

УДК 697.94

Исследование насадок орошаемого скруббера в системах регенерации воздуха при поглощении CO_2

Д-р техн. наук В. А. ПРОНИН¹, О. В. ДОЛГОВСКАЯ²,
канд. техн. наук Ю. В. ТАТАРЕНКО³, Ю. ГАРМАЛЫГА⁴

¹maior.pronin@mail.ru, ²ovdolgovskaia@corp.ifmo.ru, ³lavrtat@mail.ru, ⁴ygarmalyga@corp.ifmo.ru,
Университет ИТМО

При разработке систем регенерации воздуха необходимо решение основных задач, таких как поглощение углекислого газа и регенерация кислорода. В настоящей работе проведено исследование оценки эффективности ряда насадок при абсорбционных процессах насадочного скруббера. Использовались насадки из пропиленового материала: в виде колец диаметром 140 мм, толщиной 5 мм, высотой 35 мм; в виде колец диаметром 55 мм, толщиной 5 мм, высотой 60 мм; а также материал «MATALA» SM 150. Для формирования рабочей зоны скруббера использовались различные схемы укладки насадок: навалом и послойно. При подаче в скруббер изменялись концентрация CO_2 и концентрация и расход абсорбента (NaOH) для каждого вида насадки. Данные, полученные в ходе эксперимента анализировались и сравнивались с показаниями безнасадочного скруббера. Произведена оценка эффективности насадок на заключительном этапе и наиболее эффективной для поглощения CO_2 , следует признать насадку комбинированного типа, использующую полимерный материал «MATALA», которая имеет регулярные слои такого материала и слои с хаотичной засыпкой из кусков этого же материала размером не более $100 \times 100 \times 40$ мм. Полученные результаты позволяют выдать практические рекомендации проектировщикам систем регенерации воздуха для герметично замкнутых объектов.

Ключевые слова: насадочный орошаемый скруббер, поглощение CO_2 , полимерные насадки, система регенерации воздуха, пористые насадочные тела, эффективность поглощения CO_2 .

Информация о статье:

Поступила в редакцию 28.01.2019, принята к печати 09.04.2019

DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-2-43-48

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Пронин В. А., Долговская О. В., Татаренко Ю. В., Гармалыга Ю. Исследование насадок орошаемого скруббера в системах регенерации воздуха при поглощении CO_2 // Вестник Международной академии холода. 2019. № 2. С. 43–48.

The packed beds of water-spray scrubber in air regeneration systems during CO_2 absorption

D. Sc. V. A. PRONIN¹, O. V. DOLGOVSKAIA², Ph. D. Yu. V. TATARENKO³, Yu. GARMALIGA⁴

¹maior.pronin@mail.ru, ²ovdolgovskaia@corp.ifmo.ru, ³lavrtat@mail.ru, ⁴ygarmalyga@corp.ifmo.ru,
ITMO University

While designing the systems of air regeneration the process like CO_2 absorption and oxygen regeneration are the main issues. The paper investigates the efficiency of the packed beds in absorption processes of packed scrubber. The following polypropylene packed beds are used: rings of 140 mm diameter, 5 mm thickness, and 35 mm height; rings of 55 mm diameter, 5 mm thickness, and 60 mm height; and MATALA SM 150 material. Different ways of capping have been used for scrubber working site: in bulk and in layers. For every type of packed bed CO_2 concentration, as well as the concentration and flow rate of the absorbent (NaOH), are changed while supplying into the scrubber. The experimental data have been analyzed and compared with the data for packless scrubber. The packed beds have been evaluated in terms of their CO_2 absorption efficiency. The packed bed of combined type using MATALA polymeric material with regular layers of the material and the layers with chaotic filling from the pieces of the same material of the size not more than $100 \times 100 \times 40$ mm should be considered as the most effective one. The results obtained allows formulating practical recommendations for designers of air regeneration systems for hermetically closed rooms.

Keywords: packed water-spray scrubber, CO_2 absorption, polymeric packed bed, air regeneration system, porous packings, CO_2 absorption efficiency.

