

УДК 66.048.37

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАСАДОЧНЫХ ГАЗОСЕПАРАТОРОВ КАПЕЛЬНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ С УЧЕТОМ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПРОФИЛЯ СКОРОСТИ ГАЗА

© 2021 г. А. Г. Лаптев<sup>а</sup>, \*, Е. А. Лаптева<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

\*e-mail: Tvt\_kgeu@mail.ru

Поступила в редакцию 06.07.2020 г.

После доработки 19.10.2020 г.

Принята к публикации 20.11.2020 г.

Рассмотрен процесс турбулентной миграции жидких аэрозольных частиц в хаотичном насадочном слое газосепаратора. Записаны дифференциальные уравнения массопереноса частиц в плоскопараллельном и цилиндрическом каналах, а также в аппарате с хаотичным насадочным слоем. Неравномерность профиля скорости газа на входе в слой и далее в слое насадки учитывается локальным объемным источником массы осаждающихся частиц на поверхность за счет турбулентно-инерционного механизма, а также коэффициентом турбулентной диффузии частиц. Даны выражения для расчета параметров источника массы, связанные с динамической скоростью на поверхности насадочных тел. Представлены результаты численного решения уравнения массопереноса частиц при равномерном и неравномерном профиле скорости газа на входе. Установлено, что неравномерность снижает эффективность сепарации частиц, что необходимо учитывать в расчетах при проектировании аппаратов. Сделаны выводы о наиболее эффективных конструкциях насадок.

*Ключевые слова:* сепарация, аэрозоль, хаотичные насадки, эффективность разделения

**DOI:** 10.31857/S0040357121020068

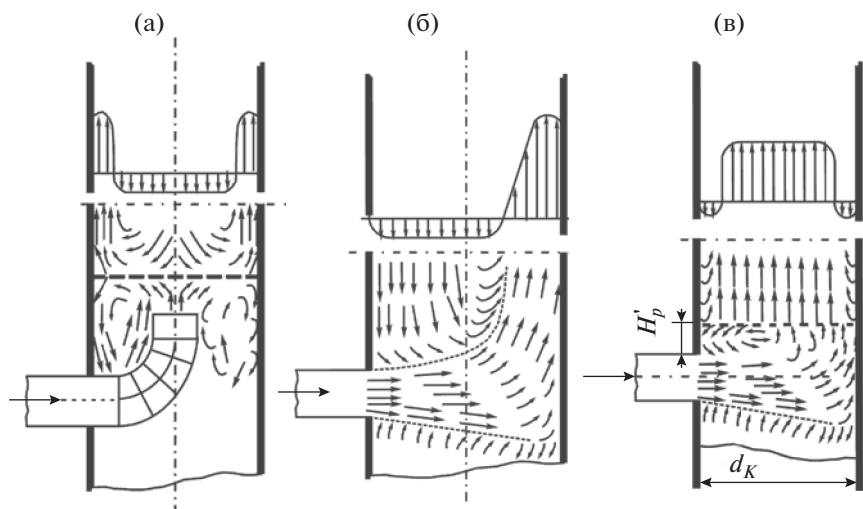
### ВВЕДЕНИЕ

Эффективность теплообменных и сепарационных аппаратов промышленных размеров существенно зависит от однородности распределения фаз в рабочем объеме (в насадке, на тарелке и других контактных устройствах). При равномерных профилях скоростей фаз достигается максимальная эффективность процессов при заданных режимных и конструктивных параметрах работы аппаратов. Известные методы расчета эффективности сепарации капельных аэрозолей основаны на модели идеального вытеснения [1, 2], что справедливо для каналов без внутренних интенсификаторов (шероховатостей, выступов, насадок и т.д.). При применении интенсификаторов эффективность сепарации повышается в несколько раз, однако структура потока отличается от идеального вытеснения, что необходимо учитывать при составлении математической модели процесса разделения. Кроме того, неравномерности профиля скорости газа в контактных устройствах зависят от условий подачи газа в аппарат. На рис. 1 в качестве примера приводятся профили скорости при различных условиях подачи газа в аппарат [3].

