

УДК 628.52

## Исследование эффективности работы скруббера при поглощении углекислого газа

Д-р техн. наук **В.А. Пронин**, major.pronin@mail.ru

канд. техн. наук **А.А. Прилуцкий**, 9100202@mail.ru

**О.В. Долговская**, zilkina@yandex.ru

**Т.Е. Подболотова**, podbolotova17@yandex.ru

*Университет ИТМО*

*191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9*

*В данной статье изложены материалы по теоретическому и экспериментальному исследованию эффективности поглощения углекислого газа в орошаемых скрубберах насадочного типа, где в качестве насадки использован полимерный пористый материал, а в качестве жидких реагентов LiOH и NaOH. Кроме оценки эффективности поглощения CO<sub>2</sub> были определены энергозатраты на поглощение 1 м<sup>3</sup> углекислого газа для данных типов окислителя и оптимальной его концентрации. Материалы, изложенные в настоящей работе, могут быть использованы при проектировании поглотительных систем абсорбционного типа.*

**Ключевые слова:** орошаемые скрубберы насадочного типа; пористая полимерная насадка; поглощение углекислого газа; энергозатраты.

---

## Carbon dioxide scrubbing efficiency

Ph. D. **Vladimir A. Pronin**, major.pronin@mail.ru

Ph. D. **Alexey A. Prilutsky**, 9100202@mail.ru

**Olga V. Dolgovskaya**, zilkina@yandex.ru

**Tatyana E. Podbolotova**, podbolotova17@yandex.ru

*ITMO University*

*191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9*

**The article deals with theoretical and experimental analysis of carbon-dioxide absorption efficiency in packed bed wet scrubbers. Polymer-type porous body is used as packing; LiOH and NaOH are used as liquid reagents. Consumption power requirements for 1 m<sup>3</sup> of carbon dioxide for given types of oxidizing agent and its optimum concentration is estimated. The data can be used in absorption system design.**

**Keywords:** packed bed wet scrubber, porous polymer-type packing, carbon-dioxide absorption, power requirements.

---

На целом ряде пищевых и химических производств приходится решать задачу поглощения углекислого газа, который выделяется при протекании рабочих процессов [1–4]. Существует целый ряд методов очистки воздуха от углекислого газа [10, 11, 13, 14], основные из которых можно подразделить по фазовому принципу на «газ – твердое тело» и «газ – жидкость». Первый принцип относится к адсорбционным методам поглощения, второй – к абсорбционным. В настоящей работе исследовался абсорбционный метод поглощения углекислого газа с помощью орошаемого скруббера с наполнителем из пористого материала [14, 15]. Скруббер представляет собой колонну, загруженную насадкой, наличие которой позволяет значительно увеличить площадь контакта фаз [9, 12]. Макет и схема работы скруббера представлены на рисунке 1.