Article info:

Received 28/01/2019, accepted 09/04/2019

DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-2-43-48

Article in Russian

For citation:

Pronin V. A., Dolgovskaia O. V., Tatarenko Yu. V., Garmaliga Yu. The packed beds of water-spray scrubber in air regeneration systems during CO_2 absorption. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2019. No 2. p. 43–48.

Введение

Насадочные скрубберы представляют собой аппараты, рабочая часть которых заполняется насадочными компонентами, которые различаются как по форме, так и по видам материалов, из которых они изготовлены [1, 2].

По форме насадочные тела могут быть в виде колец, шаров, пластин, седел, хорд и других геометрических фигур. Основными материалами, из которых изготавливают насадку орошаемых колонн, являются — керамика, металлы, различные виды пластмасс и т. д.

Основные требования, предъявляемые к насадке, состоят в создании развитой поверхности контакта жидкой и газообразной фаз, минимальной потери рабочего давления газовоздушной среды, а также равномерного распределения контактирующих фаз по поперечному сечению скруббера. Кроме перечисленных свойств насадка должна обладать химической стойкостью и механической прочностью. По способу укладки различают упорядоченную насадку, когда насадочные тела ориентируются в пространстве и хаотичную насадку, когда насадочные тела засыпаются беспорядочно. Выбор вида насадки и способ ее укладки существенно влияют на эффективность работы скруббера, что подтверждается как теоретическими, так и экспериментальными исследованиями. [3, 4].

В настоящей работе в качестве поглотителя углекислого газа в системе регенерации воздуха использовался насадочный орошаемый скруббер.

Одной из основных задач исследования является оценка эффективности различных видов насадок при абсорбционных процессах в рабочей части аппарата и сравнение их с данными безнасадочного скруббера.

Экспериментальная часть

Для проведения исследования был спроектирован и изготовлен экспериментальный стенд, состоящий из поглотителя углекислого газа (CO_2), генератора кислорода, вспомогательных систем и устройств, измерительного комплекса, а также систем автоматики и защиты от нестандартных ситуаций. В целом, стенд имитировал работу системы регенерации воздуха для герметичных изолированных объектов. При проектировании насадочного абсорбента задавались следующие величины:

- расход газовоздушной смеси (ГВС) — V ;
- начальная концентрация CO_2 в ГВС — C_n ;
- степень извлечения CO_2 из ГВС — X ;
- поступающий на абсорбцию абсорбент, не содержащий CO_2 , — $X_n=0$;
- рабочее давление процесса $P=0,611$ МПа;
- атмосферное давление в абсорбере — P_0 ;
- мольные массы: в абсорбере — $M_{\text{CO}_2}=44$ кг/моль, водный раствор абсорбента $M_a=(18-20)$ кг/моль; воздух $M_b=29$ кг/моль.

При составлении материального баланса и расчете расхода жидкости орошения использовались следующие зависимости [5, 6, 7]:

1. Расход воздуха (при нормальных условиях)

$$V_b = V(1 - C_n) \text{ или } G_b = V_b \rho_b,$$

где ρ_b — плотность воздуха.

2. Относительные массовые концентрации

$$C_n = \frac{M_{\text{CO}_2} C_n}{M_b(1 - C_n)}.$$

3. Массовое поглощение CO_2 составит:

$$m = G_b (C_n - C_k),$$

где $C_k = C_n \cdot X C_n$

4. Уравнение линии равновесия можно представить в виде:

$$P = \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_b} \cdot \frac{PX}{P_0}.$$

5. Расход раствора абсорбента

$$Q = K \cdot m \cdot (X_k - X_n),$$

где X_k — концентрация CO_2 в водном растворе абсорбента на выходе из абсорбера при равновесии с входящей ГВС, $X_k = m/Q + X_n$; K — коэффициент запаса, $K=0,15 \div 0,20$.

На следующем этапе проектирования определялась скорость ГВС и диаметр абсорбера, исходя из типа насадки [8, 9, 10].

Фиктивную предельную скорость ГВС в точке инверсии можно описать выражением:

$$\frac{\lg(W_{\text{пр}}^2 f \rho_b \mu_a^{0,16})}{g \varepsilon^3 \rho_a} = B - K_1 \frac{Q^{0,25}}{G} \cdot \frac{\rho_b^{0,125}}{\rho_a},$$

где $W_{\text{пр}}$ — предельная скорость ГВС;

μ_a — динамическая вязкость раствора абсорбента;

f — удельная поверхность насадки;

ε — свободный объем рабочей части абсорбера;

B — эмпирический коэффициент для насадки;

ρ_a — плотность раствора абсорбента;

ρ_b — плотность воздуха.

