

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
КАЗАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ
ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ,
ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
И ЭКОЛОГИЯ

VII Всероссийская студенческая
научно-техническая конференция

28–30 мая 2024 г.
г. Казань

УДК 621.1-049.5(082)
ББК 31.31я43
И73

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук А. В. Бурмистров
д-р техн. наук А. В. Клинов
д-р техн. наук С. И. Поникаров
канд. техн. наук Л. Р. Минибаева
канд. техн. наук А. Р. Хайруллина

И73 Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология: VII Всероссийская студенческая научно-практическая конференция, г. Казань (28–30 мая 2024 г.): материалы конференции; под ред. А. В. Бурмистрова [и др.]; Минобрнауки России; Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань: ООО «Конверс», 2024. – 744 с.

ISBN 978-5-6051208-3-4

В сборнике представлены материалы VII Всероссийской студенческой научно-технической конференции «Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология», проведённой 28–30 мая 2024 года в Казанском национальном исследовательском технологическом университете.

Предназначены для студентов и аспирантов технических специальностей при проведении практических занятий в качестве вспомогательного материала.

Все материалы представлены в авторской редакции.

УДК 621.1-049.5(082)
ББК 31.31я43

© Казанский национальный исследовательский технологический университет., 2024
© Составление. Оформление.
ИП Шайхутдинов А.А., 2024

УДК 66.074.51.069.833

**МЕТОД РАСЧЕТА СЕПАРАЦИИ АЭРОЗОЛЬНЫХ СИСТЕМ В
НАСАДОЧНЫХ СКРУББЕРАХ**

Лантев Анатолий Григорьевич, Лантева Елена Анатольевна, Ключкова

Валентина Александровна, Аласгарли Сеймур Ульви Оглы

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

E-mail: tvt_kgeu@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Представлена математическая модель турбулентной сепарации аэрозольных частиц на поверхность нерегулярных контактных устройств (хаотичных насадок) при сухом и мокром разделении газовых смесей. Даны результаты расчетов эффективности сепарации в скрубберах с пяти типами хаотичных насадок. Сделаны выводы о наиболее рациональных конструкциях.

Ключевые слова: аэрозоль, насадочные скрубберы, математическая модель.

Разделение неоднородных газовых сред актуально в различных отраслях промышленности и энергетике. Аэрозольные системы составляют значительную часть гетерогенных сред в технологических циклах промышленных предприятий химии, нефтехимии и нефтегазопереработки, а также газовых выбросов в энергетике. Разделение аэрозольных систем затруднительно для частиц с размерами менее 10-20 мкм и больших расходах газовых смесей. Для жидких аэрозольных систем можно применять скрубберы с различными контактными устройствами – нерегулярными и регулярными насадками.

Целью данной работы является представление упрощенной математической модели турбулентного переноса и осаждения частиц на поверхность насадки и сравнительные сепарационные и энергетические характеристики скрубберов с отечественными и зарубежными хаотичными элементами без орошения и с орошением жидкостью.

При высоких скоростях газа в насадочном слое (более 1-2 м/с) механизм переноса и осаждения частиц (капель) турбулентно-инерционный, где основным

параметром в математической модели является коэффициент скорости турбулентной миграции u_t , м/с. Известны различные эмпирические зависимости для расчета коэффициента u_t , которые связаны с безразмерной скоростью релаксации частиц $u_t^+ = f(\tau^+)^2$, где $u_t^+ = u_t / u_*$ – безмерная скорость турбулентной миграции; u_* – динамическая скорость, м/с; τ^+ – безразмерное время релаксации [1]. При известном значении u_t можно использовать метод единиц переноса в математических моделях структуры потоков. Наиболее простой моделью является ячеечная, которая однако дает достоверные результаты расчета эффективности сепарации [2]:

$$\eta = \frac{C_n - C_k}{C_n} = 1 - \left(1 + \frac{N_y}{n}\right)^{-n}, \quad (1)$$

где C_n , C_k – начальная и конечная концентрация частиц; n – число ячеек полного перемешивания газового потока в направлении движения; $N_y = u_t F / V_\Gamma$ – число единиц переноса частиц; F – поверхность осаждения, м²; V_Γ – объемный расход газовой среды, м³/с. Поверхность осаждения в насадке $F = a_v S H$, м²; a_v – удельная поверхность насадки, м²/м³; S – площадь поперечного сечения скруббера, м²; H – высота слоя насадки, м.

Число ячеек полного перемешивания в газовой фазе связано с модифицированным числом Пекле Pe структуры потока. Для хаотичной насадки ($Re_\Gamma > 40$) [2].

$$Pe = 0,52H(Re_\Gamma / \xi)^{0,25} / d_s, \quad (2)$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления насадки; Re_Γ – число Рейнольдса для насадки. При $Pe > 10$, число ячеек $n \approx Pe / 2$.

