

УДК 532.529

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2025.4.2

РАСЧЕТ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ ПОТОКОВ В АППАРАТАХ ВИХРЕВОГО ТИПА

© И. Х. Еникеев

*Московский политехнический университет
Россия, 107023 г. Москва, ул. Большая Семеновская, 38.*

Email: enickeev.iX@yandex.ru

На основе модели взаимопроникающих континуумов разработана схема расчета взаимодействия закрученных потоков в рабочей зоне вихревого пылеуловителя. Получены линии тока несущей и дисперсной фазы для первичного и вторичного потоков. Предложена схема расчета эффективности пылеулавливания, позволяющая в широком диапазоне изменения определяющих параметров находить эффективность очистки газопылевого потока для любого фракционного состава дисперсной пыли.

Ключевые слова: многофазные среды, дифференциальные уравнения, эффективность пылеочистки.

Введение

Закрученные потоки многофазных сред широко используются в современной технике (аппараты химической технологии, турбомашины, криогеника и т.д.) для интенсификации процессов тепло-массообмена и разделения фаз. Особое распространение получили аппараты вихревого типа, в которых в качестве рабочего тела наиболее часто встречаются два типа гетерогенных сред: 1) газо- и парокапельные потоки; 2) газовзвеси (газ, содержащий во взвешенном состоянии сухие или влажные твердые частицы). Для исследования гидродинамики вышеуказанных гетерогенных сред в аппаратах вихревого типа используются как феноменологические модели, так и стохастические, основанные на уравнениях Больцмана. В данной работе использовалась модель взаимопроникающих континуумов [1], основанная на предположении о сплошной структуре как несущей газовой фазы, так и дисперсных твердых частиц. Интегрирование данной системы проводилось модифицированным методом крупных частиц [2–3], позволяющим рассчитывать основные параметры дисперсных потоков в рабочей зоне аппарата в широком диапазоне скоростей поступающего в аппарат запыленного потока. Дисперсная фаза рассматривалась как совокупность фракций частиц, различающихся друг от друга по размерам и концентрациям.

Экспериментальная часть и методика расчета

В качестве исходного устройства рассматривался аппарат со встречными закрученными, схема которого представлена на рис. 1.

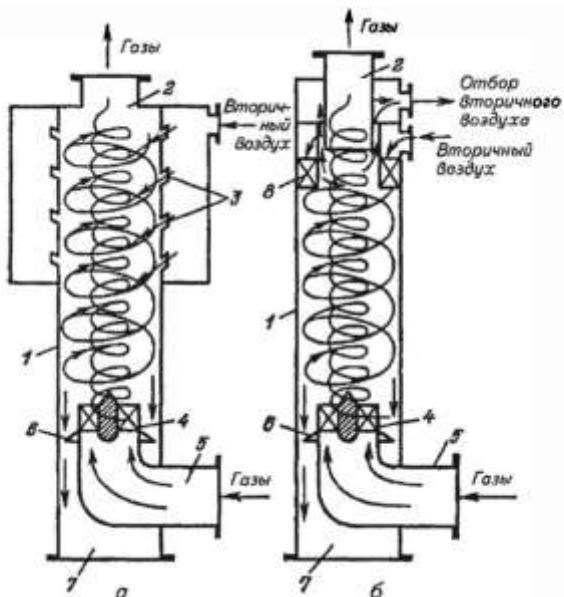


Рис. 1. Принципиальная схема аппарата со встречными закрученными потоками (АВЗП):
 (а) – сопловой ввод вторичного потока; (б) – лопаточный ввод вторичного потока.
 1 – рабочая зона аппарата, 2 – выходной патрубок, 3 – сопла, 4 – лопаточный завихритель,
 5 – ввод первичного потока, 6 – отбойная шайба, 7 – бункер для сбора уловленной пыли,
 8 – кольцевой лопаточный завихритель для вторичного потока.