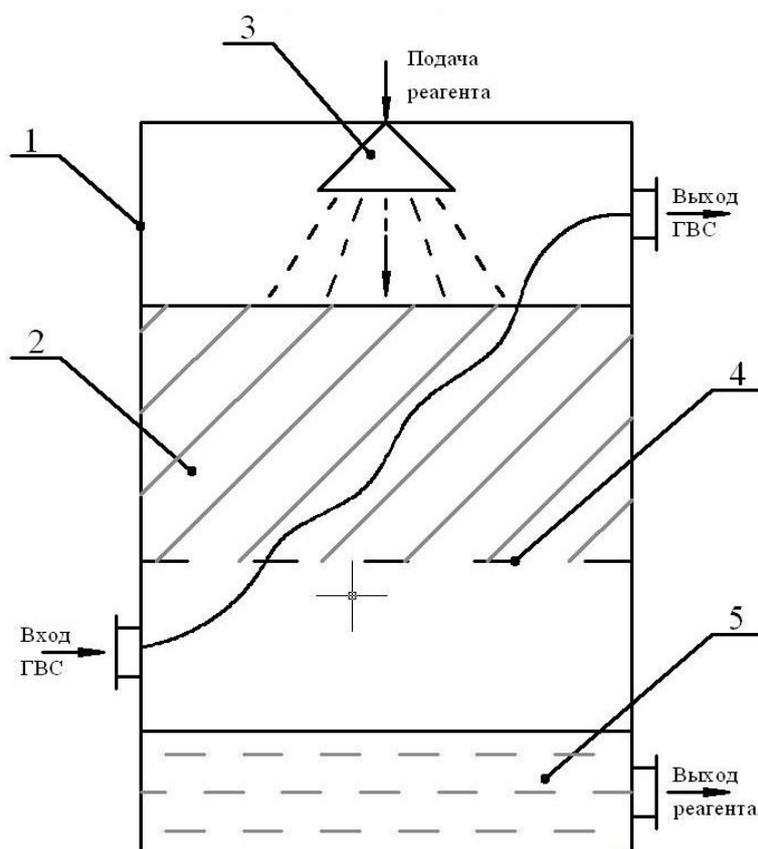


Рисунок 1 – Макет и схема работы скруббера

Основные параметры скруббера (например, диаметр, высота, количество наполнителя) определяют расчетным путем, исходя из заданных условий работы (производительность, степень очистки и др.) [5–8]. Макет скруббера состоит из следующих элементов: 1 – корпус; 2 – засыпка из пористого материала; 3 – распылитель жидкого реагента; 4 – опорная решетка; 5 – сборник жидкого реагента.

Принцип его работы следующий: газозвудушная смесь (ГВС), содержащая углекислый газ, с помощью вентилятора подается в нижнюю часть скруббера, далее проходит через пористую насадку 2, орошаемую жидким реагентом с помощью распылителя 3 и выходит из скруббера в его верхней части.

На базе макета скруббера был создан лабораторный стенд, позволяющий изменять расход ГВС и реагента, а также их концентрацию. Измерительная часть стенда позволяла контролировать все необходимые параметры. Цель данного эксперимента — исследование зависимости эффективности работы скруббера от концентрации активного компонента жидкости орошения, а также определение удельных энергозатрат.

На первом этапе эксперимента проводилось исследование зависимости эффективности работы скруббера от концентрации активного компонента жидкости орошения.

1. Определение зависимости поглощения углекислого газа от концентрации NaOH в жидкости орошения, подаваемой в макет скруббера.

Исходные данные:

- температура воздуха –  $24 \pm 1^\circ\text{C}$
- относительная влажность воздуха –  $29 \pm 1\%$
- объемная концентрация углекислого газа в воздухе, подаваемого в корпус скруббера –  $0,302\%$
- расход жидкости орошения – 50 л/мин ( $3,0 \text{ м}^3/\text{час}$ )
- расход ГВС –  $417 \pm 3 \text{ м}^3/\text{час}$
- расчетная скорость восходящего потока воздуха в макете скруббера –  $0,77 \text{ м/с}$ .

Результаты измерений концентрации углекислого газа «до» и «после» макета скруббера в зависимости от концентрации NaOH в жидкости орошения представлены в таблице 1 и на рисунке 2.

Таблица 1 – Изменение концентрации углекислого газа от концентрации NaOH в жидкости орошения

Замеры	Концентрация NaOH в жидкости орошения, %							
	2,5		4,0		10,0		15,0	
	до	после	до	после	до	после	до	после
1	0,300	0,249	0,302	0,243	0,301	0,238	0,302	0,223
2	0,302	0,256	0,302	0,242	0,301	0,232	0,301	0,228
3	0,301	0,247	0,301	0,246	0,302	0,242	0,302	0,222
4	0,301	0,250	0,302	0,245	0,300	0,245	0,300	0,230
5	0,302	0,248	0,301	0,244	0,301	0,232	0,300	0,223
Среднее значение $\Delta\text{CO}_2$ , %	0,051		0,057		0,063		0,076	

