

ЭНЕРГЕТИКА



УДК 541.182.2/3

ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГОСЕПАРАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОСЕПАРАТОРОВ КАПЕЛЬНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

А.Г. Лаптев¹, М.М. Башаров², Е.А. Лаптева¹

¹Казанский государственный энергетический университет г. Казань, Россия

²АО "ТАНЕКО" г. Нижнекамск

tvt_kgeu@mail.ru

Резюме: Рассмотрены энергетические коэффициенты и критерии энергоэффективности тепло- и массообменных аппаратов. С применением этих коэффициентов и критериев получены модифицированные комплексы энергосепарационной эффективности насадочных газосепараторов жидких аэрозолей. Приведены технические характеристики регулярных и хаотичных насадок и сделаны расчеты энергетических комплексов и мощности на подачу газа на очистку. Установлено, что среди нерегулярных насадок наиболее эффективной является спирально-призматическая, а среди регулярных – рулонная РГН-5 (Инжехим).

Ключевые слова: аэрозоли, насадки, энергоэффективность, сепарация, энергозатраты.

Благодарности: Исследование выполнено в рамках научного проекта РНФ № 18-79-10136.

DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-3-9.

Для цитирования: Лаптев А.Г., Башаров М.М., Лаптева Е.А. Показатели энергосепарационной эффективности газосепараторов капельных аэрозолей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 1-2. С. 3-9. DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-3-9.

INDICATORS OF ENERGY AND SEPARATION EFFICIENCY OF GAS SEPARATORS INTENDED TO REMOVE AEROSOL DROPLETS

A.G. Laptev¹, M.M. Basharov², E.A. Lapteva¹

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²JSC "TANECO", Nizhnekamsk, Russia

Abstract: Abstract: Energy coefficients and energy efficiency criteria for heat and mass transfer devices are considered. With application of these coefficients and criteria, modified complexes for the energy separation efficiency of packed-type gas separators aimed to remove liquid aerosols are obtained. Technical characteristics of structured and random packings are given and calculations of energy complexes and of the power required for supplying gas to the purification are made. It is determined that the spiral-prismatic packing is most efficient among all considered

random packings and the spiral wound packing RGN-5 (manufactured by LLC EPC "Inzhekhim") is most efficient among all considered structured packings.

Keywords: aerosols, packings, energy efficiency, separation, energy expenditures.

Acknowledgments: The study was carried out by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 18-79-10136).

For citation: A.G. Laptev, M.M. Basharov, E.A. Lapteva. Indicators of energy and separation efficiency of gas separators intended to remove aerosol droplets. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS* 2019. vol. 21. № 1-2. pp.3-9. DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-3-9.

Введение

Известно, что при работе тепло- и массообменных аппаратов и энергетических установок часто наблюдается унос капельной влаги паром или газом. Эта влага попадает в паровой поток при дроблении жидкости в процессе барботажа, разрушении струй и разрыве оболочек паровых пузырей. В паровых котлах, испарителях, выпарных аппаратах брызгоунос приводит к загрязнению пара веществами, содержащимися в жидкой фазе (котловой воде, конденсате); в ректификационных и абсорбционных колоннах унос жидкой фазы уменьшает эффективность проводимых процессов. Например, к градиентам предъявляют требования максимально возможного снижения выноса капель с потоком охлаждающего воздуха. Сепарация, захватываемая паровым или газовым потоком капельной влаги, проводится либо непосредственно в верхней части аппаратов или в отдельных газосепараторах, которые встраиваются в технологические линии.

Основной задачей при выборе энергоэффективных конструкций газосепарирующих устройств для заданных условий проведения процесса, является достоверный расчет эффективности сепарации дисперсной фазы. Эффективность газоочистки (степень очистки) может быть определена по содержанию дисперсной фазы в газах (парах) до поступления в аппарат для разделения и на выходе из него по выражению:

$$\eta = \frac{G_n - G_k}{G_n} = \frac{V_n C_n - V_k C_k}{V_n C_n} = 1 - \frac{V_k C_k}{V_n C_n}, \quad (1)$$

где G – массовый расход дисперсной фазы (капель, пыли и т.п.), содержащейся в газах, кг/с; V – объемный расход газов, м³/с; C – концентрации частиц в газах, кг/м³. Нижние индексы "н" – начальные и "к" – конечные значения. Обычно для аппаратов принимается $V_n = V_k$.