Как показано на *рис. 1*, АВЗП представляет собой вертикальный цилиндрический корпус, в нижнюю и верхнюю часть которого через аксиально-лопаточный завихритель подается запыленный поток (G_1 и G_2 соответственно). В цилиндрической части аппарата происходит взаимодействие закрученных потоков, в результате чего частицы разных фракций отбрасываются к боковым стенкам аппарата и попадают в бункер для сбора уловленной пыли (на рисунке он указан цифрой (10), а чистый газовый поток без частиц пыли выводится наружу через выходной патрубок (8). Расчет параметров взаимодействия несущей и дисперсной фазы производился в предположении малой массовой концентрации частиц, что позволило расщепить исходную систему дифференциальных уравнений на две подсистемы и уравнения для несущей среды интегрировать отдельно от уравнений для дисперсной фазы [2–3]. В этом случае движение частиц разных фракций происходит в заданном поле скоростей газовой среды, что существенно упрощает решение задачи [4–6]. В результате интегрирования системы дифференциальных уравнений были получены значения скоростей несущей среды и дисперсных фракций, а также распределения концентрации дисперсной среды в рабочей зоне аппарата. Полученные значения скоростей позволили построить линии тока газа, изображенные на *рис. 1*, а по найденным распределениям концентраций частиц были выведены формулы для поправочных коэффициентов, позволяющие рассчитать эффективность очистки промышленных выбросов для заданных физико-механических свойств дисперсного потока. Эти формулы имеют вид:

$$\begin{aligned}
 K_{1i} &= \frac{b(r_{1i} - R_0)}{a(a + R_0)(a + br_{1i})} + \frac{1}{a^2} \ln \frac{R_0(a + br_{1i})}{br_{1i}(a + bR_0)}, \quad d_{1i} = \frac{7,52R_a^3}{Q_\Gamma R_0} \left\{ \frac{\mu Q_2 \ln \left[\frac{(R_0)}{r_{1i}}^2 (1 + \alpha) K_{1i} \right]}{\rho H \ln (1 + \alpha) \ln \left(\frac{R_0}{r_{1i}} \right)^2} \right\}, \\
 K_{2i} &= \frac{b(r_{2i} - R_u)}{a(a + bR_u)(a + br_{2i})} + \frac{1}{a^2} \ln \frac{R_u(a + br_{2i})}{r_{2i}(a + bR_u)}, \quad r_{1i}, r_{2i} \\
 d_{2i} &= \frac{4,95R_a^3}{Q_\Gamma} \sqrt{\frac{\mu Q_2 \left[R_0 \ln \frac{R_a - R_u}{R_a - r_{2i}} - 1,15(R_a - R_0) \right] K_{2i}}{\rho H (R_a^2 - R_0^2) R_0 \ln \frac{R_a - R_u}{R_a - r_{2i}}}}, \\
 a &= r_{1i}, r_{2i} - (5,5 \frac{S_2}{S_1} + 2,8), \quad b = (5,5 \frac{S_2}{S_1} + 0,4) \frac{1}{R_a}, \quad R_0 = (1 - 0,19 \frac{S_2}{S_1}) R_a, \quad \alpha = \frac{S_2}{S_1},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где S_1, S_2 – площади проходного сечения первичного и вторичного потока; R_0, R_a, R_u , H – радиус разделения потоков, радиус ввода первичного потока, радиус отбойной шайбы, высота аппарата, r_{1i}, r_{2i} – радиусы ввода частиц дисперсной фазы во входном сечении первичного и вторичного потока соответственно, d_{1i}, d_{2i} – минимальный размер улавливаемых частиц, вылетающих с радиусов r_{1i}, r_{2i} соответственно, μ, ρ, Q_2, Q_Γ – коэффициент динамической вязкости и плотность газа, суммарный расход и расход газа во вторичном потоке.

