



УДК 621.928.9

**А.В. Дмитриев** – кандидат технических наук, доцент  
Нижнекамский химико-технологический институт (НХТИ)

**М.Г. Зиганшин** – кандидат технических наук, доцент  
Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ СЕПАРАТОРОВ ДИСПЕРСНЫХ ПОТОКОВ

### АННОТАЦИЯ

Предложен полуэмпирический метод расчета эффективности аппаратов вихревого и циклонного типов. Полученные параметры позволяют устанавливать эффективность очистки по размерам и конструктивным особенностям аппаратов.

**A.V. Dmitriev** – candidate of technical sciences, associate professor  
Nignekamsk institute of chemical technology (NICT)

**M.G. Jihanshin** – candidate of technical sciences, associate professor  
Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)

## THE COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF EFFICIENCY OF DISPERSION STREAM SEPARATOR CONSTRUCTIONS

### ABSTRACT

The half-empirical calculation method of efficiency of vortex and cyclonic devices is offered. The received parameters allow establishing the clearing efficiency according to sizes and design features of devices.

Эффективность отделения дисперсной части вращающегося потока аэрозоля определяется характеристиками потока и аппарата, влияющими на силу инерции в криволинейном потоке. Энергетическим параметром, связывающим конструктивные параметры устройства, характеристики потока и эффективность отделения взвешенных частиц от несущей среды, для широкого класса инерционных аппаратов очистки выбросов и сбросов может служить градиент силы в радиальном направлении потока  $f_R$ , Н/м [1]. Для кольцевого сечения возвратно-поточного циклона (рис. 1а)

$$f_R = \rho u_0^2 \left( R_2^{0.5} + R_1^{0.5} \right)^2 / 4 \text{ Па}\cdot\text{м}. \quad (1)$$

Он представляет собой комбинацию постоянных величин, характеризующих конкретный поток и аппарат. Форма  $f_R$  зависит от математической модели вращения, принятой для описания реального движения потока в сепараторе. С достаточной для практических целей точностью трехмерное движение потока в прямооточных вихревых аппаратах (рис. 1б) и в кольцевой части возвратно-поточных циклонов может быть аппроксимировано моделью плоского вращения  $uR^k = \text{const}$ .

В теоретических расчетах распределения скоростей и давлений в сепараторах обычно используются значения  $k$ , равные 1, 0,5, 0 и -1. Крайние показатели соответствуют «потенциальной» и «квazitвердой»

моделям вращения [2]. В кольцевом сечении возвратно-поточного циклона поток перемещается по круговым траекториям со значением  $k > 0$ . Для описания движения потока при этом часто используется модель «полупотенциального» вращения с  $k = 0,5$  (рис. 2а).

Тип математической модели вращательного движения системы вода – жидкая нерастворимая фаза меньшей плотности в ПВС с тангенциальным завихрителем при значениях крутки  $u_{\text{max}}/u_m > 1$  определен по [3] как «квazitвердой», т.е. вращение с постоянной угловой скоростью (рис. 2б), описываемое моделью вращения с  $k = -1$ .

В прямооточных аппаратах с наличием центрального стока часть потока движется в радиальном направлении. С приближением к центру интенсивность движения по окружности падает и тангенциальная скорость потока снижается, что соответствует модели «квazitвердой» вращения. По [4], в периферийной части аппаратов такого типа происходит потенциальное вращение потока с  $k \sim 1$ . Вследствие этого в целом значение  $k$  получается несколько выше, чем -1.

Каждому типоразмеру аппарата соответствует строго определенное значение  $f_R$ , связывающее его конкретные конструктивные характеристики с параметрами обрабатываемой среды. Поэтому параметр  $f_R$  принят в качестве исходного для получения обобщенной характеристики энергетического