Следовательно, неоднородности распределения фаз связаны с входными неравномерностями, с

дефектами конструкции и монтажа контактных устройств, а также с внутренними закономерностями движения двухфазных потоков. Особенно неоднородности усиливаются при увеличении размеров аппаратов, что получило название “масштабных эффектов” [4]. Отсюда следует проблема масштабного перехода от лабораторных установок и стендов небольшого размера к аппарату промышленного размера [4–6]. При масштабном переходе эффективность может снижаться в несколько раз, т.е. работа аппарата не будет соответствовать технологическим требованиям на разделение смесей.

Согласно известным исследованиям, распределение газа по сечению и высоте насадочной колонны имеет сложный характер и зависит от многих факторов [4, 7, 8]. Профили скорости газа (без орошения), полученные разными авторами в хаотичном слое (в основном цилиндры, таблетки и шары), представлены в работе [7]. Так, при  $D_k/d_3 \approx 16$  ширина области повышенных скоростей составляет от (0.4–1.0)  $r/R$ , причем данные различных авторов часто противоречивы: некоторые отмечают повышенную скорость у стенки колонны, а другие – в центре. При увеличении  $D_k/d_3$  от 40 до 100 происходит некоторое уменьшение отношения



**Рис. 1.** Схемы растекания узкой струи в рабочей камере аппарата: (а), (в) – с центральным распределением потока; (б) – распределение потока за плоской решеткой в аппарате  $H_p^1 = 0.15$ .

максимальной и минимальной скоростей газового потока [7]. Показано, что в насадке с кольцами Рашига [8] неравномерности могут находиться от  $W_m/W_0 = 0.4$  (в центре аппарата) до  $W_m/W_0 = 1.6$  (у стенок аппарата).

Цель настоящей работы – представить приближенную математическую модель разделения капельных аэрозолей в газосепараторе с хаотичной насадкой с учетом неравномерности потока газа в слое, а также рассмотреть технические решения по снижению неоднородного распределения фаз и повышению эффективности сепарации.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЕПАРАЦИИ

Сепараторы с насадками имеют простую конструкцию и применяются в различных процессах химической технологии, когда в обрабатываемых газах нет твердой фазы из-за отложения на поверхности элементов.

Рассматривается турбулентный режим движения газа с жидкими аэрозольными частицами в слое хаотичной насадки, который, как известно, начинается при  $Re_s > 15-40$ .

При теоретическом анализе всех форм движения аэрозольных частиц в турбулентном потоке газа принимаются следующие предположения и допущения [1].

1. Диаметр частиц  $d_q$  мал по сравнению с масштабом несущих их пульсационных молей  $l$ :  $d_q \ll l$ . Тогда частица совершает движение, оставаясь в пределах исходного пульсационного моля. Этому условию удовлетворяют следующие частицы: высокодисперсные ( $d_q < 0.5-1$  мкм); тонко-

дисперсные ( $0.5-1 < d_q < 10-20$  мкм) и грубодисперсные ( $10-20 < d_q < 100-200$  мкм).

2. Частицы по форме близки к сферическим. При сильном отклонении от сферической формы вводится коэффициент формы, а в случае полидисперсности частиц аэрозоль рассматривается пофракционно.

3. Частицы при небольших концентрациях на входе в аппарат ( $C < 0.2$  кг/м<sup>3</sup>) не стесняют движение друг друга, не коагулируют друг с другом и не оказывают заметного влияния на турбулентные характеристики среды.

Далее в статье применяется теория турбулентной миграции частиц в газах, подробно рассмотренная в монографиях [1, 2, 9].

Частица аэрозолей в стационарном режиме движения газа приобретает поступательную скорость, равную осредненной скорости среды. Зависимость степени увлечения частицы  $\mu_p$  турбулентными пульсациями среды от индекса инерционности  $\omega_E \tau_p$ : при полном увлечении частиц турбулентными пульсациями среды  $\mu_p = 1$  и  $\omega_E \tau_p \ll 1$ ; формула для квадрата осредненной степени увлечения частиц имеет вид  $\bar{\mu}_p^2 = (1 + \omega_E \tau_p)^{-1}$ .

