

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ИЗВЕСТКОВОГО ХИМИЧЕСКОГО ПОГЛОТИТЕЛЯ НА ЕГО СОРБЦИОННЫЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Ю. А. Суворова^{1,2}, А. А. Тарова^{1,3}, И. В. Рязанов¹

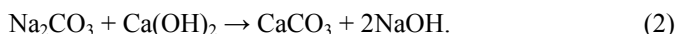
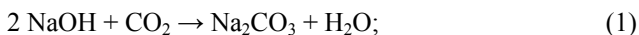
*ОАО «Корпорация «Росхимзащита» (1);
Кафедры: «Природопользование и защита окружающей среды» (2),
«Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность» (3),
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; suvorovaya@mail.ru*

Ключевые слова: активная щелочь; диоксид углерода; известковый химический поглотитель; прочность; сорбционная емкость; хемосорбция.

Аннотация: Экспериментально изучено влияние хемосорбирующих, связующих, влагоудерживающих и порообразующих добавок на сорбционные и прочностные характеристики известкового химического поглотителя, не содержащего активных щелочей. Получены экспериментальные результаты определения сорбционной емкости, скорости хемосорбции, прочности на раздавливание гранул поглотителя. Установлена линейная зависимость сорбционной емкости от прочности. Показана возможность получения известкового химического поглотителя, не содержащего активных щелочей и имеющего высокие сорбционные и прочностные характеристики.

В дыхательных аппаратах изолирующего типа, герметичных спасательных объектах и убежищах, наркозно-дыхательных аппаратах и барокамерах для очистки газо-воздушной среды от диоксида углерода CO₂ широко используются химические поглотители на основе гидроксида кальция – известковые [1]. В России такой поглотитель выпускается под маркой ХП-И, соответствует ГОСТу 6755-88, содержит гидроксиды кальция и натрия, имеет влажность 16 – 21 % и представляет собой гранулы размером 2,8...5,5 мм.

При очистке газо-воздушной среды от CO₂ известковым поглотителем, содержащим гидроксид натрия, происходит процесс хемосорбции с протеканием следующих химических реакций в водном растворе на поверхности гранул:



Активная щелочь в составе химического поглотителя является компонентом, вызывающим коррозию металлических адсорберов, трубопроводов и контейнеров, в которых хранится известковый поглотитель, и может раздражать дыхательные пути человека. В связи с этим актуальным направлением является разработка известкового поглотителя, не содержащего щелочей (гидроксидов натрия, калия, лития), а следовательно безопасного для оборудования и человека при использовании. В свою очередь гидроксид натрия в составе поглотителя, помимо увеличения его активности за счет химического связывания CO₂ на начальной стадии процесса хемосорбции, обеспечивает гигроскопичность и прочность гранул, улучшает их формуемость. Поэтому при исключении NaOH из состава данные функции необходимо компенсировать другими добавками.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния состава известкового химического поглотителя на его сорбционные и прочностные характеристики.

Обзор и анализ научно-технической литературы [2 – 10] показал, что в качестве активных компонентов для очистки газо-воздушной смеси от CO_2 в химических поглотителях, помимо гидроксидов кальция, натрия, калия и лития, используются оксид и гидроксид магния [3], гидроксид бария [4]. Кроме того, для увеличения эффективности очистки воздуха в состав поглотителя вводят добавки, имеющие развернутую пористую структуру и высокую площадь удельной поверхности, например цеолиты [5].

Как было сказано выше, процесс хемосорбции CO_2 известковыми поглотителями протекает при непосредственном участии воды. В случае, когда поглотитель содержит гидроксиды натрия и калия, являющиеся гигроскопичными веществами, проблемы преждевременного его высыхания во время работы не существует. При отсутствии данных компонентов в состав поглотителя необходимо вводить добавки, способствующие поддержанию его влажности на необходимом уровне. К таким добавкам относятся неорганические гидраты, такие как гексагидрат хлорида кальция, гидрат хлорида магния, а также органические вещества – глицерин, пропиленгликоль, полиэтиленгликоль и др. [6 – 8].