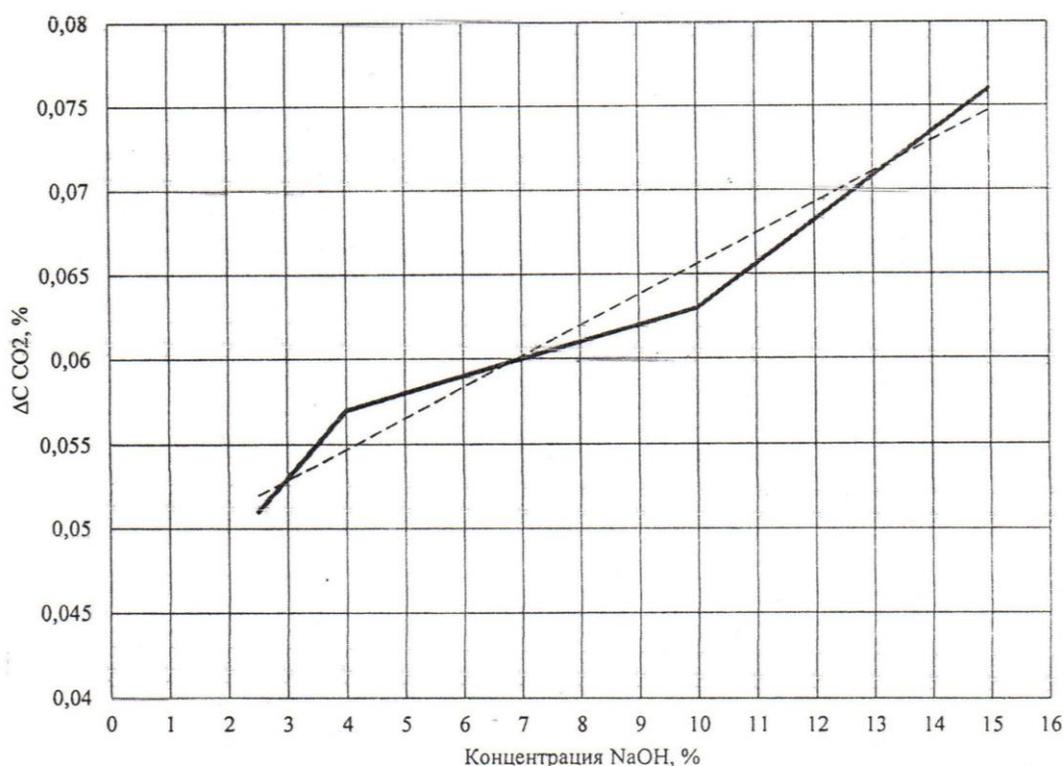


Рисунок 2 – График зависимости изменения концентрации углекислого газа от концентрации NaOH в жидкости орошения

Зависимость эффективности поглощения углекислого газа от концентрации едкого натра в жидкости орошения в диапазоне от 2,5 до 15% в пределах погрешности эксперимента может быть аппроксимирована линейной функцией согласно рисунку 2. При увеличении концентрации втрое поглощение системы увеличивается в 1,4 раза.

Экстраполируя кривую на рисунке 2 в область более высоких концентраций, можно полагать, что увеличение концентрации едкого натра в жидкости орошения свыше 15% масс., повысит эффективность поглощения углекислого газа. Однако необходимо учесть возникающее при этом значительное повышение вязкости жидкости орошения и возможные значительные потери

активного компонента при штатных периодических заменах отработавшей жидкости орошения в скруббере.

Изменение концентраций NaOH в жидкости орошения в пределах 2,5–15,0% является одним из возможных каналов оперативного управления производительностью скруббера.

2. Определение зависимости поглощения углекислого газа от концентрации LiOH в жидкости орошения, подаваемой в макет скруббера.

Исходные данные:

- температура воздуха –  $24 \pm 1^\circ\text{C}$
- относительная влажность воздуха –  $29 \pm 1\%$
- объемная концентрация углекислого газа в воздухе, подаваемом в корпус скруббера – 0,302%
- расход жидкости орошения – 50 л/мин ( $3,0 \text{ м}^3/\text{час}$ )
- расход ГВС –  $417 \pm 3 \text{ м}^3/\text{час}$
- расчетная скорость восходящего потока воздуха в макете скруббера – 0,74 м/с.

Результаты измерений концентрации углекислого газа «до» и «после» макета скруббера в зависимости от концентрации LiOH в жидкости орошения представлены в таблице 2 и на рисунке 3.

