

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА СТЕПЕНИ ОЧИСТКИ В ЭЛЕКТРОЦИКЛОНЕ

В.А. Петров, Н.В. Инюшкин

*Кафедра «Процессы и аппараты химической технологии»,
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург;
biograna@yandex.ru*

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: активная зона; скорость осаждения; степень очистки; электроциклон.

Аннотация: Приводится вывод критериального уравнения, позволяющего произвести расчет степени очистки в электроциклоне.

Обозначения	
$d_{\text{ч}}$ – диаметр частицы, м;	U – рабочее напряжение, В;
h – расстояние между коронирующим и осадительным электродами, м;	$\mu_{\text{г}}$ – коэффициент динамической вязкости газа, Па·с;
L – длина активной зоны, м;	$\rho_{\text{г}}$ – плотность газа, кг/м ³ ;
I – сила тока, А;	$\rho_{\text{ч}}$ – плотность частиц, кг/м ³ .
$W_{\text{вх}}$ – входная скорость газа в аппарат, м/с;	

В предлагаемой промышленной конструкции электроциклона [1] поток газа движется по нескольким кольцевым каналам, имеющим разные радиусы кривизны. В связи с этим условия осаждения частиц в каждом канале индивидуальны. Поэтому целесообразно получить обобщенное уравнение для расчета общей степени очистки для всего аппарата. Поскольку при нормальных условиях работы электроциклона эффективность газоочистки определяется многими факторами [2], то теоретический учет всех этих факторов практически невозможен, можно лишь в самом общем виде представить зависимость между различными переменными, влияющими на протекание процесса улавливания пыли, что, конечно, не подходит для инженерных расчетов. Поэтому предлагается использование теории подобия, а именно – метода анализа размерностей, с целью отыскания общего вида функциональной зависимости степени очистки газа в электроциклоне от параметров, оказывающих влияние на нее. Данный подход основан на положении, что любое уравнение, отражающее связь между физическими величинами, должно иметь одинаковую размерность левой и правой частей [3].

Можно представить, что степень очистки является функцией от параметров, влияющих на процесс осаждения частиц в электроциклоне,

$$\eta = f(d_{\text{ч}}, \rho_{\text{ч}}, \rho_{\text{г}}, \mu_{\text{г}}, U, I, W_{\text{вх}}, h, L). \quad (1)$$

В основу метода положена π -теорема Бэкингема [4], согласно которой общую функциональную зависимость, связывающую между собой n переменных величин при m основных единицах их измерения, можно представить в виде зависимости между $(n - m)$ безразмерными комплексами этих величин, а при наличии подобия – в виде связи между $(n - m)$ критериями подобия.

Для нашего случая функция общего вида (1) может быть представлена в виде степенной зависимости

$$\eta = Ad^a \rho_{\text{ч}}^b \rho_{\text{г}}^c \mu_{\text{г}}^d U^e I^f W_{\text{вх}}^k h^l L^m, \quad (2)$$

где $A, a, b, c, d, e, f, k, l, m$ – неизвестные числовые величины.

Учитывая, что размерности обеих частей уравнения (2) одинаковы, а коэффициент пропорциональности A – безразмерный, заменим в уравнении (2) все величины их размерностями

$$[\eta] = [M]^a \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]^b \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]^c [\text{Па} \cdot \text{с}]^d [B]^e [A]^f \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right]^k [M]^l [M]^m. \quad (3)$$

$$\text{Так как } [\mu] = [\text{Па} \cdot \text{с}] = \left[\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}} \right]$$

$$[U] = [B] = [\text{Ом} \cdot A] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \right] = \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{с}} \right] = \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^3 \cdot \text{А}} \right],$$

то уравнение (3) можно записать в виде

$$[\eta] = [M]^a \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]^b \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]^c \left[\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}} \right]^d \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^3 \cdot \text{А}} \right]^e [A]^f \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right]^k [M]^l [M]^m. \quad (4)$$

Приравняв показатели степеней при одинаковых основных единицах в обеих частях уравнения, получим систему из 4 уравнений:

$$\begin{aligned} \text{по кг: } 0 &= b + c + d + e; \\ \text{м: } 0 &= a - 3b - 3c - d + 2e + k + l + m; \\ \text{с: } 0 &= -d - 3e - k; \\ \text{А: } 0 &= -e + f. \end{aligned}$$

В данной системе из 4-х уравнений – 9 неизвестных, поэтому любые 4 из этих переменных можно выразить через 5 остальных.