Перемещаясь с газом в канале аэрозольные частицы достигают пристенной области, касаются стенки и осаждаются на ней. Предполагается, что поверхность стенки удерживает частицы, т.е. является поглощающей. При осаждении на стенку канала частиц в виде капель жидкости на стенке будет образовываться пленка, которая под действием силы тяжести стекает в низ канала. Мерой

интенсивности осаждения из турбулентного потока газа на стенках является скорость турбулентного осаждения частиц  $u_t = j/\bar{C}$ , м/с [1]. Фактически скорость  $u_t$  является аналогом коэффициента массоотдачи в теории массопередачи и характеризует скорость турбулентно-инерционного переноса частиц к стенке канала. В теоретических исследованиях и расчетах аппаратов используется безразмерный эквивалент скорости осаждения  $u_t^+ = u_t/u_*$  [1].

Для расчета  $u_t^+$  наибольшее применение получила формула Е.П. Медникова, обобщающая большое количество экспериментальных исследований различных авторов [1]:

при  $\bar{\mu}_p^2 \tau^+ \leq 16.6$

$$u_t^+ = 7.25 \times 10^{-4} \left( \frac{\tau^+}{1 + \omega_E \tau_p} \right)^2, \quad (1)$$

при  $\bar{\mu}_p^2 \tau^+ > 16.6$

$$u_t^+ = 0.2. \quad (2)$$

В приведенных выражениях не учитывается гравитационный и продольно-диффузионный механизмы переноса ввиду их относительной малости.

Для расчета среднего значения динамической скорости на поверхности хаотичной насадки используем формулу, полученную с применением средней объемной скорости диссипации энергии [9]:

$$u_* = 1.55 W_r (\xi / Re_3)^{0.25}, \quad (3)$$

где коэффициент  $\xi$  находится экспериментально для каждой насадки.

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗДЕЛЕНИЯ СМЕСИ

Для определения эффективности газосепарации аэрозолей можно использовать численное решение уравнения конвективного массопереноса частиц, которое для вертикального плоскопараллельного канала без насадки запишется в виде [1]

$$W_r(y) \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left[ D_d(y) \frac{\partial C}{\partial y} \right] - [Cu_t(y)] \right\}. \quad (4)$$

Для цилиндрического канала

$$W_r(r) \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \left[ r D_d(r) \frac{\partial C}{\partial r} \right] - [Cu_t(r)] \right\}. \quad (5)$$

Как отмечено в монографии [1], отсутствие в правой части представленных уравнений  $[Cu_t(y)]$  или  $[Cu_t(r)]$  приводит к равномерному распределению частиц по поперечному сечению канала,

что не согласуется с экспериментальными данными.

Решение уравнений (4) или (5) для вертикальных гладких каналов при  $H \gg d_3$  при равномерном профиле скорости на входе  $W_r(y)$  или  $W_r(r)$  дает результаты, близкие к модели идеального вытеснения газа [1, 2, 9].

В газосепараторах с контактными хаотичными насадками структура потока отличается от модели идеального вытеснения. Кроме того, численное решение уравнения массопереноса (5), записанного для цилиндрической части газосепаратора с насадками, не представляется возможным, так как задать граничные условия на каждом элементе насадки (элементов может быть несколько тысяч) затруднительно. В таких случаях в уравнение массопереноса в правую часть вводят объемный источник массы частиц, осаждающихся на поверхность насадки. При равномерной подаче газа в аппарат объемный источник записывается для всего слоя насадки [9, 10], а при наличии неравномерностей – по локальному объему. Аналогичный подход применяется при численном исследовании пленочных градилен [11] и абсорбиров с насадкой [12].

Тогда уравнение массопереноса частиц представляется в следующем виде:

$$W_r(r) \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r D_d(r) \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \bar{u}_t C(z, r) a_v(r), \quad (6)$$

где  $\bar{u}_t(z, r)$  вычисляется по формуле (1) или (2) с параметрами  $\omega_E u_*$ , которые при неравномерном профиле скорости  $W_r(r)$  вычисляются в каждой локальной области (объеме слоя).

