

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТУРБУЛЕНТНОЙ СЕПАРАЦИИ ТОНКОДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ В ГИДРОЦИКЛОНЕ

**На основе применения теории турбулентной миграции тонкодисперсной фазы получены выражения для расчета коэффициента переноса частиц и эффективности разделения в гидроциклоне. Дан пример расчета гидроциклона.**

## Введение

Гидроциклоны успешно применяются во многих отраслях промышленности и показывают хорошие результаты. Их достоинством являются небольшие размеры, эффективность работы, несложная конструкция и возможность объединения аппаратов в один большой комплекс (мульти-гидроциклон).

Известно, что режим течения жидкости в аппарате носит турбулентный характер, поэтому возникает явление, называемое турбулентной диффузией, которое сильно влияет на разделяющую способность гидроциклона.

Для процесса разделения в гидроциклоне характерны большие скорости жидкости, которая подается в аппарат под давлением, что объясняет появление турбулентных пульсаций и вихрей. Небольшие частицы, вовлекаются с тем или иным отставанием по фазе и амплитуде в пульсационное движение среды и совершают вместе с ней интенсивное диффузионное перемещение по потоку. Более того, наличие значительных градиентов осредненной скорости среды и ее пульсационных составляющих в пристеночной области потока вызывает появление еще двух специфических форм движения частиц.

**А.Г. Лаптев\***,  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология воды и топлива», ФГБОУ ВПО Казанский государственный энергетический университет. Заместитель директора по научной работе, ООО Инженерно-внедренческий центр «Инжехим»

**М.М. Башаров**,  
кандидат технических наук, ассистент кафедры «Технология воды и топлива», ФГБОУ ВПО Казанский государственный энергетический университет

**А.И. Фарахова**,  
аспирант, ФГБОУ ВПО Казанский государственный энергетический университет

Одной из них является продольное скольжение частиц относительно среды со скоростью, соизмеримой со скоростью ее течения, другой — поперечная миграция частиц со скоростью, соизмеримой со скоростью турбулентных пульсаций среды. По этим причинам распределение концентрации частиц по поперечному сечению турбулентного потока существенно отличается от распределения частиц в ламинарном потоке. Другим следствием турбулентности среды является резкое повышение интенсивности осаждения частиц из турбулентного потока на обтекаемых им стенках. Поэтому актуальной и важной задачей является расчет эффективности турбулентной сепарации в гидроциклоне при разделении дисперсных сред.

## *Эффективность турбулентной сепарации*

При турбулентном режиме течения жидкости скорость осаждения частиц на стенках каналов обычно на несколько порядков превосходит скорость диффузионного (броуновского) осаждения тех же частиц из ламинарного потока и, в противоположность последнему, возрастает с повышением скорости течения среды, свидетельствуя, тем самым, об инерционной природе явления.

В пристенной области происходит значительное падение скорости среды и частицы. В этой области находится вязкий подслои, толщина которого очень мала, поэтому иногда им можно пренебречь. Дисперсные частицы либо оседают на стенке и продолжают движение вниз к сливному отверстию, либо ударяются о стенку гидроциклона и продолжают свое движение в зависимости от силы, под влиянием которой она оказалась.

Эффективность турбулентной сепарации  $\eta$  тонкодисперсной фазы в аппаратах

\*Адрес для корреспонденции: tvf\_kgeu@mail.ru

разделения можно вычислить, используя выражение, полученное на основе турбулентной миграции частиц и вероятностно-стохастической модели [1], которая согласуется с энергетической моделью [2], по выражению

$$\eta = 1 - \text{EXP}(-N); \quad (1)$$

Где  $N$  — число единиц переноса, отнесенное к концентрациям потока:

$$N = \frac{\beta_D F}{Q}, \quad (2)$$

где  $F$  — поверхность стенок гидроциклона,  $\text{м}^2$ ;  $\beta_D$  — коэффициент переноса дисперсной фазы (скорость турбулентной миграции),  $\text{м}/\text{с}$ ;  $Q$  — производительность гидроциклона,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Если же твердая фаза представлена различными по диаметру частицами, то эффективность рассчитывается по правилу аддитивности. Это следует из того, что принцип действия любого аппарата основан на использовании одного или нескольких механизмов сепарации, взвешенных в потоке дисперсных частиц. Влияние каждого из механизмов на общую эффективность сепарации зависит от размеров и плотности частиц, физических свойств среды и условий протекания процесса. С учетом этого общая эффективность вычисляется по выражению:

$$\eta_{\Sigma} = 1 - \prod_i (1 - \eta_i), \quad (3)$$

где  $\eta_i$  — эффективность сепарации за счет  $i$ -го механизма.