Как известно, существуют гравитационный, градиентный, турбулентный, инерционный, центробежный и другие механизмы осаждения частиц. Работа большинства промышленных аппаратов основана на совмещении различных принципов осаждения. Соответственно эффективность сепарации зависит от различных параметров и факторов [1–3].

Коэффициенты энергосепарационной эффективности

Для предварительного выбора конструкций и режима работы газосепарирующих элементов, ниже рассмотрены различные комплексы.

По аналогии с выражением (энергетического коэффициента Кирпичева для теплообменника) для аппарата газоочистки можно записать:

$$E = \frac{M}{N} = \frac{G_n - G_k}{\Delta p V_T}, \quad (2)$$

где G_H , G_K – начальная и конечная концентрация частиц, кг/м³; Δp – перепад давления газа в аппарате, Па; V_r – объемный расход газа, м³/с; M – поток массы частиц, кг/с; N – мощность на подачу газа, Вт.

Из выражений (1) и (2) следует модифицированный энергетический параметр:

$$E = \frac{\eta C_H}{\Delta p}, \quad (3)$$

где концентрация на выходе $G_K = G_H (1-\eta)$.

Далее с применением критерия энергоэффективности химических реакторов [4] аналогично запишем для аппарата газоочистки от аэрозолей:

$$K_{эф} = \frac{M}{NV_{an}} = \frac{u_t F \Delta C}{NV_{an}}, \quad (4)$$

где $F/V_{an} = a_v$ – удельная поверхность осаждения частиц, м²; u_t – скорость турбулентного осаждения аэрозольных частиц, м/с; V_{an} – объем аппарата, м³.

Среднюю движущую силу переноса частиц запишем как среднеарифметическую $\overline{\Delta C} = 0,5(\Delta C_\delta + \Delta C_m)$. Учитывая, что на поверхности осаждения $C_{тр} = 0$, имеем. $\overline{\Delta C} = 0,5(\Delta C_H + \Delta C_K)$. Выражая конечную концентрацию через эффективность разделения, $\eta = (C_H - C_K)/C_H$ получим среднюю движущую силу $\overline{\Delta C} = 0,5 C_H (2-\eta)$. Тогда критерий энергоэффективности (4) получит вид

$$K_{эф} = \frac{u_t a_v C_H (2-\eta)}{2 \Delta p V_r}. \quad (5)$$

Скорость турбулентного осаждения (миграции) частиц u_t на поверхность элементов вычисляется по выражениям из работ [1–3].

В выражениях (2) и (4) значение мощности N записывается с применением значения перепада давления Δp рабочей зоны газосепаратора, который обеспечивает заданную эффективность η .

С использованием энергетического коэффициента Антуфьева для теплообменников, запишем аналогично для аппарата газоочистки модифицированный коэффициент

$$E_t = \frac{u_t F}{N}. \quad (6)$$

Отсюда для насадочного газосепаратора имеем

$$E_t = \frac{u_t a_v H}{\Delta p u_{ср} \epsilon_{св}}, \quad (7)$$

где $F = a_v S H$ – поверхность насадки, м²; S – площадь поперечного сечения аппарата, м²; H – высота слоя насадки, м; $\epsilon_{св}$ – удельный свободный объем насадки, м³/м³; $u_{ср}$ – скорость газа в слое, м/с.

Результаты расчетов

Результаты расчетов энергетических коэффициентов приведены в табл. 2, 3 для насадок из табл. 1 [5, 6].