Для увеличения прочности гранул в их состав вводят дигидрат сульфата кальция [9]. В качестве связующих компонентов, обеспечивающих формуемость гранул, используют, например, водный раствор карбоксиметилцеллюлозы [6], крахмал [7], силикат натрия [10].

Для получения экспериментальных образцов химического поглотителя в качестве компонентов, хемосорбирующих CO_2 , использовали гидроксид кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ТУ 2611-094-00187895–2000 в виде порошка, гидроксид магния $\text{Mg}(\text{OH})_2$ СТП ТУ КОМП 2-230-10 в виде чешуек, оксид магния MgO PANCREAC-211276 в виде порошка, гидроксид бария 8-водный $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, PANREAC-141188 в виде порошка. В качестве связующих компонентов применяли поливиниловый спирт (**ПВС**) ГОСТ 10779–78 в виде порошка, карбоксиметилцеллюлозу натриевую соль (**КМЦ**) ТУ 2231-002-50277563–2000 в виде порошка, суспензию Ф-4ДВ ТУ 6-05-1246-81, жидкое натриевое стекло ГОСТ 13078–81 и жидкое калиевое стекло ТУ 214512-001-36426080–2014. Для удержания влаги в состав вводили хлорид кальция CaCl_2 ТУ СТП КОМП 2-239-10 и хлорид магния MgCl_2 СТП ТУ КОМП 2-448-11. Для увеличения прочности в состав химического поглотителя вводили дигидрат сульфата кальция, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ГОСТ 3210–77. В качестве компонентов, имеющих развернутую пористую структуру и высокую площадь удельной поверхности, использовали порошок цеолита NaX, кремнезоль Nanosil-30 ТУ 2145-001-36426128–2014 в виде жидкости. Площадь удельной поверхности цеолита составляет 300 – 400 $\text{m}^2/\text{г}$, кремнезоля – 220 – 300 $\text{m}^2/\text{г}$.

Экспериментальные образцы получали экструзионным формованием водной пасты, содержащей исходные компоненты с дальнейшей сушкой и отбором фракции с размером гранул 2,8...5,5 мм. Для устранения влияния формы и размера гранул на физико-химические свойства химического поглотителя, фракционный состав экспериментальных образцов был максимально приближен к аналогу – выпускаемому промышленностью ХП-И.

Влажность готовых гранул составляла (20 ± 2) %. Состав экспериментальных образцов (без учета влаги): № 1 – $\text{Ca}(\text{OH})_2$; № 2 – $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ПВС; № 3 – $\text{Ca}(\text{OH})_2$, КМЦ; № 4 – $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Ф-4ДВ; № 5 – $\text{Ca}(\text{OH})_2$, стекло калиевое; № 6 – $\text{Ca}(\text{OH})_2$, стекло натриевое; № 7 – $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$, ПВС; № 8 – $\text{Ca}(\text{OH})_2$, MgO , ПВС; № 9 – $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Ba}(\text{OH})_2$, ПВС; № 10 – $\text{Ca}(\text{OH})_2$, кремнезоль, ПВС; № 11 – $\text{Ca}(\text{OH})_2$, MgO , ПВС, NaX; № 12 – $\text{Ca}(\text{OH})_2$, MgCl_2 , ПВС; № 13 – $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCl_2 , ПВС; № 14 – $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaSO_4 , ПВС.

Массовая доля гидроксида кальция (без учета влаги) в составе экспериментальных образцов составляла 88 – 100 %, дополнительных поглощающих CO_2 компонентов – 10 %, связующего компонента – 2 – 5 % (что соответствовало формуемости гранул), влагоудерживающих и упрочняющего компонентов – 5 %, цеолита – 2 %, кремнезоля – 10 %.

Экспериментальные исследования сорбционных и прочностных характеристик проводили в сравнении с химическим поглотителем ХП-И.