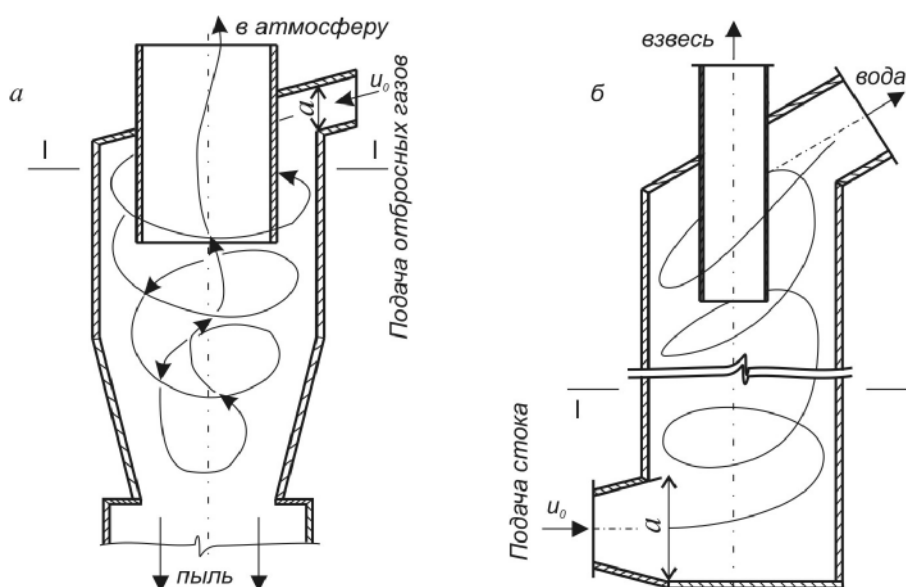


Рис. 1. Движение дисперсного потока в сепараторах:  
 а – возвратно-поточный циклон; б – прямоточно-вихревой сепаратор (ПВС)

совершенства завихрительных устройств. Такая характеристика для сферической частицы диаметром  $D_p$  и плотностью  $\rho_p$  во вращающемся потоке с радиусом кривизны  $R_2$ , динамическим коэффициентом вязкости  $\eta$  и плотностью несущей среды  $\rho_G$  может быть выражена, в конечном счете, через комплекс со структурой критерия Рейнольдса:

$$u_0 \rho_p^2 D_p^4 / C \rho_G R_2^3 \eta \equiv Re_r, \quad (2)$$

где  $C$  – коэффициент, численное значение которого зависит от типа завихрительного устройства аппарата.

Параметр  $Re_r$  составлен посредством комбинации безразмерных комплексов, выражающих соотношение энергий и действий частицы и вращающегося потока. Поэтому в криволинейных (вращающихся, вихревых) потоках численные значения  $Re_r$  соответствуют степени сепарации частиц и могут использоваться для ее оценки.

Конкретная форма выражения, описывающего распределение тангенциальных скоростей, зависит от размеров сечения, к которому привязываются среднерасходная скорость  $u_0$  и расход  $W$  потока жидкости, поступающей в аппарат с тангенциальным вводом. В общем случае, при произвольном размере  $a \times b$  сечения входного патрубка

$$W = abu_0 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3)$$

Выделив характерное сечение I-I с такой же площадью на некотором расстоянии от входа, соответствующем развитому потоку (рис. 1б) и учитывая, что «кватитвердой» модели вращения с  $k = -1$  (рис. 2б) соответствует линейная зависимость

тангенциальных скоростей от расстояния до оси аппарата  $u_0 = \omega R$ , получим

$$\omega = 2u_0 b / R_2^2 \text{ с}^{-1}, \quad (4)$$

$$u = \omega R = 2u_0 b R / R_2^2 \text{ м/с}. \quad (5)$$

Пренебрегая влиянием на распределение давлений в поперечном направлении силы тяжести (разность значений гидростатического давления в высшей и низшей точках поперечного сечения аппарата не превышает нескольких процентов) и силы трения (кватитвердая модель вращения), можно представить градиент давления в радиальном направлении поперечного сечения аппарата как

$$dp = \rho_L u^2 dR / R, \text{ Па}. \quad (6)$$

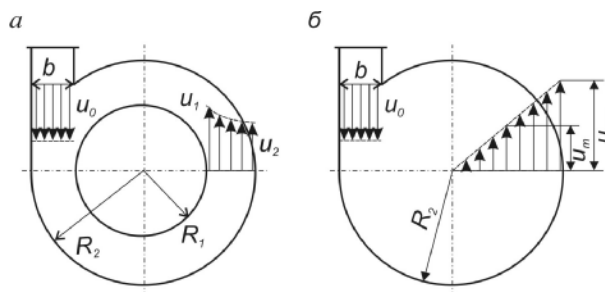


Рис. 2. Тангенциальные скорости в поперечных сечениях аппаратов:

а – при «полупотенциальной» модели в кольцевом канале циклона; б – при «кватитвердом» движении в ПВС с тангенциальным завихрителем;  $u_{\max}$ ,  $u_m$  – соответственно максимальная и средняя тангенциальные скорости потока в ПВС;  $u_1$ ,  $u_2$  – соответственно скорости на внутренней и внешней границах канала с радиусами  $R_1$ ,  $R_2$



С учетом соотношения (5) выделяем в (6) константу, представляющую радиальный градиент силы  $f_R$  в прямоточно-вихревом сепараторе:

$$f_R = 4\rho_L u_0^2 b^2 / R_2, \text{ Па}\cdot\text{м}. \quad (7)$$

Удельная затрата энергии в течение 1 с на создание вихревого движения с заданной начальной скоростью  $u_0$ , т.е. действие, совершаемое над единицей объема потока, обрабатываемого в прямоточно-вихревом аппарате с тангенциальным завихрителем (ТЗ)

$$a_{ТЗ} = f_R / u_0 = 4\rho_L u_0 b^2 / R_2 \text{ Па}\cdot\text{с}. \quad (8)$$

Отношение

$$a_{ТЗ} / \eta = 4\rho_L u_0 b^2 / R_2 \eta \equiv Re_{ТЗ} \quad (9)$$

дает специфичную для криволинейного движения потока в сепараторе с ТЗ характеристику со структурой критерия Рейнольдса. В комплекс  $Re_{ТЗ}$  входят основные характеристики потока и прямоточно-вихревого аппарата с ТЗ, и его можно использовать в качестве безразмерного параметра энергетического совершенства обработки потока в аппаратах с конкретными размерами и параметрами потока.

Аналогичную безразмерную энергетическую характеристику капли, перемещающейся в этом потоке, можно представить следующим образом:

$$(Re_{dr}^{in})^2 = 3\pi(u_0 \tau_w / R_2)^2 \quad (10)$$

где  $\tau_w = 18\eta / (\rho_{dr} D_{dr}^2)$ ,  $\rho_{dr}$ ,  $D_{dr}$  – ее время релаксации, с; плотность, кг/м<sup>3</sup> и диаметр, м.

Сопоставляя  $Re_{ТЗ}$  с  $Re_{dr}^{in}$ , находим параметр эффективности отделения взвешенной части потока в аппарате, аналогичный (2):

$$(Re_{dr}^{in})^2 / Re_{ТЗ} = 3\pi u_0 \rho_{dr}^2 D_{dr}^4 / (4\rho_L b^2 R_2 \eta) \equiv Re_r \quad (11)$$

Его численные значения могут использоваться для оценки эффективности отделения взвешенных несмешивающихся капель из основного потока. С помощью числа  $Re_r$  могут быть вычислены фракционные коэффициенты очистки примеси в аппаратах, реализующих инерционный способ отделения примеси от газовой части выброса. Расчеты большого числа пылеуловителей циклонного типа отечественных конструкций показали, что 99%-ной степени осаждения твердых частиц, взвешенных в газовой среде, соответствует значение числа  $Re_r$  в пределах  $\cdot 10^{-4} - 10^{-3}$ . К примеру, для циклона ЦН-15 возвратно – поточного типа оно составляет  $4,04 \cdot 10^{-4}$ .

Для нахождения параметра эффективности выделения диспергированной жидкости из жидкой среды большей плотности в аппарате, представленном на рис. 1б, 2б, была использована зависимость фракционной эффективности разделения системы вода – капли нефти от безразмерного диаметра капель и параметра крутки потока, приведенная в [3]. При квазитвердом вращении (рис. 2б) параметр крутки  $K = u/u_0 = 2$ , и размер капель  $D_{dr}$ , соответствующий 99% - му отделению, для сепаратора диаметром 0,5 м ( $R_2 = 0,25$  м) составляет  $8,25 \cdot 10^{-4}$  м. Расчеты по (11) показали, что значение  $Re_r = 4,04 \cdot 10^{-4}$ , соответствующее осаждению частиц из газовой среды в циклонных и вихревых