Выразим, например, f, d, c, a через e, k, b, l, m :

$$\begin{aligned} f &= e; \\ d &= -3e - k; \\ c &= 2e + k - b; \\ a &= e + k - l - m. \end{aligned}$$

Подставим значения показателей степеней f, d, c, a в искомую степенную функцию (2) и, сгруппировав множители с одинаковыми буквенными показателями, находим обобщенную зависимость для определения степени очистки в электроциклоне

$$\eta = A \left(\frac{d_{\text{ч}} \rho_{\text{г}}^2 U I}{\mu_{\text{г}}^3} \right)^e \left(\frac{d_{\text{ч}} \rho_{\text{г}} W_{\text{вх}}}{\mu_{\text{г}}} \right)^k \left(\frac{h}{d_{\text{ч}}} \right)^l \left(\frac{L}{d_{\text{ч}}} \right)^m \left(\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{г}}} \right)^b. \quad (5)$$

В результате получается обобщенное критериальное выражение для расчета степени очистки газа от пыли, представляющее собой произведение комплексов, каждый из которых характеризует вклад входящего в него параметра в процесс газоочистки.

Рассмотрим каждый критерий подробно:

1) $\frac{d_{\text{ч}} \rho_{\Gamma}^2 UI}{\mu_{\Gamma}^3}$ – безразмерный комплекс, представляющий собой электрический

критерий подобия, характеризующий отношение электрических и инерционных сил к силе внутреннего трения;

2) $\frac{d_{\text{ч}} \rho_{\Gamma} W_{\text{вх}}}{\mu_{\Gamma}}$ – безразмерный комплекс, представляющий собой критерий

Рейнольдса для частиц и характеризующий отношение центробежной силы к силе внутреннего трения;

3) $\frac{h}{d_{\text{ч}}}, \frac{L}{d_{\text{ч}}}$ – симплексы геометрического подобия;

4) $\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\Gamma}}$ – симплекс аэродинамического подобия, характеризующий отноше-

ние плотности частиц пыли и газа.

Числовые значения неизвестных величин – $A, b, c, d, e, f, k, l, m$ могут быть определены только путем экспериментального исследования на опытной установке (модели) и соответствующей обработки результатов экспериментов. С этой целью степенную зависимость (5) логарифмируем и получаем выражение

$$\lg \eta = p \lg(K) + [\text{const}], \quad (6)$$

где p – показатель степени при комплексе; K – безразмерный комплекс; $[\text{const}]$ – сумма логарифмов множителя A и остальных комплексов, величины которых приняты постоянными.

В полученном выражении (6) полагаем переменным один параметр из выбранного комплекса, остальные величины принимаем постоянными.

Уравнение (6) соответствует прямой линии, тангенс угла наклона которой численно равен показателю степени p , а отрезок, отсекаемый на оси ординат, – значению $[\text{const}]$.

Выведем выражение степени очистки с использованием данного метода.

Опытные данные, полученные из экспериментов на модели электроциклона с использованием золы экибастузского угля и $d_{50} = 5$ мкм, представлены в табл. 1.

Прологарифмировав уравнение (5) получим

$$\lg \eta = \lg A + e \lg \left(\frac{d_{\text{ч}} \rho_{\Gamma}^2 UI}{\mu_{\Gamma}^3} \right) + k \lg \left(\frac{d_{\text{ч}} \rho_{\Gamma} W_{\text{вх}}}{\mu_{\Gamma}} \right) + l \lg \left(\frac{h}{d_{\text{ч}}} \right) + m \lg \left(\frac{L}{d_{\text{ч}}} \right) + b \lg \left(\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\Gamma}} \right). \quad (7)$$

Используя уравнение (7), рассмотрим несколько вариаций, в которых параметр, входящий в критериальный безразмерный комплекс, для которого определяется показатель степени, принимает переменное значение, а другие параметры в этом случае в критериальных комплексах принимают постоянные значения.