Коэффициент турбулентной диффузии частиц в ядре потока газа в хаотичной насадке найдем из соотношения [1]

$$D_d = \frac{D_T}{1 + \omega_E \tau_p}, \quad (7)$$

где  $D_T$  – коэффициент турбулентной диффузии, который принимается  $D_T \approx v_T$ , где  $v_T$  – коэффициент турбулентной вязкости, который вычисляется по выражению для хаотичной насадки [9]

$$v_T(r) \approx 3.87 v_r \sqrt{\xi(r) Re_3(r)}. \quad (8)$$

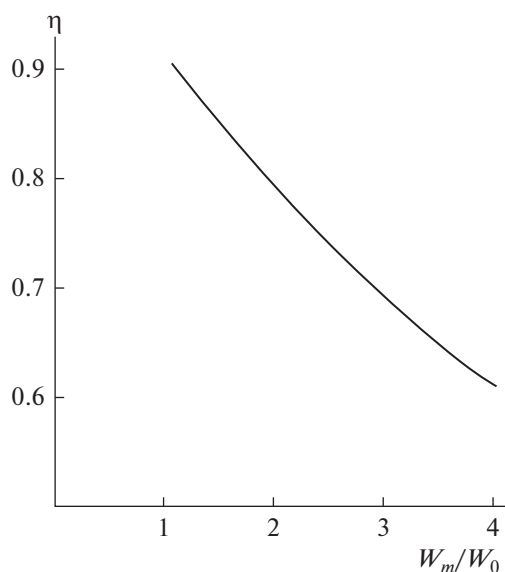
К уравнению массопереноса (6) записываются следующие граничные условия:

при  $z = 0$ ,  $u_t(r) = u_H(r)$  (вход газа);

при  $z = H$ ,  $\partial C / \partial z = 0$  (выход газа);

при  $r = R$ ,  $\partial C / \partial r = 0$  (на стенке аппарата).

Конструктивные и режимные характеристики хаотичной насадки учитываются за счет объемного источника в правой части уравнения (6) и коэффициента турбулентной диффузии частиц (7).



**Рис. 2.** Зависимость осредненной эффективности газосепарации капель воды диаметром 5 мкм от неравномерности профиля скорости газа в поперечном сечении слоя насадки из колец Рашига 10 мм. Средняя скорость газа  $W_0 = 6$  м/с.

Далее в качестве примера показано влияние профиля скорости газа  $W_r(r)$  в поперечном сечении колонны на профили концентрации частиц и эффективность разделения смеси.

Точно описать профиль скорости в слое не представляется возможным, так как это связано с большим разнообразием конструкций хаотичных насадок, режимов работы и физическими свойствами смесей. Если распределение перепада давления по сечению насадки известно, то можно использовать приближенную связь профиля скорости газа и гидравлического сопротивления отдельных областей насадки. Это соотношение имеет следующий вид:

$$\frac{W_{ri}}{W_{ri+1}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{i+1}}{\Delta P_i}}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (9)$$

Таким образом, чем больше гидравлическое сопротивление области  $i + 1$ , тем меньше там скорость газа. Число областей можно выбирать по заданному относительному изменению перепада давления в соседних зонах, например на 5%.

Представленное выражение следует решать совместно с уравнением расхода газа

$$S_k W_0 = \sum_{i=1}^n S_i W_{ri}, \quad (10)$$

где  $S_k W_0 = V_r$  — объемный расход газа, м<sup>3</sup>/с.

При совместном решении (9), (10) должен выполняться баланс энергии газового потока в насадочном аппарате

$$V_r \Delta P_r = \sum_{i=1}^n V_i \Delta P_i. \quad (11)$$

Перепад давления записывается по известному выражению

$$\Delta P_r = \xi \frac{H \rho_r W_r^2}{d_3}; \quad \Delta P_i = \xi(r) \frac{H \rho_r W_r^2(r)}{d_3}; \quad (12)$$

где  $\xi(r)$  вычисляется для каждой  $i$ -й области,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Расчеты профилей концентраций частиц в хаотичном слое выполнялись на основе применения уравнения массопереноса (6) с экспериментальным неравномерным профилем скорости газа  $W_r(r)$ , а также коэффициентом турбулентной диффузии частиц  $D_d(r)$  (7) и скорости турбулентной миграции частиц  $\bar{u}_t$  в каждой локальной в зависимости динамической скорости  $u_*$  (3) от скорости газа, которая связана со скоростью газа  $W_r(r)$  и с коэффициентом гидравлического сопротивления области  $\xi(r)$ .