Далее рассматривается прямоточный насадочный скруббер с хаотичной насадкой как без орошения жидкой фазой, так и с орошением (рис.1).

Газовая фаза (аэрозольная система) подается в верхнюю часть и движется в режиме прямотока в низ. В нижней части укрепленные капли аэрозоля за счет инерции и силы тяжести осаждаются на дно аппарата и выводятся через нижний штуцер.

Очищенный газовый поток на выходе из насадки меняют направление своего движения на 180° и далее двигаясь по кольцевому цилиндрическому каналу удаляется через боковой штуцер. В качестве примера первоначально выполнены расчеты при скорости газа 3 м/с различных типов насадок [3,4] ($H=1,0$ м) при разделении мельчайших капель воды (5 мкм) из воздушного потока без орошения жидкой фазой. Результаты расчетов даны в таблице 1.

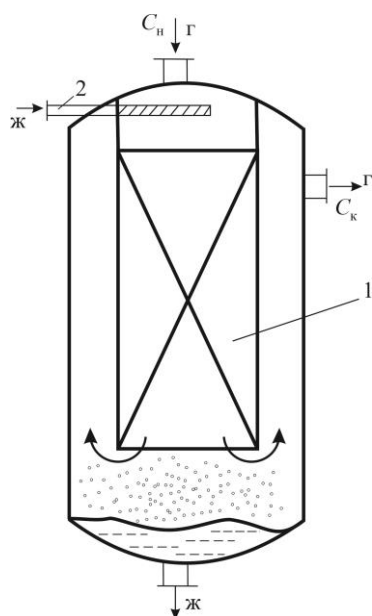


Рисунок 1. Прямоточный насадочный скруббер:
1 – насадочный слой; 2 – ороситель жидкости.

Таблица 1

Результаты расчета эффективности сепарации частиц 5 мкм

($\rho_{ч} = 10^3$ кг/м³) из воздуха в сухой насадке при скорости $w_T = 3$ м/с.

	Насадка	$a_v, \text{м}^2/\text{м}^3$	τ^+	$\eta, \%$	$\Delta P, \text{Па/м}$
1	Кольца Мебиуса 40 мм	191	3,07	42,3	1218
2	Кольца GMR№1	250	2,5	34,2	886
3	Кольца Рашига 15 мм	330	4,64	88,6	4900
4	Инжехим 2012, 8 мм	650	4,7	99,1	2960
5	ГИАП-Н2	673	4,55	95,2	3500

В таблице 2 представлены результаты расчетов эффективности сепарации при орошении различных насадок ($H=1,0$ м).

Таблица 2

Результаты расчета эффективности сепарации частиц 5 мкм

($\rho_{ч} = 10^3$ кг/м³) в воздухе для различных орошаемых насадок

	Насадка	$a_v,$ м ² /м ³	$w_T,$ м/с.	$q_{ж},$ м ³ /(м ² ч)	τ^+	$\eta, \%$	$\Delta P,$ Па/м
1	Кольца Мебиуса 40 мм	191	3,0	20,0	7,13	95,7	5000
2	Кольца GMR №1	250	3,0	20,0	5,19	93,8	1500
3	Кольца Рашига 15 мм	330	1,2	5,0	3,24	89,1	3000
4	Кольца Рашига 15 мм	330	1,0	20,0	2,93	87,2	3000
5	Инжехим 2012, 8 мм	650	1,7	15,0	3,55	96,0	2600

В результате расчетов установлено, что в насадках без орошения водой наиболее эффективными является № 3 – № 5, причем насадка № 3 и № 4 имеют небольшой перепад давления. При орошении насадок водой (плотность орошения $q_{ж}$ 5,0 до 20,0 м³/(м²ч)) эффективность сепарации значительно повышается. Наиболее эффективными при небольшом гидравлическом сопротивлении являются насадки № 2 и № 5. Результаты работы могут применяться при проектировании или модернизации промышленных скрубберов очистки газов от жидких аэрозольных частиц.

Литература

1. Медников, Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей: монография / Е. П. Медников. – Москва : Наука, 1980. – 176 с.
2. Лаптев А. Г. Математические модели и методы расчетов тепломассообменных и сепарационных процессов в двухфазных средах : монография / А. Г. Лаптев, М. М. Башаров, Е. А. Лаптева – Казань : КГЭУ; Старый Оскол : ТНТ, 2021. – 288 с.
3. Сокол, Б. А. Насадки массообменных колонн : монография / Б. А. Сокол, А. К. Чернышев, Д. А. Баранов. – Москва : Галилея-принт, 2009. – 358 с.
4. Контактные насадки промышленных тепломассообменных аппаратов: монография А. М. Каган, А. Г. Лаптев, А. С. Пушнов, М. И. Фарахов / под ред. А. Г. Лаптева. – Казань: Отечество, 2013. – 454 с.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10406, <https://rscf.ru/project/21-79-10406/>.