Определяем рабочую скорость ГВС для предотвращения захлебывания.

$$W_p = 0,75 W_{\text{пр}}$$

Диаметр рабочей части абсорбера можно определить из выражения:

$$d = \sqrt{\frac{4G}{W_p \pi \rho_b}}.$$

После определения диаметра абсорбера (площади поперечного сечения) определяется плотность орошения q :

$$q = \frac{Q}{S \rho_a},$$

где $S = \frac{\pi d^2}{4}$ — площадь поперечного сечения абсорбера.

Оптимальная плотность орошения:

$$q_{\text{опт}} = K_2 f,$$

где K_2 зависит от свойств насадки.

Величина коэффициента массопередачи γ зависит от вида насадки и способа ее укладки в рабочей части абсорбера. Для регулярной (неупорядоченной) насадки исходное выражение будет иметь вид

$$\text{Nu} = \gamma \text{Re}^{0,655} \text{Pr}^{0,33},$$

где Nu — диффузионный критерий Нуссельта для ГВС фазы; Re — критерий Рейнольдса для ГВС фазы; Pr — диффузионный критерий Прандтля для ГВС фазы [11, 12].

На основании предварительно проведенных теоретических исследований и патентного анализа, для разработанной модели макетного образца скруббера были изготовлены различные виды насадок, отличающихся по типу полимерного материала, форме элементов, их размерам и способам укладки. Основным критерием при выборе варианта насадок служит эффективность поглощения углекислого газа и связанная с ней производительность скруббера. Для сравнительных исследований с различными вариантами насадки выбраны следующие условия:

- температура воздуха в испытательном помещении (20 ± 25 °С);
- относительная влажность воздуха 26 ± 1 %;
- расход жидкости орошения $20 \div 51$ л/мин;
- абсорбент $NaOH$ ($LiOH$).

В ходе экспериментов измерялась разность концентраций на входе и выходе установки ΔCO_2 (%) и количество условных человек N_u , жизнедеятельность которых обеспечивает установка.

Критерием выбора материала насадки являлась особенность разрабатываемой системы поглощения углекислого газа с применением раствора едкого натрия (лития) с концентрацией в диапазоне (2–15%), поэтому внимание уделялось материалам, стойким к воздействию агрессивных сред, таких как полиэтилен и полипропилен [13, 14, 15]. На основании этого были выбраны следующие материалы:

1. Полипропиленовый материал «ФФМК» производства ООО «ФФМК» (Санкт-Петербург), ТУ 2292-001-58312997-2003, который изготавливается методом пневмоэкструзии из полипропилена и выпускается в виде листов и труб. Геометрические размеры и плотность материала устанавливаются заказчиком. В нашем эксперименте использовались кольца диаметром 140 мм, толщиной 5 мм и высотой 35 мм (рис. 1), а также кольца диаметром 55 мм, толщиной 5 мм и высотой 60 мм (рис. 2).

2. Материал «MATALA» SM 150 (Matala Water Technology Co., Ltd), который выпускается в виде плоских листов, изготовленных из переплетенных полимерных волокон (рис. 3). Благодаря такой форме, насадка изданного материала обладает развитым трехмерным распределением и большим свободным объемом (до 94%)

Для формирования рабочей зоны скруббера использовались следующие схемы укладки элементов насадки:

Вариант № 1. Кольца диаметром 140 мм — навалом.

Вариант № 2. Кольца диаметром 55 мм — навалом.

Вариант № 3. Листы из материала «MATALA» SM 150 укладывались послойно, причем между 12 основными слоями укладывались кольца диаметром 140 мм и высотой 35 мм для разделения основных слоев друг от друга, во избежание образования пленки на каландрированных поверхностях, что может вызвать дополнительное сопротивление воздушному потоку.

Вариант № 4. Листы из материала «MATALA» SM 150, между которыми уложена кусковая нарезка из этого же материала.