В табл. 2: d_μ – диаметр частиц, мкм; $Re_r = u_{ср} d_\mu / \nu_r$ – число Рейнольдса; ξ – коэффициент гидравлического сопротивления насадок; u_* – динамическая скорость, м/с;

$\omega_{\tau p}$ – фактор инерционности частиц, $u_t^+ = u_t / u_*$ – безразмерная скорость.

Таблица 1

Характеристики регулярных и нерегулярных насадок

Тип насадки	$\varepsilon_{\text{св}}$	$a_v, \text{м}^2/\text{м}^3$	$d_3, \text{м}^*$
Регулярные насадки:			
Регулярная рулонная насадка	0,904	240	0,015
Регулярная рулонная гофрированная насадка с шероховатой поверхностью	0,904	240	0,015
Регулярная пакетная гофрированная насадка	0,98	162	0,024
Регулярная рулонная насадка РГН-5	0,9	360	0,01
Нерегулярные насадки:			
Инжехим-2012 (8 мм):	0,96	650	0,006
Инжехим-2012 (12 мм)	0,95	420	0,009
Спирально-призматическая насадка (2 мм)	0,81	3300	0,00098
Кольца Рашига (15 мм)	0,95	350	0,012

* d_3 – эквивалентный диаметр насадки, м

Таблица 2

Результаты расчетов насадочного газосепаратора при эффективности $\eta=0,985$. $S=1 \text{ м}^2$.

Система воздух-вода

$u_{\text{ср}}, \text{м/с}$	$d_{\text{ч}}, \text{мкм}$	$Re_{\text{г}}$	ξ	$u_*, \text{м/с}$	$\omega_{\text{г}} \tau_{\text{р}}$	$u_{\text{т}}^+$	$H, \text{м}$	$\Delta p, \text{кПа}$
Металлические кольца Рашига 15x15 мм, $a_v=350 \text{ м}^2/\text{м}^3$								
6	5	4800	2,93	1,46	0,188	0,2	0,45	1,21
6	3	4800	2,93	1,46	0,081	0,022	1,83	4,93
10	3	8000	2,65	2,1	0,116	0,087	0,53	5,7
Насадка "Инжехим-2012" 12 мм, $a_v=420 \text{ м}^2/\text{м}^3$								
6	5	3033	3,42	1,7	0,35	0,198	0,14	1,16
6	3	3033	3,42	1,7	0,124	0,03	0,88	7,32
10	3	6067	3,23	2,35	0,179	0,0124	0,26	5,67
10	1	6067	3,23	2,35	0,019	0,002	16,2	353,63
Насадка "Инжехим-2012" 8 мм, $a_v=650 \text{ м}^2/\text{м}^3$								
10	1	3867	3,35	2,66	0,033	0,032	5,72	203,18
Спирально-призматическая насадка 2x2x0,2 мм, $a_v=3300 \text{ м}^2/\text{м}^3$								
10	1	654	1,26	3,24	0,245	0,049	0,6	121,99

Таблица 3

Результаты расчетов энерго-сепарационных характеристик насадочных газосепараторов для системы воздух-вода

$u_{\text{ср}}, \text{м/с}$	$d_{\text{ч}}, \text{мкм}$	$N, \text{кВт}$	$E (3)$	$K_{\text{эф}} (5)$	$E_t (7)$
Металлические кольца Рашига 15x15 мм, $a_v=350 \text{ м}^2/\text{м}^3$					
6	5	7,26	0,074	0,53	4,34
6	3	29,6	0,0182	0,014	0,47
10	3	57,0	0,016	0,029	0,28
Насадка "Инжехим-2012" $a_v=420 \text{ м}^2/\text{м}^3$					
6	5	6,96	0,077	0,65	1,67
6	3	43,9	0,012	0,016	0,25
10	3	56,7	0,016	0,005	0,024
10	1	3536,3	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	0,0038
Насадка "Инжехим-2012" $a_v=650 \text{ м}^2/\text{м}^3$					
10	1	2031,8	$4,4 \cdot 10^{-4}$	0,01	0,058
Спирально-призматическая насадка $a_v=3300 \text{ м}^2/\text{м}^3$					
10	1	1210	$7,4 \cdot 10^{-4}$	0,0073	0,079

Из табл. 3 следует, что наиболее предпочтительными являются насадка «Инжехим-2012» и кольца Рашига при скорости газа $u_{\text{ср}}=6$ м/с.