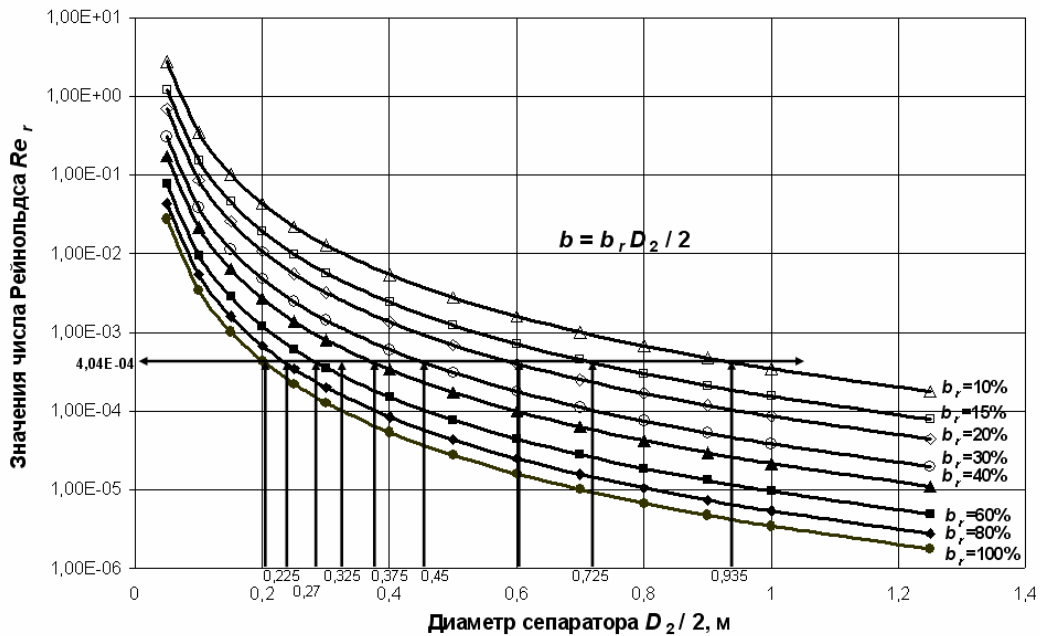


Рис. 3. Номограмма для оптимизации конструктивных размеров ПВС



сепараторах, наблюдается при среднерасходной скорости в аппарате  $\sim 3$  м/с. Таким образом, комплекс  $Re_r$  может служить адекватной критериальной характеристикой осаждения взвешенных частиц в газовой и жидкой среде. Комплекс  $Re_r$  может быть также использован для оптимизации размеров аппаратов. С целью нахождения оптимальных соотношений входного размера и диаметра сепаратора  $D_2 = 2R_2$  представим выражение (11) в виде:

$$Re_r = 6\pi u_0 \rho_{dr}^2 D_{dr}^4 / \rho_L b_r^2 D_2^3 \eta, \quad (12)$$

где  $b_r = 2b/D_2$  – относительный входной размер сепаратора.

Результаты расчетов показывают, что относительный входной размер сепаратора  $b_r$  оказывает существенное влияние на эффективность разделения капель. На рис. 3 представлена номограмма для практического использования с целью оптимизации конструктивных размеров ПВС. По заданному внутреннему диаметру аппарата  $D_2$  и критическому значению  $Re_r = 4,04E-04$  определяется минимально возможное значение относительного входного размера ПВС  $b_r$ , выраженное в процентах от величины  $D_2/2$ , и затем подсчитывается входной размер  $b$  сепаратора.

Таким образом, комплекс  $Re_r$  может быть использован в проектировании и эксплуатации ПВС

для конструктивного расчета с оптимизацией размеров аппаратов и режимных параметров, направленной на обеспечение требуемой эффективности разделения многофазных потоков. При заданном или известном конструктивном параметре аппарата, определяющем радиус кривизны потока, возможно решение обратной задачи (поверочный расчет) – нахождение фракционных коэффициентов эффективности отделения примеси.

#### Литература

1. Зиганшин М.Г. Теоретические основы пылегазоочистки. – Казань: Изд-во КазГАСУ, 2005. – 262 с.
2. Белоусов В.В. Теоретические основы процессов газоочистки. – М.: Металлургия, 1988. – 256 с.
3. Овчинников А.А., Шадрин А.А., Алексеев Д.В., Николаев Н.А. Моделирование процесса очистки стоков промышленных предприятий от нерастворимых жидких взвесей в прямоточно-вихревых сепараторах. // Химическая промышленность сегодня, 2006, №3. – С. 52-56.
4. Овчинников А.А. Динамика двухфазных закрученных турбулентных течений в вихревых сепараторах. / А.А. Овчинников. – Казань: ЗАО «Новое знание», 2005. – 288 с.