Таблица 2 – изменения концентрации углекислого газа от концентрации LiOH в жидкости орошения

Замеры	Концентрация LiOH в жидкости орошения, %							
	2,5		4,0		10,0		15,0	
	до	после	до	после	до	после	до	после
1	0,301	0,232	0,300	0,224	0,301	0,225	0,301	0,237
2	0,300	0,231	0,302	0,226	0,302	0,226	0,300	0,236
3	0,303	0,234	0,303	0,227	0,303	0,227	0,302	0,238
4	0,302	0,233	0,304	0,228	0,303	0,227	0,303	0,239
5	0,302	0,233	0,301	0,225	0,300	0,224	0,302	0,238
Среднее значение $\Delta\text{CO}_2$ , %	0,069		0,076		0,076		0,064	

В диапазоне концентраций LiOH в жидкости орошения от 2,5 до 4,0% масс. наблюдается максимум эффективности поглощения углекислого газа –  $\Delta\text{CO}_2$  на уровне 0,075 ... 0,077% в соответствии с рисунком 3. Это свидетельствует о том, что в зоне массообмена скруббера постоянно присутствует достаточное или даже избыточное количество активного поглотительного вещества LiOH. А скорость массообмена ограничивается иным параметром работы скруббера, например, временем реакции или площадью контакта двух сред.

В диапазоне концентраций LiOH выше 4,0% масс. в жидкости орошения визуально наблюдается расслоение на фазы и переход в состояние суспензии. Это объясняет снижение эффективности работы скруббера при высоких концентрациях LiOH: на поверхности массообмена жидкость орошения представлена либо водой (90–96% площади), либо высококонцентрированным раствором щелочи (4–10% площади).

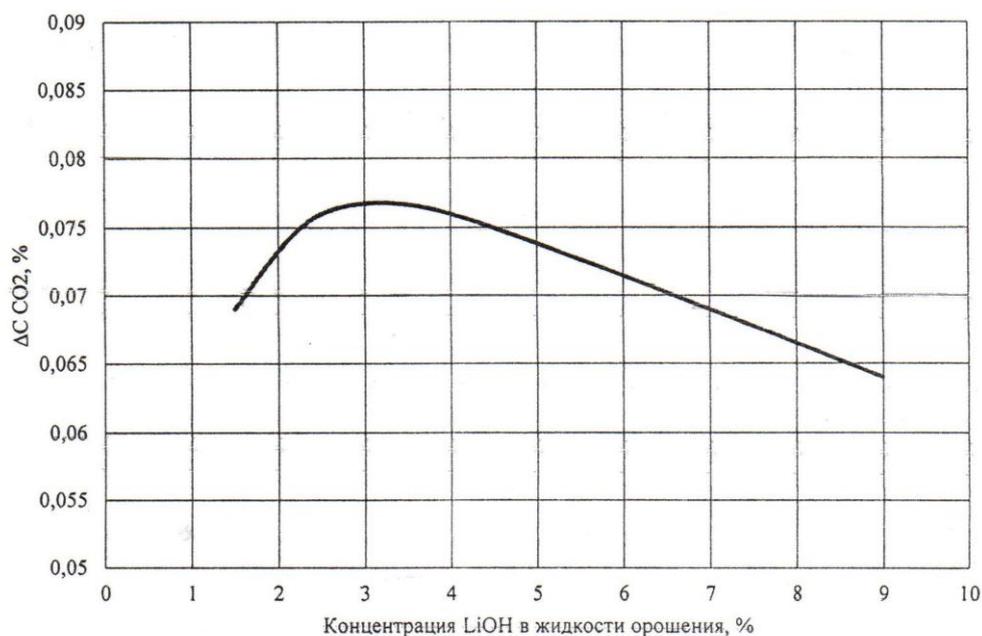


Рисунок 3– График зависимости изменения концентрации углекислого газа от концентрации LiOH в жидкости орошения

На втором этапе эксперимента проводился расчет удельных энергозатрат.

На основании экспериментальных данных проведен расчет усредненных энергозатрат на поглощение  $1 \text{ м}^3$  углекислого газа. Для усреднения смоделирован цикл работы скруббера, во время которого происходит:

- частичное или полное заполнение резервуара скруббера жидкостью орошения, при котором в последней восстанавливается заданный уровень концентрации активного компонента;
- работа скруббера в режиме поглощения с усредненными параметрами расхода ГВС и жидкости орошения;
- слив части отработанной жидкости орошения в балластную емкость.

Длительность цикла не задается, а определяется из условия достижения нижней границы допустимого диапазона изменения концентрации активного компонента в жидкости орошения. Для NaOH согласно экспериментам взят диапазон концентраций от 10 до 15%, для LiOH – от 2,0 до 4,0%.

Количество циклов работы системы поглощения также является расчетным параметром в зависимости от длительности цикла. Расчет усредненных значений энергопотребления проводится применительно к одному циклу, и тем самым, не связан с общей длительностью работы системы.

