УДК 532.529:66.074.3 https://doi.org/10.26160/2542-0127-2026-18-133-136

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОСЕПАРАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИХРЕВЫХ КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ РАЗДЕЛЕНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ

***Лаптев А.Г., Клочкова В.А., Фарахов К.Т.***
*Казанский государственный энергетический университет, Казань*

**Ключевые слова:** вихревые контактные устройства, энергосепарационная эффективность, сепарация аэрозолей, турбулентно-центробежное осаждение частиц, мокрая очистка газов, фракционная эффективность сепарации, закрученные газожидкостные потоки, очистка дымовых и технологических газов.

**Аннотация.** В работе рассмотрено определение энергосепарационной эффективности вихревых контактных устройств для разделения аэрозолей. Представлена математическая модель турбулентно-центробежного осаждения частиц размером менее 20 мкм, основанная на уравнениях массопереноса с объемным источником. Приведено сравнение расчетной фракционной эффективности с результатами численного моделирования закрученных потоков, расхождение не превышает 3-4%. Показано, что при «мокрой» очистке эффективность 97,5% достигается для частиц диаметром 1 мкм при рациональной скорости газа 16-17 м/с и перепаде давления 3,0-3,1 кПа. Модель может применяться при проектировании и модернизации аппаратов очистки технологических и дымовых газов.

# DETERMINATION OF THE ENERGY-SEPARATION EFFICIENCY OF VORTEX CONTACT DEVICES FOR AEROSOL SEPARATION

***Laptev A.G., Klochkova V.A., Farakhov K.T.***
*Kazan State Energy University, Kazan*

**Keywords:** vortex contact devices, energy-separation efficiency, aerosol separation, turbulent-centrifugal particle deposition, wet gas cleaning, fractional separation efficiency, swirling gas-liquid flows, purification of flue and process gases.

**Abstract.** The paper examines the determination of the energy-separation efficiency of vortex contact devices for aerosol separation. A mathematical model of turbulent-centrifugal deposition of particles smaller than 20 μm is presented; it is based on mass transfer equations with a volumetric source. A comparison of the calculated fractional efficiency with the results of numerical modeling of swirling flows is provided; the discrepancy does not exceed 1-4%. It has been shown that with “wet” cleaning, an efficiency of 97.5% is achieved for particles with a diameter of 1 μm at a rational gas velocity of 16-17 m/s and a pressure drop of 3.0-3.1 kPa. The model can be used in the design and modernization of devices for cleaning process and flue gases.

Экспериментальные исследования и математическое моделирование процессов разделения аэрозольных систем в различных отраслях промышленности имеет как прикладное, так и фундаментальное значение для решения задач очистки газовых выбросов, а также природного и технологических газов. Вихревые аппараты обеспечивают значительную эффективность при высокой производительности, однако имеют повышенное гидравлическое сопротивление по сравнению с рядом других аппаратов сепарации аэрозолей. Кроме этого, вихревые аппараты имеют небольшие массогабаритные характеристики [1-3].

При математическом моделировании сепарационных процессов в вихревых аппаратах могут решаться несколько задач:

1. Определение эффективности сепарации в вихревых аппаратах заданной конструкции при различной производительности и размеров аэрозольных частиц.

2. При заданной сепарационной эффективности, производительности и размеров частиц выбор конструктивных и режимных характеристик, обеспечивающих минимальное значение гидравлического сопротивления и, следовательно, энергозатрат на подачу газа.

3. Диагностика работы действующих вихревых промышленных аппаратов с целью разработки вариантов модернизации при изменении условий работы.

Методы математического моделирования развиваются в основном по двум направлениям. Это численные исследования на основе решения систем дифференциальных уравнений в частных производных и применение упрощенных моделей, которые отражают основные физические механизмы переноса дисперсной фазы. В рамках второго направления применяется подход представления явлений переноса аэрозольных частиц с размерами менее 20 мкм в виде разновидности диффузионного процесса, что дает возможность применять основные уравнения из теории массопередачи [4-6]. Этот подход используется далее в данной работе.

Поток массы M (кг/с) осаждающихся частиц записывается в виде

$$M = G\left(C_{\text{н}} - C_{\text{к}}\right), \qquad (1)$$

где $G$ – массовый расход газа на очистку, кг/с; $C_{\text{н}}$, $C_{\text{к}}$ – начальная и конечная концентрация частиц, кг/кг.

Поток массы (1) также можно представить с применением кинетических уравнений переноса и осаждения частиц в закрученной газовой среде

$$M = \rho_{\text{г}} u_{\text{t}} F \overline{\Delta C} + \rho_{\text{г}} u_{ц} F \overline{\Delta C}, \qquad (2)$$

где в данном выражении учитываются основные механизмы переноса и осаждения частиц в турбулентном закрученном потоке газа – скорость турбулентной миграции – $u_{\text{t}}$, м/с, и скорость центробежного осаждения – $u_{ц}$, м/с; $F$ – поверхность осаждения, м²; $\overline{\Delta C}$ – средняя движущая сила переноса частиц, записывается как среднелогарифмическая; $\rho_{\text{г}}$ – плотность газа, кг/м³.

