



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УЧРЕЖДЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКАЯ РЕСПУБЛИКАНСКАЯ МАЛАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УЧАЩЕЙСЯ МОЛОДЕЖИ»
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКЕ И ПРИРОДНЫМ РЕСУРСАМ
ПРИ ГЛАВЕ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ



СЕРТИФИКАТ

УЧАСТНИК

Всероссийской научной конференции (с международным участием)
аспирантов и обучающихся

«Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов»

Клочкова Валентина Александровна

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Доклад на тему: РАЗДЕЛЕНИЕ АЭРОЗОЛЕЙ В ПРЯМОТОЧНОМ АППАРАТЕ (СКРУББЕРЕ) С ХАОТИЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Научный руководитель: профессор А.Г. Лаптев

17-18
апреля 2024

г. Донецк

Председатель оргкомитета,
проректор ФГБОУ ВО «ДонНТУ»,
профессор, докт. техн. наук



С.В. Борщевский

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
УЧРЕЖДЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКАЯ РЕСПУБЛИКАНСКАЯ МАЛАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
УЧАЩЕЙСЯ МОЛОДЕЖИ»
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ
ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКЕ И ПРИРОДНЫМ РЕСУРСАМ
ПРИ ГЛАВЕ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ**



*Посвящается
Всемирному Дню окружающей среды*

**ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
И РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ**

**СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ (С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ)
АСПИРАНТОВ И ОБУЧАЮЩИХСЯ
(Донецк, 17-18 апреля 2024 года)**

Донецк
ФГБОУВО «ДонНТУ»
2024

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
И РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 330.15
О 92

Редакционная коллегия:

докт. техн. наук С.В. Борщевский (ответственный редактор) (ДонНТУ);
докт. сельхоз. наук В.Ф. Зайцев (АГТУ, г.Астрахань, РФ);
докт. хим. наук Е.С. Климов (УГТУ, г.Ульяновск, РФ);
канд. тех. наук С.В. Горбатко (ответственный секретарь) (ДонНТУ);
канд. биол. наук А.И. Сафонов (ДонГУ);
канд. биол. наук Е.В. Прокопенко (ДонГУ);
канд. биол. наук А.Д. Штирц (ДонГУ);
В.А. Зубков (ДонМАН);
канд. хим. наук Е.А. Трошина (ДонНТУ);
канд. хим. наук Ю.Н. Ганнова (ДонНТУ);
канд. тех. наук И.Г. Дедовец (ДонНТУ);
канд. хим. наук Е.И. Волкова (ДонНТУ).

Секретари:

ст. препод. А.А. Берестовая (ДонНТУ);
асс. Ю.С. Калинина (ДонГУ).

Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: сборник материалов Всероссийской научной конференции (с международным участием) аспирантов и обучающихся / ДонНТУ, ДонГУ. –
092 Донецк: ФГБОУВО «ДОННТУ», 2024. –
417 с.

В сборнике приведены материалы Всероссийской научной конференции (с международным участием) аспирантов и обучающихся «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов», в которых обобщаются итоги научно-технического творчества обучающихся и аспирантов по экологической тематике за последние годы.

В сборнике рассмотрены актуальные вопросы обезвреживания газовых выбросов; рекуперации промышленных отходов; очистки сточных вод; современного оборудования экологически чистых технологий и защиты биосферы; оценки и мониторинга состояния окружающей среды; фитооптимизации техногенной среды и охраны растительного мира; фауны, экологии и охраны животного мира; экологической и техносферной безопасности; рационального использования природных ресурсов.

Авторы работ несут ответственность за достоверность результатов исследований и качество текста докладов.

Публикуется по решению Ученого совета ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» №3 от 26.04.2024 г.

УДК 330.15
О 92
© ФГБОУВО «ДонНТУ», 2024

**РАЗДЕЛЕНИЕ АЭРОЗОЛЕЙ В ПРЯМОТОЧНОМ АППАРАТЕ
(СКРУББЕРЕ) С ХАОТИЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

А. Г. Лаптев, В. А. Ключкова

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Рассмотрена математическая модель турбулентного переноса аэрозольных частиц на поверхность нерегулярных контактных устройств (хаотичных насадок) при прямотоке с жидкой фазой. Даны результаты расчетов эффективности сепарации в скрубберах с пяти типами хаотичных насадок. По наиболее рациональным конструкциям сделаны выводы.

Ключевые слова: АЭРОЗОЛЬ, НАСАДОЧНЫЕ СКРУББЕРЫ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

A mathematical model of the turbulent transfer of aerosol particles to the surface of irregular contact devices (chaotic nozzles) during co-current flow with the liquid phase is considered. The results of calculations of separation efficiency in scrubbers with five types of random packings are given. Conclusions have been drawn based on the most rational designs

Key words: AEROSOL, PACKED SCRUBBERS, MATHEMATICAL MODEL

Разделение неоднородных газовых сред актуально при решении экологических задач 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. Эффективным методом очистки газов от дисперсной фазы является «мокрое» разделение при прямотоке с жидкой фазой по насадке.

Целью данной работы является представление упрощенной математической модели турбулентного переноса и осаждения частиц на поверхность хаотичной насадки и сравнительные сепарационные и энергетические характеристики скрубберов с отечественными и зарубежными хаотичными элементами при турбулентном прямотоке с жидкой фазой.

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

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
И РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

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]:

$$\eta = \frac{C_H - C_K}{C_H} = 1 - \left(1 + \frac{N_q}{n}\right)^{-n}, \quad (1)$$

где C_H , C_K – начальная и конечная концентрация частиц; n – число ячеек полного перемешивания газового потока в направлении движения; $N_q = u_t F / V_T$ – число единиц переноса частиц; F – поверхность осаждения, м²; V_T – 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 ($Re_T > 40$) [2]

$$Pe = 0,52 H (Re_T / \xi)^{0,25} / d_p, \quad (2)$$

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

Далее рассматривается прямоточный насадочный скруббер с хаотичной насадкой с орошением жидкостью (рис.1).

Газовая фаза (аэрозольная система) подается в верхнюю часть и движется в режиме прямотока в низ. В нижней части укрупненные частицы аэрозоля за счет инерции и силы тяжести осаждаются на дно аппарата и выводятся с жидкостью 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 таблице 1 представлены результаты расчета эффективности сепарации мелких частиц (5 мкм) с плотностью 1000 кг/м³ из воздушного потока. Режим работы различных насадок [3,4] выбран близким к точке подвисяния при противотоке. Такой режим наиболее эффективный, тем более при прямотоке газ способствует транспорту жидкой фазы и подвисяние не происходит.

В таблице: w_T – скорость газа в слое насадки, м/с; $q_{ж}$ – плотность орошения жидкостью; ΔP – удельный перепад давления, Па/м. Остальные обозначения в тексте.

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

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
И РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

работы могут применяться при проектировании или модернизации промышленных скрубберов очистки газов от аэрозольных частиц.

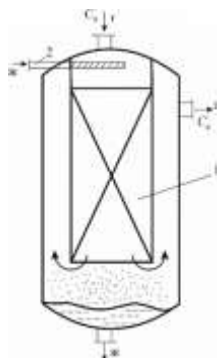


Рисунок 1. Прямоточный насадочный скруббер:
1 – насадочный слой; 2 – ороситель жидкости

Таблица 1 - Результаты расчета эффективности сепарации частиц 5 мкм в воздухе для различных орошаемых насадок

№ п/п	Насадка	a_v , м ² /м ³	w_r , м/с.	$q_{ж}$, м ³ /(м ² ч)	τ^+	η , %	ΔP , 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

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

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.