Таблица 1

Зависимость степени очистки от входной скорости пылегазового потока, %

Напряжение U , кВ	$W_{\text{вх}}$, м/с			
	10,72	12,81	15,16	17,18
19	98,50	98,69	99,20	99,60
20	99,50	99,87	99,89	99,90

Для определения показателя степени e рассмотрим вариацию, при которой переменным параметром является скорость газа во входном патрубке $W_{\text{вх}}$, а постоянным параметром – напряжение U , то есть когда $\eta = f(W_{\text{вх}})$, и приведем уравнение (7) к виду

$$\lg \eta = k \lg \left(\frac{d_{\text{ч}} \rho_{\Gamma} W_{\text{вх}}}{\mu_{\Gamma}} \right) + \left[\lg A + e \lg \left(\frac{d_{\text{ч}} \rho_{\Gamma}^2 U I}{\mu_{\Gamma}^3} \right) + l \lg \left(\frac{h}{d_{\text{ч}}} \right) + m \lg \left(\frac{L}{d_{\text{ч}}} \right) + b \lg \left(\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\Gamma}} \right) \right]. \quad (8)$$

Уравнение (8) в более удобной форме для нахождения коэффициента k можно записать как

$$\lg \eta = k \lg \left(\frac{d_{\text{ч}} \rho_{\Gamma} W_{\text{вх}}}{\mu_{\Gamma}} \right) + \lg[\text{coml}]. \quad (8.1)$$

Так как тангенс угла наклона прямой функции $\lg \eta = f(\lg K1)$, где $K1 = \frac{d_{\text{ч}} \rho_{\Gamma} W_{\text{вх}}}{\mu_{\Gamma}}$ численно равен показателю степени k , то построим данную зависимость при входных скоростях газа на основе данных табл. 2.

Для графиков (рис. 1) определяем тангенсы угла наклона и находим их среднеарифметическое, которое численно равно показателю степени k . В результате получаем $k = 0,016$.

Во второй вариации переменным параметром является напряжение U , постоянным параметром скорость газа во входном патрубке $W_{\text{вх}}$, то есть когда $\eta = f(U)$. Приведем уравнение (7) к виду

$$\lg \eta = e \lg \left(\frac{d_{\text{ч}} \rho_{\Gamma}^2 U I}{\mu_{\Gamma}^3} \right) + \left[\lg A + k \lg \left(\frac{d_{\text{ч}} \rho_{\Gamma} W_{\text{вх}}}{\mu_{\Gamma}} \right) + l \lg \left(\frac{h}{d_{\text{ч}}} \right) + m \lg \left(\frac{L}{d_{\text{ч}}} \right) + b \lg \left(\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\Gamma}} \right) \right]. \quad (9)$$

Таблица 2

Зависимость логарифма степени очистки от входной скорости

Напряжение U , кВ	$W_{\text{вх}}$, м/с	10,72	12,81	15,16	17,18
19	$\lg \eta$	-0,00656	-0,00573	-0,00349	-0,00174
	$\lg(K1)$	0,331	0,408	0,481	0,536
20	$\lg \eta$	-0,00218	-0,00056	-0,00048	-0,00043
	$\lg(K1)$	0,331	0,408	0,481	0,536

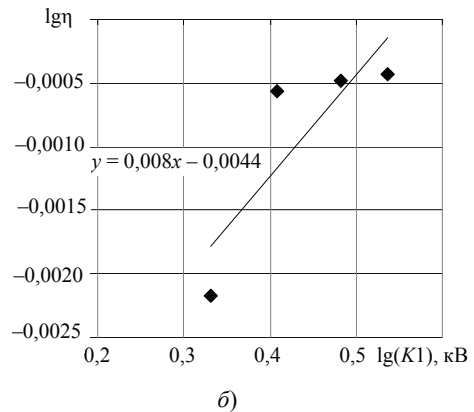
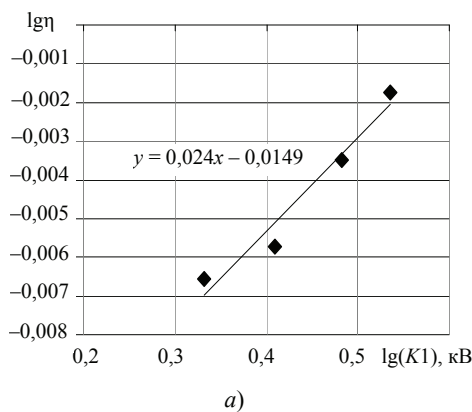


Рис. 1. Зависимость $\lg \eta = f(\lg K1)$ при U , кВ: а – 19; б – 20

Уравнение (9) в более удобной форме для нахождения коэффициента e можно записать в виде

$$\lg \eta = e \lg \left(\frac{d_{\text{ч}} \rho_{\Gamma}^2 UI}{\mu_{\Gamma}^3} \right) + \lg[\text{com}2]. \quad (9.1)$$

Так как тангенс угла наклона прямой функции $\lg \eta = f(\lg K2)$, где $K2 = \frac{d_{\text{ч}} \rho_{\Gamma}^2 UI}{\mu_{\Gamma}^3}$, численно равен показателю степени e , то построим данную зависимость при $U = 19$ кВ и $U = 20$ кВ на основе данных табл. 3.