Схема расчета эффективности пылеулавливания на основе данных коэффициентов заключается в следующем: площадь ввода первичного и вторичного потоков разбиваются на кольцевые участки с радиусами r_{1i}, r_{2i} соответственно, где i – текущий номер кольцевого участка. На каждом таком участке по формулам (1) определяется минимальный диаметр улавливаемых частиц и по формулам (2) – значения эффективности фракционной очистки первичного и вторичного потоков:

$$\eta_{\phi 1}^i = \frac{R_1^2 - r_{1i}^2}{R_1^2 - R_{\text{выт}}^2} 100\%, \quad \eta_{\phi 2}^i = \frac{R_a^2 - r_{2i}^2}{R_a^2 - R_{\text{выт}}^2} 100\%, \tag{2}$$

где $R_{\text{выт}}, R_{\text{выт}}$ – радиусы вытеснителя и выходного сечения аппарата. Зная эффективность фракционной очистки первичного и вторичного потока, по формулам (3) определяется эффективность очистки первичного и вторичного потоков:

$$\eta_1 = \sum_{i=1}^N \eta_{\phi 1}^i m_i, \quad \eta_2 = \sum_{i=1}^M \eta_{\phi 2}^i m_i, \tag{3}$$

где N, M – количество кольцевых участков в первичном и вторичном потоке, а m_i – массовое содержание уловленных частиц минимального размера, вылетающих с i -ого кольцевого участка. На основании формул (3) вычисляется общая эффективность пылеулавливания аппарата:

$$\eta = \left(\frac{Q_1}{Q_\Gamma} \eta_1 + \frac{Q_2}{Q_\Gamma} \eta_2 \right) 100\%,$$

где Q_1 – расход газа в первичном потоке.

В качестве примера производился расчет эффективности очистки газодисперсного потока в вихревом пылеуловителе при следующих исходных данных (*табл.*):

расход запыленного газа в рабочей зоне аппарата – 2 400 $\frac{м^3}{час}$;

скорость воздуха в рабочей зоне аппарат – до 10 м/с;

плотность частиц пыли – 4 280 кг/м³;

массовая концентрация дисперсной фазы на входе в аппарат – 0,02.

Таблица

Дисперсный состав пыли, поступающей в вихревой пылеуловитель

d, мкм	0...5	5...10	10...30	30...50
m, %	10	80	5	5

Здесь d – диаметр частицы, m – массовое содержание данной фракции в дисперсной фазе. Использование приведенной выше методики для частиц с заданными физико-механическими характеристиками позволило получить зависимость эффективности пылеулавливания от размера частиц, изображенную на *рис. 2*.

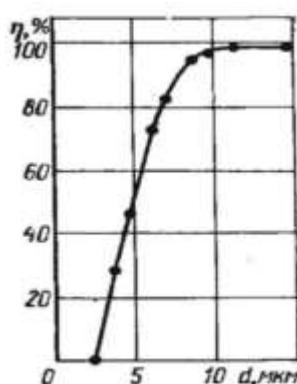


Рис. 2. Зависимость эффективности пылеулавливания от диаметра частиц.

Полученная зависимость хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными, а также с данными расчетов других авторов [7–8].

Заключение

На основе схемы взаимопроникающих континуумов создана математическая модель движения закрученных потоков в аппаратах вихревого типа. Предложен численный метод интегрирования уравнений в частных производных для широкого диапазона изменения определяющих параметров. Показано, что при малых значениях массовой концентрации дисперсной фазы во входных сечениях аппарата, исходная система расщепляется на две подсистемы, в результате чего расчет параметров несущей среды можно проводить отдельно от расчета параметров дисперсной фазы. В этом случае движение частиц отдельных фракций можно рассматривать как движение частиц в заданном поле скоростей газовой среды. Анализ поля скоростей и распределения концентраций дисперсной среды позволил получить инженерные формулы расчета эффективности очистки первичного и вторичного потоков. Расчет по этим формулам выявил ряд технологических процессов, в которых использование аппаратов со встречными закрученными потоками осуществляется с наибольшей эффективностью.