Для вычисления профиля концентрации частиц в вертикальном направлении вихревого контактного устройства используется одномерное дифференциальное уравнение массопереноса частиц с объемным источником

$$w_{\text{г}} \frac{dC}{dz} = D_{\text{тч}} \frac{d^2C}{dz^2} + a_{\text{v}}(C - C_{\text{гр}})(u_t + u_{ц}), \qquad (3)$$

где $w_{\text{г}}$ – средняя скорость газа в поперечном сечении контактного устройства, м/с; $z$ – вертикальная координата, м; $D_{\text{тч}}$ – коэффициент турбулентной диффузии частиц, м²/с; в правой части – объемный источник массы, с$^{-1}$; $a_{\text{v}}$ – удельная поверхность осаждения, м²/м³.

Значения $u_t$, $u_{ц}$ и $D_{\text{тч}}$ вычисляются по выражениям, приведенным в работах [4-6].

На рисунке 1 дано сравнение сепарационной эффективности $\eta = (C_{\text{н}} - C_{\text{к}}) / C_{\text{к}}$, полученное из решения уравнения (3) с результатами численного моделирования для закрученных потоков [5].

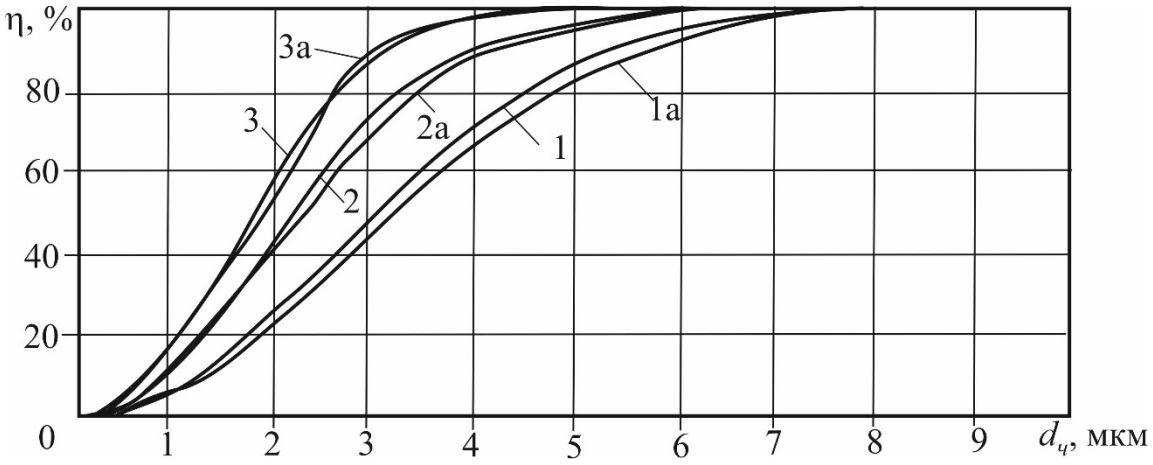



Рис. 1. Расчетная фракционная эффективность центробежного сепаратора: $\rho_ч$ = 2650 кг/м$^3$, $d$ = 30 мм, $H$ = 300 мм, θ = 45°; 1 – $w_г$ – 10 м/с; 2 – 20 м/с; 3 – 30 м/с; 1-3 – результаты расчетов по математической модели в работе [1]; 1а-3а – расчет по выражению (3)

Расхождение результатов расчета η по выражению (3) с численным моделированием [5] не более 3-4%, что подтверждает адекватность математических моделей.

Для повышения эффективности очистки газом от микронных частиц в каналы с закруткой может подаваться вода (так называемая мокрая очистка). На рисунке 2 представлены результаты расчета требуемой длины вихревого контактного устройства при заданной эффективности сепарации η = 0,975 (97,5%), а также перепада давления газа в зависимости от скорости газа при плотности орошения $q_ж$ = 2,4 м$^3$/(мч).