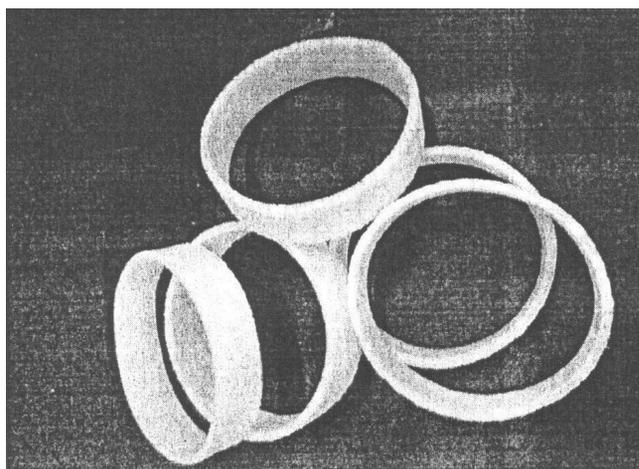


Рис. 1. Внешний вид колец из материала «ФФМК»: диаметром 140 мм, толщиной 5 мм и высотой 35 мм

Fig. 1. The rings form FFMK ФФМК material: diameter 140 mm, thickness 5 mm, height 35 mm

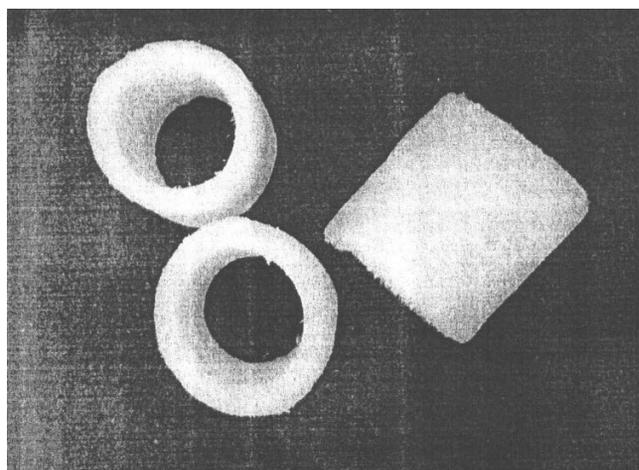


Рис. 2. Внешний вид колец из материала «ФФМК»: диаметром 55 мм, толщиной 5 мм и высотой 60 мм

Fig. 2 The rings form FFMK material: diameter 55 mm, thickness — 5 mm, height 60 mm



Рис. 3. Материал «MATALA» SM 150 (Matala Water Technology Co., Ltd)

Fig. 3. MATALA SM 150 Material (Matala Water Technology Co., Ltd)

В ходе эксперимента изменялись как параметры ГВС (концентрация CO₂), так и виды абсорбента, а также его концентрация и расход, причем весь комплекс экспериментов производился для каждого вида насадки, кроме

