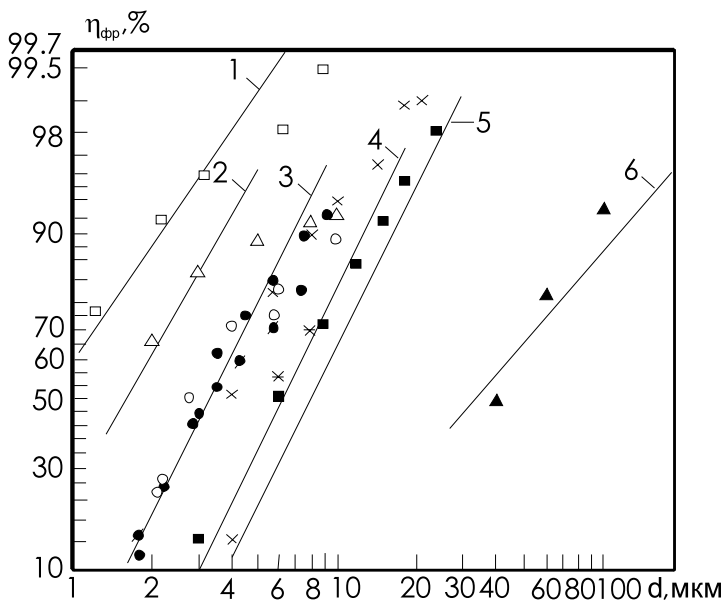
в)

$$\eta = A + B(U_r) + C \left(\frac{H_{\text{шл}}}{D_u}\right) + D \left(\frac{HG_r}{D_u}\right) + E(U_r) \left(\frac{H_{\text{шл}}}{D_u}\right) + F(U_r) \left(\frac{H_{\text{шл}}}{D_u}\right)^2 + G(U_r) \left(\frac{H_{\text{шл}}}{D_u}\right)^2 +$$

$$+ H(U_r)^2 \left(\frac{H_{\text{шл}}}{D_u}\right) + I(U_r)^2 \left(\frac{H_{\text{шл}}}{D_u}\right)^2;$$

$$A = 89,35; \quad B = 1,3; \quad C = 3,18; \quad D = 1,29; \quad E = 2,15; \quad F = 2,37; \quad G = 2,12; \quad H = 1,64; \quad I = 1,86.$$

Рис. 4. Алгоритмы расчета методик оценки эффективности циклонных сепараторов: [1, 11] (а), [15] (б), [10] (в).



**Рис. 5. Сопоставление опытных и расчетных данных пофракционной эффективности улавливания [1]: 1 – Shmidt P. (1987); 2 – Stairmand C., Kesley R. (1955); 3 – General Electric (1980); 4 – Данные ВТИ, циклон ЦН-15У диаметром 0.6 м; 5 – J. H. Wheldon et al (1987); 6 – котел ЦКС (г. Дуйсбург).**

На основе модели [11, 12] авторами работы [1] получена следующая зависимость для расчета пофракционного КПД (рис. 4а).

Сравнение опытных и рассчитанных данных [1] представлено на рис. 5. В целом есть удовлетворительное согласование, за исключением результатов испытаний на котле в г. Дуйсбург (Германия). Расчетные результаты здесь немного ниже данных, полученных на промышленном котле, что, очевидно, по мнению авторов [1], связано с влиянием высоких концентраций частиц в циклоне, информации для учета которых пока недостаточно. Они считают, что при работе на реальных котлах снижать эффективность улавливания могут такие эффекты, как дефекты изготовления крупногабаритных циклонов, дефекты обмуровки, возникающие при эксплуатации и т.д. Поэтому предполагается, что при расчетах КПД реальных циклонов можно не принимать во внимание положительное влияние высокой концентрации потока, которое может нивелироваться указанными факторами. Расчет общего КПД улавливания авторами [1] рекомен-

дуется проводить по зависимостям с учетом приведенных формул (рис. 4а) для пофракционной эффективности.

Методика [13] упрощенно учитывает влияние особенностей движения потоков внутри аппарата, трения со стенками и полифракционности твердых частиц на сепарационные свойства циклона. В зависимости от соотношений между предельной и текущей величиной запыленности потока рассчитывается пофракционная эффективность и общая эффективность циклона (рис. 4б.)