Результаты исследования неравномерности профиля газа в слое насадки из различных хаотичных элементов представлены в работах [7, 8], где показано, что неравномерности могут находиться в диапазоне от  $W_m/W_0 = 0.4$  (в центре аппарата) до  $W_m/W_0 = 1.6$  (у стенок аппарата).

Далее в качестве наиболее характерного примера рассмотрена насадка из колец Рашига, которая широко применялась в аппаратах во второй половине прошлого столетия. Из решения уравнения массопереноса (6) получен профиль концентрации частиц в зависимости  $W_r(r)$  и вычислена локальная и осредненная эффективность газосепарации по формулам

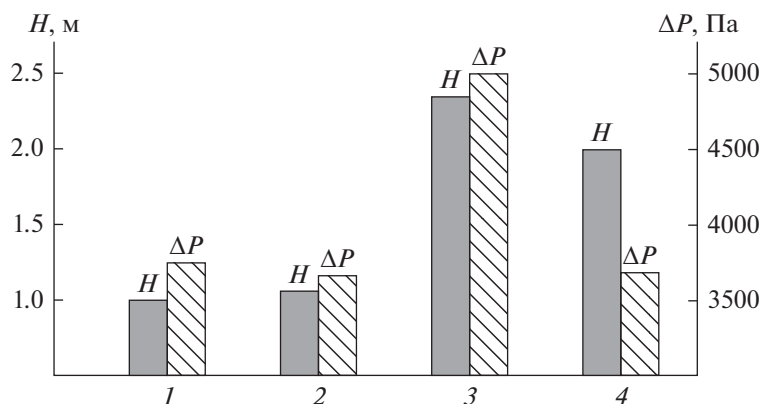
$$\eta_i = \frac{\eta_{i-1} - \eta_i}{\eta_{i-1}}, \quad \eta = \frac{C_n - C_k}{C_n}, \quad (13)$$

где

$$C_k = \frac{\sum_{i=1}^n C_i V_{ri}}{V_r}. \quad (14)$$

Результаты расчетов  $\eta$  приведены на рис. 2.

Установлено, что поперечная неравномерность профиля скорости газа может снижать эффективность разделения на 30–35% по сравнению с равномерным профилем скорости, т.е. при  $W_m/W_0 = 1$ . Наибольшие неоднородности наблю-



**Рис. 3.** Высота насадки и перепад давления: 1 – кольца Мебиуса  $40 \times 40$ ; 2 – “Инжехим-2012”; 3 – кольца Рашига  $40 \times 40$ ; 4 – кольца GMR № 1 фирмы Mass Transfer Inc. Скорость газа 5 м/с.

даются у насадки из колец Рашига (снижение  $\eta$  на 35%). Наиболее эффективными являются насадки из колец Мебиуса и “Инжехим-2012” (снижение эффективности на 3–5%).

Выполнены расчеты высоты слоя насадки и перепада давления при заданной эффективности разделения  $\eta = 0.985$  аэрозолей для частиц  $d_q = 5$  мкм – система воздух–вода при нормальных условиях. Численно исследовались металлические хаотичные насадки из колец Мебиуса  $40 \times 40$  мм ( $a_v = 191$  м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>), “Инжехим-2012” ( $a_v = 160$  м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>), кольца Рашига  $35 \times 35$  мм ( $a_v = 150$  м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>) и кольца GMR № 1 фирмы Mass Transfer Inc ( $a_v = 220$  м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>) [8, 13, 14].

Из представленных на рис. 3 результатов следует, что наиболее рациональным является применение насадок из колец Мебиуса и “Инжехим-2012”.

На рис. 4 приведены расчетные зависимости требуемой высоты насадочного слоя при заданной эффективности  $\eta = 0.985$ , а также перепада давления газа для насадки “Инжехим-2012” (16 мм,  $a_v = 340$  м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>).