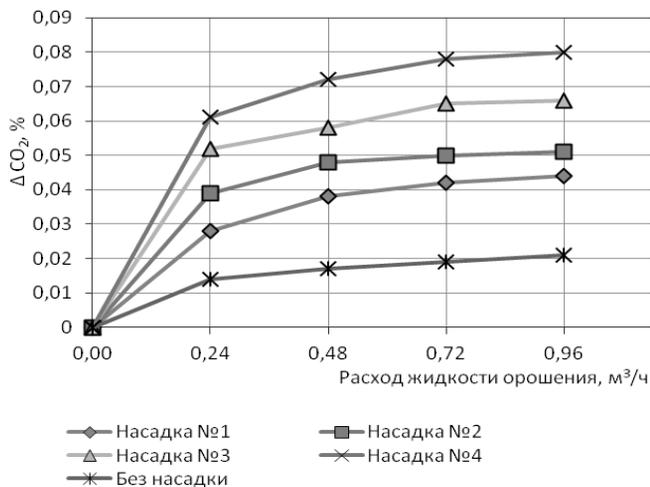


Рис. 4. Зависимость поглощения CO₂ от расхода жидкости орошения

Fig. 4. The dependence of CO₂ absorption on liquid reflux flow rate

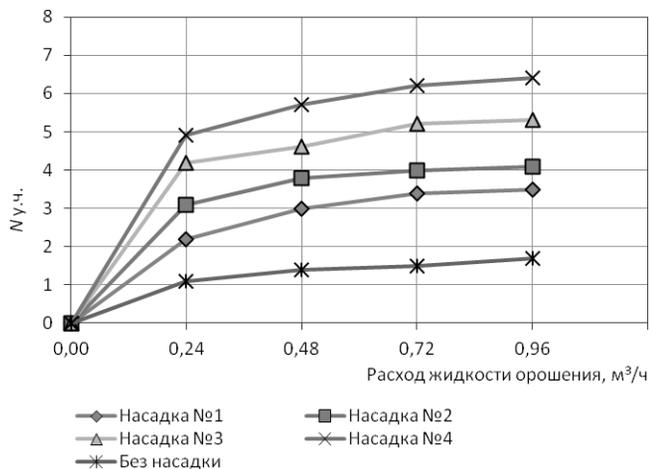


Рис. 5. Зависимость производительности абсорбера от расхода жидкости орошения

Fig. 5. The dependence of absorber efficiency on liquid reflux flow rate

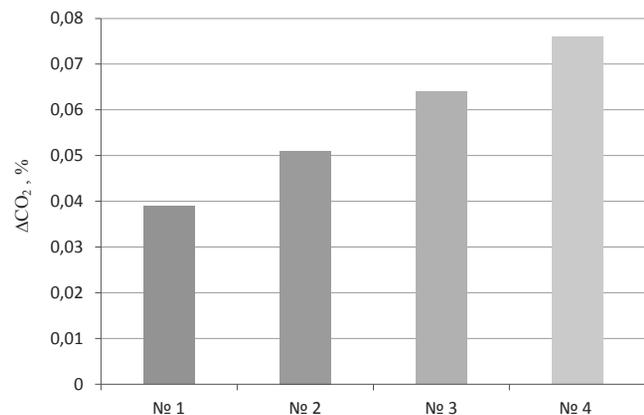


Рис. 6. Эффективность поглощения CO₂ насадками

того для сравнительного анализа оценивалась эффективность орошаемого безнасадочного скруббера.

В качестве примера представлены данные эксперимента по определению зависимости эффективности поглощения CO₂ от расхода жидкости орошения для различных видов насадки, а так же безнасадочного скруббера [16, 17, 18].

Исходные данные:

- расход ГВС: $V=240$ м³/ч;
- диаметр скруббера: $d=440$ мм;
- высота рабочей зоны скруббера: $h=1000$ мм;
- высота насадочного слоя: $h'=650$ мм;
- концентрация NaOH: $C_{NaOH}=2,16\%$;
- концентрация CO₂ на входе: $C_{н}=0,293\%$.

Производительность установки оценивалась количеством условных человек $N_{у.ч.}$, жизнедеятельность которых может быть обеспечена. Расчеты производились по формуле $N_{у.ч.}=33,3V\Delta C_{CO_2}$ [19].

Результаты замеров представлены в табл. 1 и на графиках рис. 4, 5, которые отображают зависимость поглощения CO₂ и производительности абсорбера от расхода жидкости орошения. Максимальный расход жидкости орошения определяется полной смачиваемостью насадочных тел.

Как было отмечено ранее, основным критерием при выборе варианта насадок служит эффективность поглощения углекислого газа и связанная с ней производительность установки поглощения. На заключительном этапе эксперимента оценивалась эффективность насадки при следующих условиях:

- температура воздуха в испытательном помещении 25 °С;
- относительная влажность воздуха $26\pm 1\%$;

Таблица 1
Зависимость поглощения CO₂ и производительности абсорбера от расхода жидкости орошения

Table 1
The dependence of CO₂ absorption and absorber efficiency on liquid reflux flow rate