В [10] предложена статистическая корреляция для оценки пофракционной эффективности, удовлетворительно согласующуюся с экспериментальными данными для циклонов различной геометрии (рис. 4в). Здесь же отмечено, что уравнение для пофракционной эффективности [9], широко известное в литературе, не может быть рекомендовано для низких величин конструктивного фактора  $K$  и случаев оценки эффективности циклонов при больших изменениях в их конструкции из-за расхождения расчета по [9] и экспериментальных данных при уменьшении  $K$  и входной скорости газового потока.

## Выводы

Анализ возможности применения рассмотренных методик для оценки эффективности циклонного аппарата ЦКС-установки Старобешевской ТЭС показал, что наиболее близкие к реально отражаемым на практике величинам значения пофракционной эффективности дают методики [8], [10], [13]. Методика [1] требует дополнительной проверки и уточнения. Методики [3, 4] дают заниженные значения пофракционной эффективности. Кроме того, рассмотренные инженерные методики недостаточно учитывают такие физические особенности процессов в циклонах ЦКС-агрегатов как сложные течения турбулентных газодисперсных запыленных потоков [14], высокие концентрации твердой фазы [1, 12], существенный обмен импульсом, массой и энергией между фазами [14]. Указанные обстоятельства усложняют разработку научно-обоснованных методов расчета пофракционной эффективности. Единственным путем решения

проблемы представляется применение методов математического моделирования, основанных на численном эксперименте.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Рябов Г.А., Фаломеев О.М., Шапошник Д.А.* Исследование систем улавливания и возврата золы на установках с циркулирующим слоем // Теплоэнергетика. – 2002. – № 8. – С. 18 – 24.
2. *Кратность* циркуляции в топках с циркулирующим кипящим слоем / Мунц В. А., Баскаков А. П., Федоренко Ю. Н., Козлова Ю. Г. // Теплоэнергетика. – 1990. – № 4. – С. 30 – 34.
3. *Справочник по пыле- и золоулавливанию* / Биргер М. И., Вальдберг А. Ю., Мягков Б.И. и др.; Под общ. ред. А. А. Русанова. – 2-е изд., пер. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
4. *Приёмов С.И.* Метод расчета циклонных пылеуловителей // Промышленная теплотехника. – 1996. Т. 18, № 4. – С. 49 – 52.
5. *Халатов А.А.* Теория и практика закрученных потоков. – Киев: Наукова думка, 1989. – 192 с.
6. *Ужов В.Н., Вальдберг А. Ю., Мягков Б. И. и др.* Очистка промышленных газов от пыли. – М.: Химия, 1981. – 125 с.
7. *Коузов Л.А.* Сравнительная оценка цикло-

нов различных типов / Обеспыливание в металлургии. – М.: Металлургия, 1991. – С. 185 – 196.

8. *Trasi P.R., Licht W.* Effect of recycle on cyclone performance // Ind. Eng. Chem. Proc. Des. and Dev. – 1984. – Vol. 23, № 3. – P.P. 479 – 482.
9. *Leith D., Licht W.* The Collection efficiency of cyclone type particles collectors – a new theoretical approach // AIChE Journal. – 1972. – Vol. 68, № 126. – P.P. 196 – 206.
10. *Santana J.D. A.M., Armosti S., Coury J.R.* Performance of Cylindrical – conical cyclone with different geometrical configurations // Braz. Journ of Chem. Eng. – 2001. – Vol. 18, No. 3. – P.P. 1 – 14.
11. *Dietz P.W.* Collection Efficiency of Cyclone Separators // AIChE Journal. – Vol. 27, № 6. – P.P. 888 – 892.
12. *Abrahamson I., Allen R.W. K.* The Efficiency of Convective Return – flow Cyclone at high Temperatures // Int. Chem. Eng. Sump. Series. – Pergamon Press, 1987. – № 99. – P.P. 31 – 43.
13. *Muschelknautz E., Trefz M.* Druckverlust and Abscheidengrad in Cyclon // VDI. – Warmenatlas. – В. 6. – 1991. – Lj. 1 – Lj. 8.
14. *Устименко Б.П., Джакупов П.Б., Кроль В.О.* Численное моделирование аэродинамики и горения в топочных и технологических устройствах. – Алма-Ата : Наука, 1986. – 244 с.