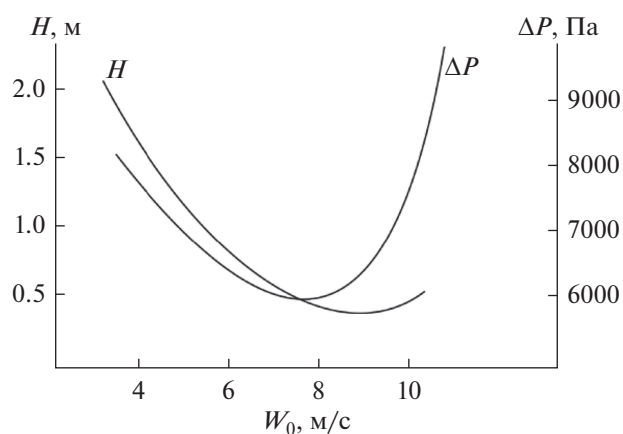
Сложные зависимости кривых на рис. 4 объясняются расчетами  $u_t = u_t^+ u_*$  по формуле (1) или (2) в зависимости от значений  $\bar{\mu}_p^2 \tau^+$ . При  $\bar{\mu}_p^2 \tau^+ \leq 16.6$  зависимость  $u_t$  от скорости газа примерно в четвертой степени. Тогда при заданной эффективности  $\eta$  при увеличении скорости газа требуемая высота насадки снижается, также понижается и перепад давления. При  $\bar{\mu}_p^2 \tau^+ \geq 16.6$  зависимость  $u_t$  от скорости газа примерно в первой степени, и тогда при увеличении скорости газа требуемая высота насадки повышается, что дает также повышение перепада давления.

Из расчетов следует, что в заданных условиях разделения оптимальной скоростью газа явля-

ется  $W_0 = 6–7$  м/с, обеспечивающая наименьшие энергозатраты при небольшой высоте слоя ( $H = 0.55–0.65$  м).

Таким образом, представленная математическая модель позволяет учесть неоднородности распределения насадки, а также газа с аэрозольными частицами и выбирать наиболее эффективные конструкции контактных устройств. Газосепараторы с насадками “Инжехим” внедрены на предприятиях нефтегазохимического комплекса и удовлетворяют требованиям технического задания [10, 15].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-79-101-36).



**Рис. 4.** Зависимость высоты насадки и перепада давления от скорости газа при эффективности газосепарации  $\eta = 0.985$  (98.5%) для капель диаметром  $d_q = 5$  мкм (система воздух–капли воды при нормальных условиях). Насадка “Инжехим-2012” размером 16 мм ( $a_v = 340$  м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>).

ОБОЗНАЧЕНИЯ			
$a_v$	удельная поверхность насадки, $\text{м}^2/\text{м}^3$	$W_m$	локальная скорость газа в зоне с насадкой, м/с
$C$	концентрация частиц, $\text{кг}/\text{м}^3$	$z, y$	вертикальная и поперечная координаты, м
$\bar{C}$	средняя по поперечному сечению концентрация частиц, $\text{кг}/\text{м}^3$	$\epsilon_{св}$	удельный свободный объем насадки, $\text{м}^3/\text{м}^3$
$C_n, C_k$	начальная и конечная концентрации аэрозольных частиц, $\text{кг}/\text{м}^3$	$\eta$	эффективность разделения аэрозолей
$D_k$	диаметр колонны, м	$\xi$	коэффициент гидравлического сопротивления насадочного слоя
$D_d$	коэффициент турбулентной диффузии частиц, $\text{м}^2/\text{с}$	$\rho_r$	плотность газа, $\text{кг}/\text{м}^3$
$D_T$	коэффициент турбулентной диффузии в потоке, $\text{м}^2/\text{с}$	$\rho_{ч}$	плотность частицы, $\text{кг}/\text{м}^3$
$d$	диаметр насадочного элемента слоя, м	$\tau_p$	время релаксации частиц, с
$d_{ч}$	диаметр частиц (капель), м	$\tau^+ = \tau_p u_*^2 / \nu_r$	безразмерное время релаксации
$d_э$	эквивалентный диаметр насадки (канала), м	$\omega_E = u_* / 0.1 R_э$	частота энергоемких низкочастотных пульсаций среды, $\text{с}^{-1}$
$F$	площадь стенок канала, $\text{м}^2$	$Re_э = W_r d_э / \nu_r$	число Рейнольдса для насадки
$G$	массовый расход газа, $\text{кг}/\text{с}$		
$H$	высота слоя насадки, м		
$j$	плотность потока частиц к стенке, $\text{кг}/(\text{м}^2 \text{с})$		
$N$	мощность, затрачиваемая на подачу газа в аппарат, Вт		
$n$	число областей в поперечном сечении аппарата		
$\Delta P_i$	перепад давления газа в $i$ -й области, Па		
$R$	радиус колонны, м		
$R_э$	эквивалентный радиус насадки (канала), м		
$r$	радиальная координата, м		
$S_k$	площадь поперечного сечения газосепаратора с насадкой, $\text{м}^2$		
$S_i$	площадь сечения аппарата $i$ -й области, $\text{м}^2$		
$u_t$	скорость турбулентного осаждения частиц, м/с		
$u_t^+ = u_t / u_*$	безразмерная скорость осаждения		
$u_*$	динамическая скорость, м/с		
$V_r$	объемный расход газа, $\text{м}^3/\text{с}$		
$\nu_r$	кинематический коэффициент вязкости газа, $\text{м}^2/\text{с}$		
$\nu_T$	коэффициент турбулентной вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$		
$W_0$	средняя скорость газа в аппарате без насадки, м/с		
$W_r$	средняя скорость газа в слое, м/с		