Оценка размеров улавливаемых частиц за счет турбулентного механизма производится по комплексу, который определяет спектр осаждаемых частиц, рассмотренный в работах [3, 4]:

♦ I группа — частицы, полностью увлекаемые турбулентными пульсациями среды. Их диаметр должен удовлетворять условию:

$$d_{\text{ч}} < 0,134 \sqrt{\frac{R\mu_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ч}}u_*}}; \quad (4)$$

♦ II группа — частицы, обладающие некоторой инерционностью по отношению к увлечению турбулентными пульсациями:

$$0,134 \sqrt{\frac{R\mu_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ч}}u_*}} < d_{\text{ч}} < 13,4 \sqrt{\frac{R\mu_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ч}}u_*}}; \quad (5)$$

**Ключевые слова:** эффективность разделения, турбулентная миграция, коэффициенты переноса, расчет гидроциклона

♦ III группа — частицы, не увлекаемые турбулентными пульсациями среды; должна удовлетворять условию:

$$d_{\text{ч}} > 13,4 \sqrt{\frac{R\mu_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ч}}u_*}}, \quad (6)$$

где  $R$  — радиус канала,  $\text{м}$ ;  $\mu_{\text{ж}}$  — вязкость жидкости,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $u_*$  — динамическая скорость трения на стенке,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\rho_{\text{ч}}$  — плотность частицы,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Динамическую скорость трения на стенке гидроциклона можно вычислить, используя среднюю диссипацию энергии по формуле [5]:

$$u_* = \left( \frac{\bar{\epsilon} R_1 v_{\text{ж}}}{4\rho_{\text{ж}}} \right)^{0,25}, \quad (7)$$

где  $\bar{\epsilon}$  — средняя объемная диссипация энергии,  $\text{Вт}/\text{м}^3$ ;  $R_1 \approx 11,6$  — безразмерная толщина вязкого подслоя;  $v_{\text{ж}}$  — кинематическая вязкость жидкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\rho_{\text{ж}}$  — плотность жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Средняя скорость диссипации энергии равна:

$$\bar{\epsilon} = \frac{\Delta P S u_{\text{вх}}}{V_{\text{ж}}} \quad (8)$$

где  $\Delta P$  — гидравлическое сопротивление гидроциклона,  $\text{Па}$ ;  $S$  — площадь входного патрубка,  $\text{м}^2$ ;  $u_{\text{вх}}$  — скорость потока во входном патрубке,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $V_{\text{ж}}$  — объем жидкости в гидроциклоне,  $\text{м}^3$ .

Для определения коэффициента переноса частиц  $\beta_D$  в числе единиц переноса (3) записывается сопротивление переносу в пристенном слое в рамках двухслойной модели Прандтля [3, 4]:

$$\frac{1}{\beta_D} = \int_0^{\delta} \frac{dy}{D_{\text{бп}} + D_d} = \int_0^{\delta_1} \frac{dy}{D_{\text{бп}} + D_d} + \int_{\delta_1}^{\delta} \frac{dy}{D_d}, \quad (9)$$

где  $D_{\text{бп}}$  — коэффициент броуновской диффузии частиц,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $D_d$  — коэффициент турбулентной диффузии частиц  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\delta$  — толщина пристенного слоя,  $\text{м}$ ;  $\delta_1$  — толщина вязкого подслоя,  $\text{м}$ ;  $y$  — поперечная координата к стенке гидроциклона,  $\text{м}$ .