Расход жидкости орошения, м ³ /ч	0,24	0,48	0,72	0,96
Насадка № 1				
ΔC_{CO_2}	0,028	0,038	0,042	0,044
$N_{у.ч.}$	2,2	3,0	3,4	3,5
Насадка № 2				
ΔC_{CO_2}	0,039	0,048	0,050	0,051
$N_{у.ч.}$	3,1	3,8	4,0	4,1
Насадка № 3				
ΔC_{CO_2}	0,052	0,058	0,065	0,066
$N_{у.ч.}$	4,2	4,6	5,2	5,3
Насадка № 4				
ΔC_{CO_2}	0,061	0,072	0,078	0,080
$N_{у.ч.}$	4,9	5,7	6,2	6,4
Без насадки				
ΔC_{CO_2}	0,014	0,017	0,019	0,021
$N_{у.ч.}$	1,1	1,4	1,5	1,7

Таблица 2

Эффективность поглощения CO₂ насадками

Table 2

CO₂ absorption efficiency of different packed beds

Замеры	Насадки							
	№ 1		№ 2		№ 3		№ 4	
	до	после	до	после	до	после	до	после
1	0,300	0,261	0,301	0,252	0,300	0,237	0,301	0,224
2	0,302	0,264	0,302	0,251	0,301	0,237	0,300	0,223
3	0,303	0,265	0,303	0,251	0,303	0,239	0,301	0,226
4	0,304	0,263	0,303	0,250	0,303	0,238	0,303	0,227
5	0,301	0,262	0,300	0,250	0,301	0,237	0,303	0,228
Среднее ΔCO ₂ (%)	0,039		0,051		0,064		0,076	

— массовая концентрация NaOH в жидкости орошения 15%;

— расход жидкости орошения (1,2÷3) м³/ч

При этом определялось поглощение углекислого газа — ΔCO₂ (%).

Результаты сравнительного эксперимента приведены в табл. 2 и на рис. 6.

Заключение

На основании проведенных сравнительных исследований, наиболее эффективной для поглощения CO₂,

следует признать насадку № 4 комбинированного типа, использующую полимерный материал «MATALA», которая имеет регулярные слои такого материала и слои с хаотичной засыпкой из кусков этого же материала размером не более 100×100×40 мм. Данная насадка создает максимальную удельную (приведенную к объему) площадь поверхности контакта газовой и жидкостной сред, при минимальном сопротивлении потоку ГВС.

В дальнейшем планируется проведение исследования по оценке энергетических затрат для данного способа абсорбции CO₂.

Литература

1. Пронин В. А., Прилуцкий А. А., Долговская О. В., Подболотова Т. Е. Исследование эффективности работы скруббера при поглощении углекислого газа // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2015. № 4 (26). С. 132–140.
2. Цыганков А. В., Пронин В. А., Шпилин Д. И., Аleshин А. Е. Гидродинамический расчет орошаемой колонны с пористыми насадочными телами // Вестник Международной академии холода. 2014. № 2. С. 45–48.
3. Muhammad Sarfraz, M. Ba. Shammakh. ZIF-based water-stable mixed-matrix membranes for effective CO₂ separation from humid flue gas // The Canadian Journal of Chemical Engineering. 2018. Vol. 96, Issue 11. P. 2475–2483. <https://doi.org/10.1002/cjce.23170>
4. Громов Ю. Ю., Матвейкин В. Г., Путин Б. В. Моделирование и управление процессом регенерации воздуха в герметически замкнутом объеме // Теоретические основы химической технологии. 1997. Т. 3. № 6. С. 638.
5. Гальперин Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия. 1981. Т. 2. 384 с.
6. Рамм В. М. Абсорбция газов. М.: Химия. 1976. 656 с.
7. Reydon R. F., Gauvin W. H. Theoretical and experimental Studies of confined vortex flow // Can. J. Chem. Eng. 1981. V. 59. N 1. P. 14–23. <https://doi.org/10.1002/cjce.5450590102>
8. Kutateladze S. S. Heat transfer and hydrodynamic resistance. New York: Academic Press, 1993. 385 p.
9. ГОСТ Р EN 29053–2008. Группа Ж19. Материалы акустические. Методы определения сопротивления продуванию потоком воздуха.
10. Пушинов А. С., Соколов А. С., Бутрин М. М. Методы интенсификации процесса тепло- и массообмена в колонных