На рисунке показаны затраты мощности на очистку в регулярных насадках из табл. 1. Диаметр частиц $d_{\text{ч}}=5$ мкм. Эффективность $\eta=0,9$.

Из представленных на рисунке и в таблицах результатов расчетов видно, что среди хаотичных насадок наиболее эффективная спирально-призматическая насадка и насадка "Инжехим 2003-м" и "Инжехим 2012", а среди регулярных – рулонная насадка РГН-5. Так, например, насадка РГН-5 при заданной эффективности сепарации и размерах частиц обеспечивает минимальную удельную мощность на очистку аэрозолей при скорости газа от 5 до 7 м/с. Минимум энергозатрат при $u_{\text{ср}}=6$ м/с (см. рис.). Окончательный выбор режимных и конструктивных характеристик насадочных газосепараторов должен выполняться по требованиям технического задания предприятий с применением различных методов [7–11].

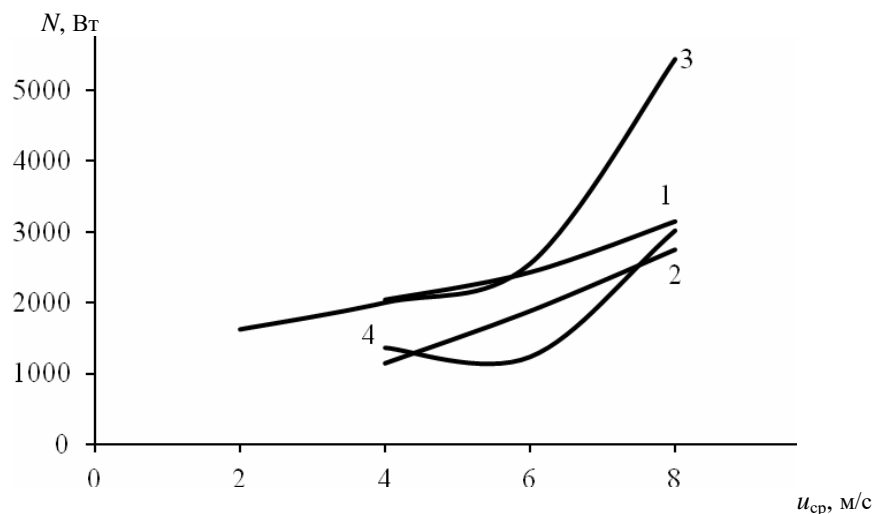


Рис. Мощность на подачу газа для регулярных насадок. $S=1\text{ м}^2$.
Номера насадок по порядку из табл. 1

Выводы

Для выбора конструктивных и режимных характеристик насадочных газосепараторов жидких аэрозолей рассмотрены энергетические коэффициенты и комплексы из теории теплообменных и массообменных процессов. Получены выражения модифицированных комплексов для оценки энергоэффективности осаждения аэрозолей для насадки. Представлены результаты расчетов нескольких типов регулярных и нерегулярных контактных устройств. По максимальным значениям комплексов и минимальной мощности на подачу газа сделаны выводы о наиболее эффективных конструкциях газосепарирующих элементов.

Литература

1. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами. Изд-во «Мир», 1970. 323с.
2. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Наука, 1980. 176 с.
3. Лаптев А.Г., Башаров М.М., Лаптева Е.А., Фарахов Т.М. Модели и эффективность процессов межфазного переноса. Часть 1. Гидродинамические процессы: монография. Казань: Центр инновационных технологий, 2017. 392 с.
4. Соколов В.Н., Доманский И.В. Газожидкостные реакторы. Л.: Машиностроение, 1976. 216 с.