При исследовании сорбционных характеристик гранулы поглотителя размещали в адсорбере внутренним диаметром 38 мм, высота насыпного слоя гранул составляла 100 мм. В адсорбер подавали поток воздуха влажностью 90 % с объемным расходом газо-воздушной смеси 3,4 $\text{дм}^3/\text{мин}$, при этом объемная доля CO_2 в газо-воздушной смеси составляла 4 %. Экспериментальные условия получены физическим моделированием процесса очистки от CO_2 газо-воздушной смеси, выдыхаемой человеком в аппараты (поглотительные патроны) с ХП-И.

Объем поглощенного в адсорбере CO_2 , дм^3 , находили по формуле

$$V_{\text{CO}_2} = \sum_{t=0}^T V\tau \frac{(C_2 - C_1)}{100 \left(1 - \frac{C_1}{100}\right)}, \quad (1)$$

где T – время окончания эксперимента, мин; V – объемный расход газо-воздушной смеси, $V = 3,4 \text{ дм}^3/\text{мин}$; τ – время работы химического поглотителя, мин; C_1 и C_2 – объемная доля диоксида углерода соответственно на входе и выходе из адсорбера, %.

Эксперимент проводили до достижения объемной доли CO_2 за слоем химического поглотителя на выходе из адсорбера 2 %. Рассчитывали величину сорбционной емкости A , $\text{дм}^3/\text{кг}$,

$$A = \frac{V_{\text{CO}_2}}{M}, \quad (2)$$

где M – масса химического поглотителя в адсорбере, кг.

Прочность гранул на раздавливание P , Н, определяли на приборе ИПГ-1М в соответствии с ГОСТ 21560.2–82. Насыпную плотность $\rho_{\text{нас}}$, $\text{кг}/\text{дм}^3$, определяли методом ручного уплотнения.

Сорбционные и прочностные характеристики экспериментальных образцов химического поглотителя представлены в табл. 1, из которой видно, что образец № 1, состоящий только из гидроксида кальция, имеет невысокую сорбционную емкость, непрочный, кроме того, при его изготовлении гранулы практически не формовались из-за забивания фильер пастой.

Наибольшую сорбционную емкость имеют образцы № 5 и 6, содержащие в качестве добавок калиевое и натриевое стекло ($\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ и $\text{K}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$). Высокая активность данных образцов связана с присутствием в их составе ионов Na^+ и K^+ , которые могут участвовать в процессе хемосорбции CO_2 . Время работы образцов № 5 и 6 до достижения объемной доли CO_2 на выходе из адсорбера 2 % больше, чем у выпускаемого промышленностью ХП-И, тогда как масса поглотителя в адсорбере меньше.

Сорбционную емкость и время работы, сопоставимые с ХП-И, имеют образцы № 2, 8 – 11, содержащие в своем составе ПВС в качестве связующего компонента, оксид магния и гидроксид бария в качестве добавок, активных к CO_2 , а также кремнезоль и цеолит.

На 25 – 45 % ниже сорбционная емкость у образцов, содержащих хлориды кальция и магния и сульфат кальция. Это может быть связано с тем, что в составе данных образцов из-за введения добавок уменьшается массовая доля активного к CO_2 компонента, кроме того, у данных образцов повышенная прочность.

Таблица 1

Сорбционные и прочностные характеристики химического поглотителя

Номер образца	$\rho_{\text{нас}}$, кг/дм ³	M , г	T , мин	V_{CO_2} , дм ³	A , дм ³ /кг	P , Н
1	0,79	89,3	45	4,0	45,2	0,2
2	0,69	78,3	100	9,9	126,4	2,1
3	0,73	83,0	30	3,0	36,5	1,3
4	0,78	88,3	25	2,6	29,2	1,5
5	0,69	78,7	125	12,8	162,2	0,8
6	0,64	72,3	120	12,3	170,1	0,9
7	0,75	85,4	25	2,6	29,9	0,9
8	0,67	76,2	100	10,2	133,1	0,2
9	0,69	78,0	100	10,3	132,2	0,9
10	0,61	69,4	95	10,2	147,4	1,1
11	0,65	73,3	105	9,8	133,1	2,1
12	0,66	74,5	85	9,0	103,6	2,5
13	0,68	77,0	80	7,8	101,2	2,3
14	0,65	73,7	85	8,9	102,0	2,1
ХП-И	0,76	86,5	115	13,0	150,2	2,5