Одна из концепций свободного инерционного движения частиц из турбулентного потока к стенке сводится к утверждению, что в пристеночной области турбулентного потока имеет место инерционный выброс частиц из несущих турбулентных вихрей в направлении стенки. Вблизи вязкого подслоя происходит затухание турбулентности (по модели Ландау-Левича и в вязком подслое про-

исходит постепенное затухание турбулентности), а взвешенные частицы в силу инерции продолжает свой путь через вязкий подслой вплоть до стенки. Кроме этого, при движении турбулентного потока с дисперсной фазой за счет осаждения частиц на поверхности канала образуется шероховатость, выступы которой могут превышать толщину вязкого подслоя. На основании отмеченных выше факторов можно рассматривать перенос только в турбулентной области (где  $D_d \gg D_{\text{бр}}$ ), пренебрегая переносом в вязком подслое. Тогда сопротивление переносу (9) получит вид:

$$\frac{1}{\beta_d} = \int_{\delta_1}^{\delta} \frac{dy}{D_d}, \quad (10)$$

Коэффициент турбулентной диффузии частиц связан с коэффициентом турбулентного обмена в однофазном потоке выражением [1].

$$D_d = \frac{D_T}{(1 + \omega_E \tau_p)},$$

где  $\omega_E$  — угловая частота энергоёмких пульсаций:  $\omega_E = u_* / (0,1R)$ ;  $\tau_p$  — время релаксации частицы:

Коэффициент турбулентной диффузии для гидроциклона получен в виде [6]:

$$D_T = 0,0112 V_t r, \quad (11)$$

где  $V_t$  — аксиальная скорость движения частиц, принимаемая равной скорости движения жидкости, м/с;  $r$  — радиус, м.

После интегрирования (10) с функцией (11) получим:

$$\beta_d = \frac{0,0112 \bar{V}_t}{\ln \left( \frac{R_\delta}{R_1} \right) (1 + \omega_E \tau_p)}, \quad (12)$$

где  $R_\delta = u_* \delta / \nu$  — безразмерная толщина гидродинамического пограничного слоя;  $R_1 = 11,6$ ;  $\bar{V}_t$  — средняя аксиальная скорость движения жидкости за пределами пристенного слоя, т.е. при  $y \geq \delta$ . Безразмерная толщина пограничного слоя может быть найдена по выражению, полученному на основе баланса импульса:

$$R_\delta = \frac{u_*}{\nu} \exp \left[ 0,4 \left( \frac{\bar{V}_t}{u_*} - 13,76 + 2,5 \ln \frac{30}{u_*} \right) \right] \quad (13)$$

Следует отметить, что в теории турбулентной миграции частиц в газах [1] коэффициент  $\beta_d$  называют скоростью турбулентной миграции  $u_t$ , м/с, т.е. здесь  $\beta_d = u_t$ .

### Алгоритм расчета эффективности турбулентной сепарации

Расчет эффективности турбулентной сепарации начинается с гидравлического расчета гидроциклона.

Гидравлическое сопротивление гидроциклона рассчитывается в зависимости от режима работы [7], а именно:

- ♦ для гидроциклона без воздушного столба

$$\Delta p = E u \rho_{\text{ж}} u_{\text{вх}}^2; \quad (14)$$

- ♦ для гидроциклона с воздушным столбом

$$\Delta p = 0,5 E u \rho_{\text{ж}} u_{\text{вх}}^2. \quad (15)$$

Задавшись отношением  $Q_1 / Q = 0,9$ , критерий Эйлера вычисляется по формуле [7]:

$$Eu = 1 + 3,5A \left( \frac{Q_1}{Q} \right)^{0,8}, \quad (16)$$

где величина  $A$  определена по графику [7].

Динамическая скорость рассчитывается по формуле (7) с диссипацией энергии по формуле (8).

Коэффициент переноса дисперсной фазы вычисляется по формуле (11).

Далее рассчитывается число единиц переноса  $N$  (2) и эффективность турбулентной сепарации  $\eta$  (1).

Пример. В гидроциклоне (диаметр 75 мм, высота 545 мм, диаметр нижнего слива 26 мм, диаметр верхнего слива 20 мм, радиус воздушного столба 2 мм) очищается целлюлозная масса плотностью  $\rho_{\text{ж}} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>, вязкостью  $\mu_{\text{ж}} = 1,5 \cdot 10^{-3}$  Па·с. Плотность частиц  $\rho_{\text{ч}} = 2500$  кг/м<sup>3</sup>. Производительность верхнего слива  $Q_{\text{в.сл.}} = 0,224 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с, производительность нижнего слива  $Q_{\text{н.сл.}} = 1,462 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с. Определить минимальный диаметр улавливаемых частиц, диаметр частиц, увлекаемых турбулентными пульсациями, и эффективность турбулентной сепарации.