5. Сокол Б.А., Чернышев А.К., Баранов Д.А. Насадки массообменных колонн. М.: «Галилея-принт», 2009. 358 с.
6. Каган А.М., Лаптев А.Г., Пушинов А.С., Фарахов М.И. Контактные насадки промышленных теплообменных аппаратов / под ред. А.Г. Лаптева. Казань: Отечество, 2013. 454 с.
7. Зиятдинов Н.Н. Моделирование и оптимизация химико-технологических процессов и систем // Теоретические основы химической технологии. 2017. Т. 51, № 6. С. 613–617.
8. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С., Нгуен Ву Л. Улавливание мелкодисперсных твердых частиц из газовых потоков в прямоугольных сепараторах // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22, №3 (134). С. 138–144.
9. Dmitriev A.V., Dmitrieva O.S., Madyshev I.N. Optimal designing of mass transfer apparatuses with jet-film contact devices // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. P.1–5.
10. Зиганшин М.Г., Колесник А.А., Зиганшин А.М. Проектирование аппаратов пылеочистки: учебное пособие. 2-е изд. перераб. и доп. СПб: Издательство «Лань», 2014. 544 с.
11. Лаптев А.Г., Башаров М.М., Лаптева Е.А. Сепарационная и энергетическая эффективность насадочных аппаратов очистки газов от аэрозолей // Теоретические основы химической технологии. 2017. Т. 51, №5. С. 491–498.

Авторы публикации

Лаптев Анатолий Григорьевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой "Технология воды и топлива" Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: tvt_kgeu@mail.ru.

Башаров Марат Миннахматович – канд.техн.наук., зам. генерального директора по техническому обслуживанию и инжинирингу АО "ТАНЕКО".

Лаптева Елена Анатольевна – канд. техн. наук, доцент кафедры "Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий" Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Busroyd R. Gas flow with suspended particles. Moscow: Mir, 1970. 323 p.
2. Mednikov E.P. Turbulent transport and deposition of aerosols. Moscow: Nauka, 1981. 176 p.
3. Laptev A.G., Basharov M.M., Lapteva E.A. Farakhov T.M. Models of interphase transport and calculation of process efficiency. Part 1. Hydromechanical processes. Kazan: Center for innovative technology, 2017. 392 p.
4. Sokolov V.N., Domanskii I.V. Gas-liquid reactors. Leningrad: Mashinostroenie Publishing House, 1976. 216 p.
5. Sokol B.A., Chernyshev A.K., Baranov D.A. Packings of mass transfer columns. Moscow: Galleya-print, 2009. 358 p.
6. Kagan A.M., Laptev A.G., Pushnov A.S., Farakhov M.I. Contact packings of industrial heat and mass transfer apparatuses. Kazan: Otechestvo, 2013. 454 p.
7. Ziyatdinov N.N. Modeling and optimization of chemical engineering processes and systems. 2017. V. 51, No. 6. P. 613–617.
8. Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Dmitrieva O.S., Nguen Vu L. Capturing of finely dispersed solid particles from gas streams in rectangular separators // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2018. V. 22, No. 3 (134). P. 138–144.
9. Dmitriev A.V., Dmitrieva O.S., Madyshev I.N. Optimal designing of mass transfer apparatuses with jet-film contact devices // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. V.53, P.1–5.
10. Ziganshin M.G., Kolesnik A.A., Ziganshin A.M. Designing apparatus for dust removal: a training manual. 2nd ed. Saint Petersburg: Lan Publishing House, 2014. 544 p.

11. Laptev A.G., Basharov M.M., Lapteva E.A. Separation and energy efficiency of packed apparatuses for purifying gases from aerosols // Theoretical foundations of chemical engineering. 2017, V.51, No.5. P. 639–646.

Authors of the publication

Anatoly G. Laptev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Marat M. Basharov – JSC “TANECO”, Nizhnekamsk, Russia.

Elena A. Lapteva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

29 июня 2018 г.