References

1. Pronin V. A., Prilutskii A. A., Dolgovskaya O. V., Podbolotova T. E. Study of the effectiveness of the scrubber during the absorption of carbon dioxide. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv»*. 2015. No 4 (26). P. 132–140. (in Russian)
2. Tsygankov A. V., Pronin V. A., Shpilin D. I., Aleshin A. E. Hydrodynamic calculation of the irrigated column with porous nozzle bodies. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2014. No 2. (in Russian)
3. Muhammad Sarfraz, M. Ba. Shammakh. ZIF-based water-stable mixed-matrix membranes for effective CO₂ separation from humid flue gas. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. Vol. 96, Issue 11. P. 2475–2483. <https://doi.org/10.1002/cjce.23170>
4. Gromov Yu. Yu., Matveykin V. G., Putin B. V. Modeling and control of the process of air regeneration in a hermetically sealed volume. *Theoretical foundations of chemical technology*. 1997. Vol. 3. No. 6. P. 638. (in Russian)
5. Galperin N. I. Basic processes and apparatus of chemical technology. Moscow: Chemistry. 1981. Vol. 2. 384 p. (in Russian)
6. Ramm V. M. Gas Absorption. Moscow: Chemistry. 1976. 656 p. (in Russian)
7. Reydon R. F., Gauvin W. H. Theoretical and experimental Studies of confined vortex flow. *Can. J. Chem. Eng.* 1981. V. 59. N1. p. 14–23. <https://doi.org/10.1002/cjce.5450590102>
8. Kutateladze S. S. Heat transfer and hydrodynamic resistance. — New York: Academic Press, 1993. 385 p.
9. GOST R EN 29053–2008. Group Zh19. Methods of determination of resistance to blowing off by an air stream. (in Russian)
10. Pushnov A. S., Sokolov A. S., Butrin M. M. Methods of intensification of heat and mass transfer process in column apparatus

- аппаратах с контактными устройствами // Известия МГТУ «МАМИ». 2013. Т. 4. № 1 (15). С. 237–242.
11. Luitsyansky L. H. Mechanics of fluid and gas. New York: Wiley, 1961. 688 p.
 12. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. Ч 2. Массообменные процессы и аппараты. М.: Химия, 1995. 400 с.
 13. Патент РФ на полезную модель. № 125877. Насадочный скруббер / В. А. Пронин, А. П. Верболюз, А. В. Утин / публикация патента: 20.03.2013.
 14. Сокол Б. А., Чернышев А. К., Баранов Д. А., Беренгартен М. Г., Левин Б. В. Насадки массообменных колонн. М.: ИнфоХИМ, 2009. 358 с.
 15. Шпилин Д. И., Пронин В. А., Долговская О. В. Совершенствование насадочных абсорбционных систем газоочистки в системах жизнеобеспечения // Вестник Международной академии холода. 2017. № 1. С. 45–48.
 16. ГН 2.2.5.2100–06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.
 17. Шоу Т. П., Хаджис П. У. Оптимизация удаления CO₂ // Нефтяные технологии. 2001. № 5. С. 117–110.
 18. Швыдкий В. С., Ладыгичев М. Г. Очистка газов. Справочник. М.: Теплотехник, 2005. 640 с.
 19. Arnold D. S., et al. CO₂ Can Be Produced From Flue Gas // Oil and Gas Journal. 1982. November 22. P. 130.

Сведения об авторах

Пронин Владимир Александрович

д. т. н., профессор факультета низкотемпературной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, maior.pronin@mail.ru

Долговская Ольга Владимировна

аспирант факультета низкотемпературной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, ovdolgovskaia@corp.ifmo.ru, РИНЦ SPIN-код 9181–9946

Татаренко Юлия Валентиновна

к. т. н., доцент факультета низкотемпературной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, lavrtat@mail.ru

Гармалыга Юлия

студент I курса факультета низкотемпературной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, ygarmalyga@itmo.ru

Information about authors

Pronin Vladimir Aleksandrovich

D. Sc., professor of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, maior.pronin@mail.ru

Dolgovskaia Olga Vladimirovna

Postgraduate Student of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, ovdolgovskaia@corp.ifmo.ru

Tatarenko Yulia Valentinovna

Ph. D., Associate professor, Associate professor of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, lavrtat@mail.ru

Garmaliga Julia

1st year student of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, ygarmalyga@itmo.ru