Расчеты проводились для двух реагентов:

- расчет удельных затрат электроэнергии на поглощение и удаление углекислого газа в жидкости орошения с LiOH;
- расчет суммарной мощности электрооборудования макета скруббера и объем поглощенного углекислого газа производится для единичного цикла работы макета скруббера в процессе испытаний.

Единичный цикл работы скруббера (таблица 3) — непрерывное поглощение углекислого газа в ГВС при непрерывной работе насоса жидкости орошения и вентилятора подачи ГВС в корпус макета скруббера, снижение концентрации жидкости орошения (по активному компоненту), однократный слив части жидкости орошения конечной концентрации, однократный долив реагента и воды в скруббер до получения первоначального объема жидкости орошения и начальной концентрации. Полученный в результате реакции карбонат лития отфильтровывается в процессе работы скруббера и, следовательно, не учитывается при расчетах.

Таблица 3 – Единичный цикл работы макета скруббера

Показатель	Значение
Концентрация CO <sub>2</sub> на входе, % об.	0,3
Снижение концентрации ΔCO <sub>2</sub> , % об.	0,076
Расход ГВС, м <sup>3</sup> /час	420
Концентрация жидкости орошения (по LiOH) начальная, %	4,0
Концентрация жидкости орошения (по LiOH) конечная, %	2,0
Концентрация реагента (по LiOH), %	10
Объем жидкости орошения начальной, л	300
Объем жидкости орошения конечной, л	287
Объем слитой жидкости орошения, л .	60
Объем долитого реагента, л	68
Объем долитой воды, л	10
Общее время, час	8,6

Расчет суммарных энергозатрат электрооборудования макета скруббера за время одного цикла производится по формуле (1):

$$E_{\Sigma} = W_{в-р} \cdot t_{в-р} + W_{нцр} \cdot t_{нцр} + W_{нпр} \cdot t_{нпр} + W_{нв} \cdot t_{нв} + W_{но} \cdot t_{но} + W_{доп} \cdot t_{доп}, \quad (1)$$

где:  $E_{\Sigma}$  – суммарные энергозатраты электрооборудования скруббера, кВт·час;  $W_{в-р}$  – мощность вентилятора, кВт;  $t_{в-р}$  – время работы вентилятора, час;  $W_{нцр}$  – мощность циркуляционного насоса подачи жидкости орошения, кВт;  $t_{нцр}$  – время работы циркуляционного насоса подачи жидкости орошения, час;  $W_{нпр}$  – мощность насоса подачи LiOH, кВт;  $t_{нпр}$  – время работы насоса подачи LiOH, час;  $W_{нв}$  – мощность насоса подачи воды, кВт;  $t_{нв}$  – время работы насоса подачи воды, час;  $W_{но}$  – мощность насоса удаления отработанной жидкости орошения, кВт;  $t_{но}$  – время работы насоса удаления отработанной жидкости орошения, час;  $W_{доп}$  – мощность дополнительного электрооборудования, кВт;  $t_{доп}$  – время работы дополнительного электрооборудования, час.

В таблице 4 приведены мощность оборудования макета скруббера и время его работы.

Таблица 4 – Мощность оборудования макета скруббера и время его работы

Наименование показателя	Оборудование					
	Вентилятор	Насосы				Доп. Оборудование
		НЦР	НПР	НВ	НО	
Мощность, кВт	0,13	0,37	0,37	0,37	0,37	0,1
Время работы, час	8,6	8,6	0,23	0,003	0,20	8,6
Суммарные энергозатраты, кВт·час	5,18					

Расчет объема углекислого газа, поглощенного за один цикл работы макета скруббера, производится по формуле:

$$V_{CO_2} = Q_{ГВС} \cdot \Delta CO_2 \cdot T, \quad (2)$$

где:  $V_{CO_2}$  – объем CO<sub>2</sub>, поглощенного за время испытаний макета скруббера, м<sup>3</sup>;  $Q_{ГВС}$  ~ расход ГВС, подаваемой в корпус скруббера, м<sup>3</sup>/час;  $\Delta CO_2$  – поглощенный CO<sub>2</sub>, % объема от расхода ГВС, поступающей в скруббер;  $T$  – время цикла работы макета скруббера, час.

Исходные данные для расчета поглощения углекислого газа даны в таблице 5.