## ИНДЕКСЫ

г	газ
к	конечное значение
н	начальное значение
ст	стена
ч	частица
э	эквивалентный

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Наука, 1980.
2. Сугак Е.В., Войнов Н.А., Николаев Н.А. Очистка газовых выбросов в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами. Казань: Отечество, 2009.
3. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992.
4. Масштабный переход в химической технологии: разработка промышленных аппаратов методом гидродинамического моделирования / Под ред. Розена А.М. М.: Химия, 1980.
5. Костанян А.Е., Белова В.В. О масштабном переходе в химической технологии // Хим. технол. 2016. № 3. С. 118.
6. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Лаптева Е.А. Проблемы и решения масштабного перехода в химической технологии // Тр. Академэнерго. 2019. № 4. С. 33.
7. Пушинов А.С., Балтернас П., Каган А., Загорский А. Аэродинамика воздухоочистных устройств с зернистым слоем. Вильнюс: Техника, 2010.
8. Витковская Р.Ф., Пушинов А.С., Шинкунас С. Аэрогидродинамика и тепломассообмен насадочных аппаратов. СПб.: Лань, 2019.

9. Модели и эффективность процессов межфазного переноса. Часть 1. Гидромеханические процессы / Под ред. Лаптева А.Г.: Казань: Центр инновационных технологий, 2017.
10. Ageev A.A., Yakhontov D.A., Kadyrov T.F., Farakhov M.M., Lapteva E.A. Mathematical model of dispersed phase gas separation in a combined equipment // Chem. Pet. Eng. 2019. V. 55. № 7–8. P. 611.
11. Lapteva E.A., Stolyarova E.Yu., Laptev A.G. Numerical Estimation of the Heat and Mass Transfer Efficiency Considering Nonuniformity in Water and Air Distribution // Therm. Eng. 2020. V. 67. № 4. P. 234.
12. Laptev A.G., Farakhov T.M. Mathematical Model of Mass Transfer in Randomly Packed Columns with Phase Maldistribution // J. Eng. Thermophys. 2019. V. 28. № 3. P. 392.
13. Насадки массообменных колонн / Под ред. Баранова Д.А. М., 2009.
14. Каган А.М., Лаптев А.Г., Пушинов А.С., Фарахов М.И. Контактные насадки промышленных теплообменных аппаратов. Казань: Отечество, 2013.
15. Ageev A.L., Yakhontov D.A., Kadyrov T.F., Farakhov M.M., Farakhov M.I. Расчет и внедрение высокоэффективных сепарационных аппаратов очистки природного газа от дисперсной фазы // Газов. промышленность. 2020. № 1. С. 30.