Решение. Производительность гидроциклона складывается из объемных расходов жидкости через нижний и верхний сливы:

$$Q = Q_{\text{в.сл.}} + Q_{\text{н.сл.}} = (0,224 + 1,462) \cdot 10^{-3} = 1,686 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Диаметр входного патрубка  $d_{\text{вх}} = 0,04$  м.

Скорость среды во входном патрубке  $U_{\text{вх}} = 1,34$  м/с.

Число Эйлера (14): 4,86, где  $A = 1,2$  при  $Re_{\text{вх}} = 35786$ .

Перепад давления  $\Delta p = 4376$  Па.  
Диссипация энергии (8),  $\varepsilon = 6182$  Вт/м<sup>3</sup>,  
где  $V_{ж} = 1,2 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>;  $S = 1,26 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>  
Динамическая скорость (7)  $u_* = 0,0735$  м/с.

Оценка размеров частиц по условию (4)  
 $d_{ч} = 7,43 \cdot 10^{-5}$  т.е. частицы с меньшими размерами будут полностью увлекаться турбулентными пульсациями среды.

Безразмерная толщина пограничного слоя (13)  $R\delta = 28,8$ , где  $V_t = 10$  м/с [6]. Коэффициент переноса частиц (12)  $\beta_d = 0,0123$  м/с. Число единиц переноса (2)  $N = 0,656$ , где  $F = 0,09$  м<sup>2</sup> Эффективность разделения для частиц полностью увлекаемыми турбулентными пульсациями среды по (1) составит  $\eta = 0,48$  (48%)

С использованием традиционных методов расчета, а так же с применением данного подхода выполнены расчеты и проектирование промышленного гидроциклона очистки циркуляционной воды от тонкодисперсной фазы в производстве этилена. Внедрение гидроциклона подтвердило правильность сделанных расчетов.

## Заключение

**В** данной статье показано применение подхода, когда перенос тонкодисперсной фазы в жидкостях, рассматривается как разновидность массообменного процесса. Это дает возможность использовать уравнения из теории массопередачи. В результате получены формулы расчета коэф-

фициента переноса дисперсной фазы для каждого спектра размеров частиц; разработан алгоритм расчета эффективности турбулентной сепарации; показана значимость влияния турбулентной сепарации на разделяющую способность гидроциклона.

## Литература

1. Медников Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Наука, 1980. 176 с.
2. Зиганшин М. Г. Проектирование аппаратов пылегазоочистки / М. Г. Зиганшин, А. А. Колесник, В. Н. Посохин М.: Изд-во Экопресс-ЗМ, 1998, 505 с.
3. Лаптев А. Г. Эффективность турбулентной сепарации мелкодисперсной фазы в тонкослойных отстойниках / А. Г. Лаптев, М. М. Башаров, А. И. Фарахова // Энергосбережение и водоподготовка, 2011. № 5 (73). С. 43-46.
4. Лаптев А. Г. Определение эффективности тонкослойных отстойников в турбулентном режиме / А. Г. Лаптев, М. М. Башаров, А. И. Фарахова // Вода: химия и экология, 2011. № 5. С. 25-30.
5. Лаптев А. Г. Модели пограничного слоя и расчет тепломассообменных процессов. Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2007. 500 с.
6. Адельшин А. Б. Энергия потока в процессах интенсификации очистки нефтесодержащих сточных вод. Часть 1. Гидроциклоны. Казань: КГАСА, 1996. 200 с.
7. Поваров А. И. Гидроциклоны на обогатительных фабриках. М.: Недра, 1978. 232 с.

A.G. Laptev, M.M. Basharov, A.I. Farachova

## DETERMINATION OF EFFICIENCY OF TURBULENT SEPARATION OF FINELY DISPERSED PHASE IN HYDROCYCLONE

Formulas for calculations of transfer coefficient and separation efficiency in hydrocyclone were obtained based on theory of turbulent migration of finely dispersed phase. Example of calculation of hydrocyclone is represented

**Key words:** separation efficiency, turbulent migration, transfer coefficients, calculation of hydrocyclone.