Для графика (рис. 2) определим тангенс угла наклона прямой, который численно равен показателю степени e . В результате получим $e = 0,042$.

Таким образом, получим для лабораторной модели электроциклона обобщенное критериальное уравнение для определения степени очистки

$$\eta = 0,187 \left(\frac{d_{\text{ч}} \rho_{\Gamma}^2 UI}{\mu_{\Gamma}^3} \right)^{0,042} \left(\frac{d_{\text{ч}} \rho_{\Gamma} W_{\text{вх}}}{\mu_{\Gamma}} \right)^{0,016} \left(\frac{h}{d_{\text{ч}}} \right)^{0,003} \left(\frac{L}{d_{\text{ч}}} \right)^{0,048} \left(\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\Gamma}} \right)^{0,010}. \quad (10)$$

Анализ уравнения (10) показывает, что параметры $d_{\text{ч}}$, U , I , $W_{\text{вх}}$, L , оказывающие основное влияние на процесс газоочистки, имеют положительные показатели степени, следовательно, с численным ростом данных параметров до определенного предела [5] степень очистки будет увеличиваться.

С целью проверки адекватности разработанной математической модели, позволяющей определять степень очистки для электроциклона и использовать ее при создании опытно-промышленного образца, сопоставим экспериментальную степень очистки и расчетную в табл. 4 (рис. 3).

Так же были определены фракционные степени очистки табл. 5.

Таблица 3

Зависимость логарифма степени очистки от напряжения

U , кВ	$\lg \eta$	$\lg(K2)$
19	-0,0057	-0,00056
20	9,391	9,513

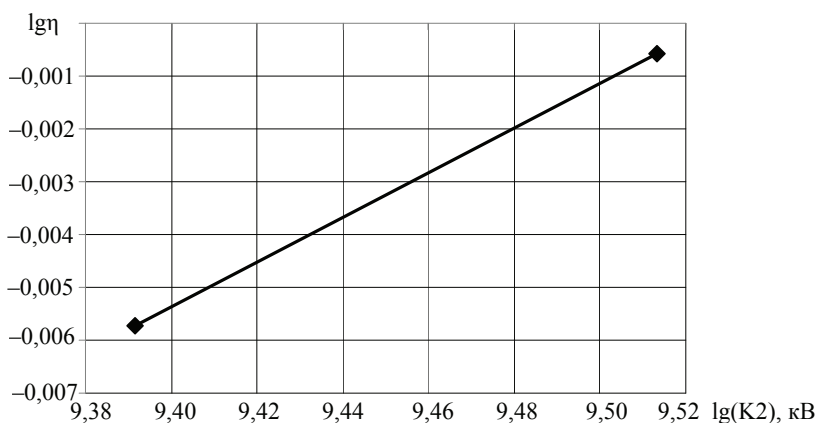


Рис. 2. Зависимость $\lg \eta = f(\lg K2)$

Таблица 4

Сравнение опытных и расчетных значений степени очистки при напряжении 19 кВ с целью определения адекватности полученной математической модели, %

Показатель	$W_{вх}, \text{ м/с}$			
	10,72	12,81	15,16	17,18
$\eta_{\text{расч}}$	98,50	98,69	99,20	99,60
$\eta_{\text{опыт}}$	98,31	98,59	98,86	99,05

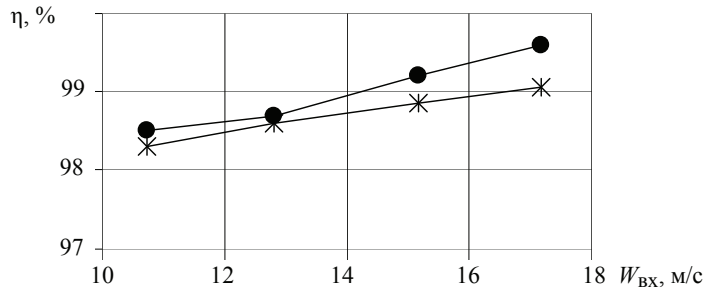


Рис. 3. Зависимость степени очистки от входной скорости газа в электроциклоне при $U = 19 \text{ кВ}$:

—●— экспериментальная; —*— расчетная

Таблица 5

Сопоставление экспериментальных и теоретических фракционных степеней очистки при $W_{вх} = 15,6 \text{ м/с}$ и напряжении 19 кВ

Параметр	Значение испытываемой фракции, N			
	1	2	3	4
$d_{50}, \text{ мкм}$	1,4	6,7	12,8	25,8
$\eta_{\text{опыт}}, \%$	98,50	99,19	99,72	99,90
$\eta_{\text{расч}}, \%$	97,87	98,95	99,39	99,88

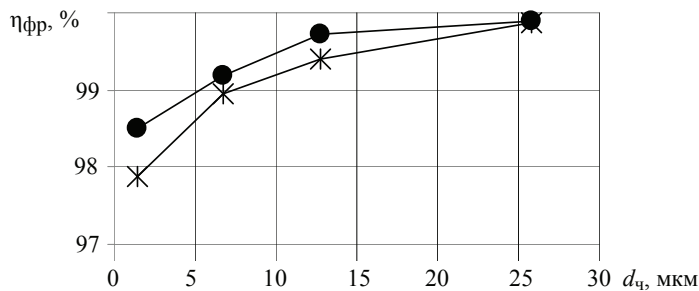


Рис. 4. Зависимость фракционной степени очистки

от диаметра частиц в электроциклоне при $U = 19 \text{ кВ}$ и $W_{вх} = 15,6 \text{ м/с}$:

—●— экспериментальная; —*— расчетная

Результаты сравнения рассчитанных значений фракционной $\eta_{\text{фр}}$ и общей η по уравнению (10) с экспериментальными данными указывают на адекватность разработанной математической модели для частиц разных размеров (рис. 4). Следует заметить, что значения коэффициента пропорциональности и показателей степени при безразмерных комплексах в уравнении (10) требуют уточнения после испытания опытно-промышленного образца.

Список литературы

1. Петров, В.А. Влияние размера частиц и скорости газа на осаждение золы на наружную и внутреннюю поверхности криволинейного канала электроциклона / В.А. Петров, Н.В. Инюшкин, А.А. Ермаков // Хим. технология. – 2010. – № 1. – С. 15–17.
2. Коузов, П.А. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности / П.А. Коузов, А.Д. Мальгин, Г.М. Скрыбин. – Л. : Химия, 1982. – 256 с.
3. Кирпичев, М.В. Теория подобия / М.В. Кирпичев. – М. : Изд-во АН СССР, 1953. – 94 с.
4. Buckingham, E. On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations / E. Buckingham // Phys. – 1914. – Vol. 4. – P. 345–376.
5. Дымовые электрофильтры / В.И. Левитов [и др.] ; под ред. В.И. Левитова – М. : Энергия, 1980. – 448 с.

Calculation of Cleaning Efficiency in Electrocyclone

V.A. Petrov, N.V. Inyshkin

*Department "Processes and Devices of Chemical Engineering",
Ural Federal University named after First President of Russia B.N. Eltsin,
Ekaterinburg; biograna@yandex.ru*

Key words and phrases: active zone; settling velocity; purification efficiency; electrocyclone.

Abstract: The paper presents the deduction of criteria equation enabling to calculate the purification efficiency in electrocyclone.

Zur Frage der Berechnung des Reinigungsgrades im Elektroziklon

Zusammenfassung: Im Artikel wird die Schlußfolgerung der kriterialen Gleichung, die die Berechnung des Reinigungsgrades im Elektroziklon zu machen erlaubt, angeführt.

Sur le problème du calcul du degré de l'épuration dans un électrocyclone

Résumé: Dans l'article est citée la conclusion de l'équation critérielle permettant de calculer le degré de l'épuration dans un électrocyclone.

Авторы: *Петров Валентин Анатольевич* – аспирант кафедры «Процессы и аппараты химической технологии»; *Инюшкин Николай Васильевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химической технологии», ГОУ ВПО «УГТУ – УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Рецензент: *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Химическая инженерия», ГОУ ВПО «ТГТУ».