ЛИТЕРАТУРА

- Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Т. 1. М.: Наука, 1987. 463 с. [Nigmatulin R. I. Dynamics of multiphase media. Vol. 1. Moscow: Nauka, 1987. 463 p.].
- Еникеев И. Х. Расчет сушки влажных частиц в аппаратах со встречными закрученными потоками // Инженерно-физический журнал. 1991. Т. 61. №5. С. 770–777. [Enikeev I. Kh. Calculation of drying of wet particles in devices with counter-swirling flows // Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal. 1991. Vol. 61. No. 5. P. 770–777].
- Еникеев И. Х., Кузнецова О. Ф., Полянский В. А., Шургальский Э. Ф. Численное моделирование двухфазных закрученных течений в областях сложной формы // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1989. №1. С. 90–96. [Enikeev I. Kh., Kuznetsova O. F., Polyansky V. A., Shurgalsky E. F. Numerical modeling of two-phase swirling flows in domains of complex shape // Zhurnal Vychislitelnoi Matematiki i Matematicheskoi Fiziki. 1989. No. 1. P. 90–96].
- Еникеев И. Х. Расчет дозвуковых газодисперсных потоков в криволинейных каналах методом крупных частиц // Теоретические основы химической технологии. 2006. Т. 40. №1. С. 85–94. [Enikeev I. Kh. Calculation of subsonic gas-dispersion flows in curved channels by the Particle-in-cell method // Teoreticheskie Osnovy Khimicheskoi Tekhnologii. 2006. Vol. 40. No. 1. P. 85–94].

5. Еникеев И. Х. Численное моделирование полидисперсных потоков в осесимметричных областях сложной формы // Вестник Башкирского университета. 2023. Т. 28. №4. С. 310–316. [Enikeev I. Kh. Numerical simulation of polydisperse flows in axisymmetric areas of complex shape // Bulletin of Bashkir University. 2023. Vol. 28. No. 4. P. 310–316].
6. Еникеев И. Х. Математическое моделирование газопылевых течений в сепараторах соплового типа // Термофизика и Аэромеханика. 2020. Т. 27. №1. С. 99–108. [Enikeev I. Kh. Mathematical simulation of gas-dust flow in a nozzle-type separator // Termophysics and Aeromechanics. 2020. Vol. 27. No. 1. P. 99–108].
7. Ветошкин А. Г. Инженерная защита окружающей среды от вредных выбросов. М. Инфа-Инженерия, 2016. 416 с. [Vetoshkin A. G. Engineering protection of the environment from harmful emissions. Moscow: Infra-Inzheneriya, 2016. 416 p.].
8. Сажин Б. С., Кочетов О. Г., Гудим Л. И., Кочетов Л. М. Экологическая безопасность технологических процессов. М.: МГТУ им. А. Н. Косыгина, 2007. 390 с. [Sazhin B. S., Kochetov O. G., Gudim L. I., Kochetov L. M. Environmental safety of technological processes. Moscow: Kosygin Moscow State Textile University, 2007. 390 p.].

Поступила в редакцию 10.09.2025 г.

**CALCULATION OF SWIRLING POLYDISPERSE FLOWS
IN VORTEX-TYPE DEVICES****© I. Kh. Enikeev**

*Moscow Polytechnic University
38 Bolshaya Semenovskaya st., 107023 Moscow, Russia.*

Email: enickeev.iX@yandex.ru

Based on the model of interpenetrating continua, a scheme for calculating the interaction of swirling flows in the working zone of a vortex dust collector has been developed. Carrier and dispersed phase streamlines for primary and secondary flows have been obtained. A scheme for calculating the efficiency of dust collection is proposed, which makes it possible to find the efficiency of gas and dust flow purification for any fractional composition of dispersed dust in a wide range of changes in determining parameters.

Keywords: multiphase media, differential equations, dust cleaning efficiency.

Received 10.09.2025.

О б авторе / about the author**Еникеев Ильдар Хасанович**

д.т.н., профессор,
профессор кафедры “Математика”
Московского политехнического университета.
Email: enickeev.iX@yandex.ru

Enikeev Ildar Khasanovich

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor of the Department of Mathematics
of the Moscow Polytechnic University.
Email: enickeev.iX@yandex.ru