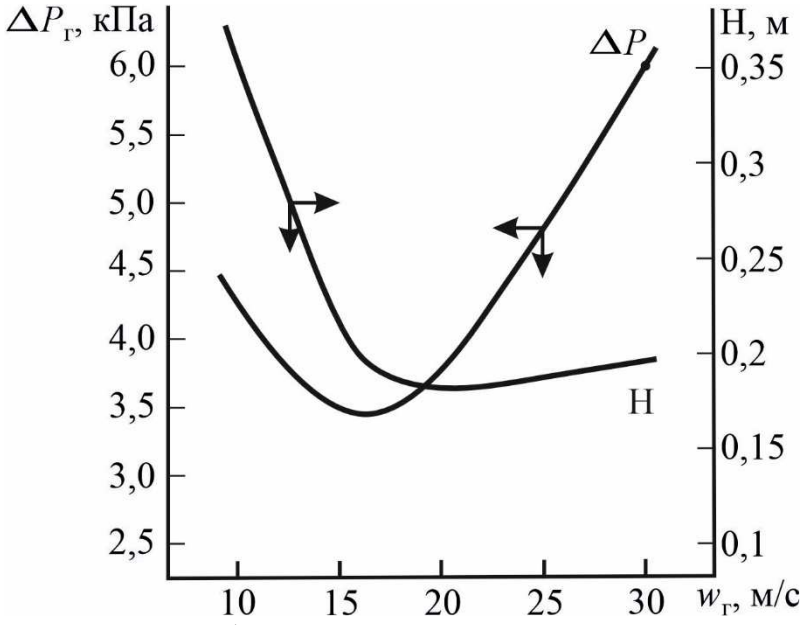



Рис. 2. Зависимости длины трубки и перепада давления от скорости газа при заданной эффективности сепарации $\eta = 0{,}975$ аэрозольных частиц ($d_ч = 1$ мкм) при восходящем закрученном движении ($\theta = 40^o$) газожидкостного потока с удельным расходом воды $q_ж = 2{,}4$ м$^3$/(м ч): $\rho_ч = 1500$ кг/м$^3$

Установлено, что требуемая длина контактного устройства $H$ при скорости газа 10-16 м/с снижается, что также дает снижение перепада давления. При

скорости газа от 16 до 30 м/с начинается значительный рост перепада давления, так как $\Delta P \sim w_{\text{г}}^2$, а требуемая длина контактного устройства изменяется незначительного и находится в интервале $H = 0{,}17\text{-}0{,}19$ м. Рациональной скоростью газа в закрученном потоке является $w_{\text{г}} = 16 - 17$ м/с; при которой перепад давления составляет минимальное значение $\Delta P_{г} \approx 3{,}0 - 3{,}1$ кПа. Очевидно, что это обеспечит минимальную мощность на подачу газа в газосепаратор аэрозолей с завихрителями при заданной эффективности. Представляется целесообразным организовать в контактном устройстве нисходящий поток, так как такое конструктивное решение обеспечивает упрощение вывода жидкой фазы и практически исключает ее унос с газовым потоком частиц в верхнюю часть аппарата.

Следует отметить довольно высокую эффективность «мокрой» сепарации аэрозольных частиц с диаметром 1 мкм по сравнению с другими типами газосепараторов. Так, например в контактных устройствах с закруткой газа и без орошения жидкостью сепарационная эффективность $\eta = 0{,}975$ достигается лишь для частиц диаметром более 4-5 мкм при длине контактного устройства $H = 0{,}2 \div 0{,}3$ м и закрутке с углом $\theta = 35^{\text{o}}$.

**Заключение.** Преимущество контактных устройств с закруткой фаз заключается в небольших габаритах аппаратов газоочистки, высокой производительностью и эффективностью. Представленная математическая модель турбулентно-центробежного разделения аэрозольных систем может применятся при проектировании или модернизации аппаратов очистки технологических, дымовых газов, а также в местах добычи природного газа. Причем при «мокрой очистке» также может решаться задача охлаждения газов и рекуперации теплоты жидкой фазой.

**Список литературы**


1. Харьков В.В., Дмитриева О.С., Дмитриев А.В., Николаев А.Н. Экспериментальное исследование очистки промышленных газов от масляного тумана в вихревом сепараторе // Экология и промышленность России. – 2026. – Т. 30, №2. – С. 4-10.
2. Бахронов Х.Ш., Ганиева С.У. Ход развития аппаратов для очистки газов от пыли // Journal of Advances in Engineering Technology. – 2022. – №2. – С. 33-38.
3. Qiu Zh., Zhou L., Bai L., El-Emam M.A., Agarwal R. Empirical and numerical advancements in gas-liquid separation technology: A review // Geoenergy Science and Engineering. 2024, vol. 233, p. 212577.
4. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. – М.: Наука, 1980. – 176 с.
5. Сугак Е.В., Войнов Н.А., Николаев Н.А. Очистка газовых выбросов в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами. – Казань: Изд-во «Отечество», 2009. – 224 с.
6. Лаптев А.Г., Башаров М.М., Лаптева Е.А. Математические модели и методы расчётов тепломассообменных и сепарационных процессов в двухфазных средах. 2-е изд., испр. – Старый Оскол: ТНТ, 2025. – 288 с.



Сведения об авторах:

*Лаптев Анатолий Григорьевич* – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Инженерная экология и безопасность труда»;

*Клочкова Валентина Александровна* – аспирант;

*Фарахов Камиль Тимурович* – аспирант.