Таблица 5 – Данные для расчета поглощения углекислого газа

Показатель	Значение
Расход ГВС, м <sup>3</sup> /час	420
$\Delta\text{CO}_2$ , % объема	0,076
Расход $\text{CO}_2$ , м <sup>3</sup> /час	0,32
Время работы, час	8,6
Объем поглощенного $\text{CO}_2$ , м <sup>3</sup>	2,74

Произведенный расчет удельных затрат электроэнергии на поглощение 1 м<sup>3</sup> углекислого газа показал, что на поглощение 1 м<sup>3</sup> углекислого газа требуется затратить энергию 1,89 кВт•час = 6,8 МДж. Расчет удельных затрат электроэнергии на поглощение и удаление углекислого газа в жидкости орошения с NaOH проведен по аналогии с вышеизложенным.

Единичный усредненный цикл работы макета скруббера представлен в таблице 6.

Таблица 6 – Единичный усредненный цикл работы макета скруббера

Показатель	Значение
Концентрация $\text{CO}_2$ на входе, % об.	0,3
Снижение концентрации $\Delta\text{CO}_2$ , % об.	0,076
Расход ГВС, м <sup>3</sup> /час	420
Концентрация жидкости орошения (по NaOH) начальная, %	15,0
Концентрация жидкости орошения (по NaOH) конечная, %	10,0
Концентрация реагента (по NaOH), %	46
Объем жидкости орошения начальной, л	300
Объем жидкости орошения конечной, л	308
Объем слитой жидкости орошения, л	130
Объем долитого реагента, л	56
Объем долитой воды, л	66
Общее время, час	13,2

Исходные данные для расчета поглощения углекислого газа даны в таблице 7.

Таблица 7 – Данные для расчета поглощения углекислого газа

Показатель	Значение
Расход ГВС, м <sup>3</sup> /час	420
$\Delta\text{CO}_2$ , % объема	0,076
Расход $\text{CO}_2$ , м <sup>3</sup> /час	0,32
Время работы, час	13,2
Объем поглощенного $\text{CO}_2$ , м <sup>3</sup>	4,2

На основании моделируемых в эксперименте режимов работы скруббера с жидкостью орошения на основе NaOH проведен расчет удельных затрат энергии на поглощение 1 м<sup>3</sup> углекислого газа, который составляет

$$\varepsilon = 1,92 \text{ кВт}\cdot\text{час} = 6,88 \text{ МДж}$$

В рамках построенных моделей циклической работы системы поглощения углекислого газа удельные затраты энергии на поглощение 1 м<sup>3</sup> углекислого газа не превышают

$$\varepsilon = 1,90 - 1,92 \text{ кВт}\cdot\text{час или } 6,80 - 6,88 \text{ МДж.}$$

### Вывод

Анализ представленных материалов показывает, что поглощение углекислого газа с помощью раствора LiOH является наиболее эффективным, так как позволяет решать поставленную задачу при значительно меньшей концентрации раствора. Однако, учитывая стоимость реагентов и их наличие на данном производстве, оба исследованных реагента могут быть рекомендованы к промышленному применению.

### Литература

1. *Гладышев Н.Ф., Гладышева Т.В., Путин Б.В., Путин С.Б.* Известковые поглотители нового поколения. М.: «Спектр», 2012. 136 с.
2. *Кононов А.Н.* Средства регенерации, очистки и газового контроля воздуха. Баку: КВВМУ им. С.М. Кирова, 1981. 495 с.
3. *Страус В.* Промышленная очистка газов. М.: Химия, 1981. 616 с.
4. *Маршак М.Е.* Физиологическое значение углекислоты. М.: Медицина, 1969. 144 с.
5. *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. 638–648.
6. *Громов Ю.Ю., Коршунков Л.А., Матвеев С.В.* К вопросу моделирования процесса регенерации воздуха в замкнутом объеме. М., 1996. 20 с. Деп. в ВИНТИ 1996, № 1957-В96.
7. *Левеницкий О.* Инженерное оформление химических процессов. М.: Химия, 1969. 622 с.
8. *Гумеров А.М.* Математическое моделирование химико-технологических процессов. СПб., «Лань», 2011. 176 с.
9. *Трепвел Б.* Хемосорбция. М.: Химия, 1958. 328 с.
10. *Мельников А.С.* Основы хемосорбции. М.: Наука, 1979. 135 с.
11. *Гладышев Н.Ф., Гладышева Т.В., Дворецкий С.И., Путин С.Б., Ульянова М.А., Ферпонтов Ю.А.* Регенеративные продукты нового поколения: технология и аппаратное оформление. М.: Издательство Машиностроение-1, 2007. 92 с.
12. *Дытнерский Ю.И.* Процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. Часть 2. Массообменные процессы и аппараты. М.: Химия, 1995, 368 с.
13. *Пронин В.А., Молодов М.А., Шпилин Д.И.* Газовоздушные выбросы пищевых предприятий и способы их устранения // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013, №4.
14. *Шпилин Д.И., Пронин В.А.* Повышение эффективности очистки и дезодорации газовоздушных выбросов пищевых предприятий в орошаемых колоннах насадочного типа с полимерной насадкой // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2014. №4.
15. *Цыганков А.В., Пронин В.А., Шпилин Д.И., Алешин А.Е.* Гидродинамический расчет орошаемой колонны с пористыми насадочными телами // Вестник Международной академии холода. 2014. № 2. С. 34–36.

### References

1. Gladyshev N.F., Gladysheva T.V., Putin B.V., Putin S.B. *Izvestkovye poglotiteli novogo pokoleniya*. Moscow, Spektr Publ., 2012. 136 p.
2. Kononov A.N. *Sredstva regeneratsii, ochistki i gazovogo kontrolya vozdukha*. Baku, University Kirova Publ., 1981. 495 p.
3. Straus V. *Promyshlennaya ochistka gazov*. Moscow, Khimiya Publ., 1981, 616 p.
4. Marshak M.E. *Fiziologicheskoe znachenie uglekisloty*. Moscow, Meditsina Publ., 1969, 144 p.
5. Gromov Yu.Yu., Matveikin V.G., Putin B.V. Modelirovanie i upravlenie protsessom regeneratsii vozdukha v germeticheski zamknutom ob"eme. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii*. 1997, V.3, no. 6, pp. 638–648.
6. Gromov Yu.Yu., Korshunkov L.A., Matveev S.V. *K voprosu modelirovaniya protsessa regeneratsii vozdukha v zamknutom ob"eme*. Moscow, 1996, 20 p. Dep. v VINITI 1996, no. 1957-V96.
7. Levenshpil' O. *Inzhenernoe oformlenie khimicheskikh protsessov*. Moscow, Khimiya Publ., 1969, 622 p.
8. Gumerov A.M. *Matematicheskoe modelirovanie khimiko-tekhnologicheskikh protsessov*. St. Petersburg, Lan' Publ., 2011, 176 p.
9. Trepnel B. *Khemosorbtsiya*. Moscow, Khimiya Publ., 1958, 328 p.
10. Mel'nikov A.S. *Osnovy khemosorbtsii*. Moscow, Nauka Publ., 1979, 135 p.
11. Gladyshev N.F., Gladysheva T.V., Dvoret'skii S.I., Putin S.B., Ul'yanova M.A., Ferapontov Yu.A. *Regenerativnye produkty novogo pokoleniya: tekhnologiya i apparaturnoe oformlenie*. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2007, 92 p.
12. Dytnerskii Yu.I. *Protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii: uchebnik dlya vuzov*. Chast' 2. Massoobmennye protsessy i apparaty. Moscow, Khimiya Publ., 1995, 368 p.
13. Pronin V.A., Molodov M.A., Shpilin D.I. Gazovozdushnye vybrosy pishchevykh predpriyatii i sposoby ikh ustraneniya. *Scientific journal NRU ITMO. Series Processes and equipment for food production*. 2013, no. 4.
14. Shpilin D.I., Pronin V.A. Povyshenie effektivnosti ochistki i dezodoratsii gazovozdushnykh vybrosov pishchevykh predpriyatii v oroshaemykh kolonnakh nasadochnogo tipa s polimernoii nasadkoi. *Scientific journal NRU ITMO. Series Processes and equipment for food production*. 2014, no. 4.
15. Tsygankov A.V., Pronin V.A., Shpilin D.I., Aleshin A.E. Gidrodinamicheskii raschet oroshaemoi kolonny s poristymi nasadochnymi telami. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*. 2014, no. 2, pp. 34–36.

Статья поступила в редакцию 27.10.15