Практически не активными к CO_2 , имеющими низкую сорбционную емкость являются образцы № 3 и 4, содержащие в качестве связующего КМЦ и Ф-42В. Карбоксиметилцеллюлозы натриевая соль является водорастворимым полимером (в том числе, и при температуре эксплуатации поглотителя), Ф-4ДВ вводят в состав поглотителя в виде водной суспензии. Данные компоненты могут увеличивать вязкость водного раствора на поверхности химического поглотителя, при этом коэффициент диффузии CO_2 к поверхности гранулы уменьшается, что влияет на снижение сорбционной емкости. Связующим компонентом, дополнительно увеличивающим сорбционную емкость, является ПВС (состав № 2). Поливиниловый спирт – гидрофильный полимер, который при температуре эксплуатации химического поглотителя не растворяется, но способен задерживать влагу в составе материала, необходимую для процесса хемосорбции CO_2 , как было сказано выше.

Образец № 7, в состав которого вводили $\text{Mg}(\text{OH})_2$ в виде механически измельченных чешуек, также имеет низкую сорбционную емкость, в отличие от образца № 8, в состав которого вводили MgO . Оксид магния в процессе формирования гранул из водной пасты гидратировался с образованием $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Анализ размеров частиц механически измельченных чешуек $\text{Mg}(\text{OH})_2$ и гидратированного MgO показал, что механически измельченный гидроксид магния имеет более неравномерные и крупные частицы, чем гидроксид магния, полученный гидратацией оксида магния (табл. 2). Фракционный состав оказывает прямое влияние на процесс хемосорбции, так как данная реакция протекает на поверхности активной частицы.

Важнейшей характеристикой химических поглотителей, определяющей целесообразность их использования в аппаратах и системах жизнеобеспечения, является скорость хемосорбции v , дм³/(кг·мин). На рисунке 1 представлены кинетические кривые процесса хемосорбции CO_2 для образцов, имеющих сопоставимые с ХП-И сорбционные емкости.

Размер частиц порошка гидроксида магния

Образец	Диапазон размера частиц, мкм	Пик распределения размера частиц	
		размер, мкм	массовая доля частиц, %
Механически измельченный $Mg(OH)_2$	0,476...205,179	5,788...8,271	18,822
Гидратированный MgO	0,862...55,506	3,596...9,316	49,212

Самая высокая скорость хемосорбции (см. рис. 1) на протяжении всего времени эксперимента сохраняется у образцов № 10, в состав которого, помимо $Ca(OH)_2$, входит кремнезоль и ПВС, и № 6, содержащего в качестве добавки натриево стекло. Скорости хемосорбции, сопоставимые с ХП-И, у образцов № 5, 8, 9. У образца № 2, содержащего ПВС, высокая скорость вначале эксперимента быстро снижается в конце его работы. Ниже всех скорость хемосорбции у образца № 11, однако у него самая высокая прочность (табл. 1) из всех образцов, скорости которых представлены на рис. 1.

Наибольшую прочность на раздавливание, сопоставимую с прочностью ХП-И, имеют образцы №№ 2, 11 – 14 (см. табл. 1), в состав которых входят ПВС, NaX , $CaCl_2$, $MgCl_2$, $CaSO_4$. Дополнительно проведенные экспериментальные исследования показали, что с увеличением массовой доли ПВС w , %, в составе образцов увеличивается прочность гранул без существенного уменьшения сорбционной емкости (рис. 2). Данные, представленные на рис. 2, получены для образцов, имеющих в своем составе MgO .

Наименьшая прочность (0,2 Н) у образца № 1, состоящего только из гидроксида кальция и № 8 с MgO и массовой долей ПВС 2 % в составе.

У работоспособных образцов (сорбционная емкость выше $100 \text{ дм}^3/\text{кг}$), содержащих в качестве хемосорбирующего компонента только $Ca(OH)_2$ (№ 2, 5, 6, 10, 12 – 14), наблюдается линейная зависимость сорбционной емкости от прочности (рис. 3). Увеличение прочности гранул приводит к уменьшению их сорбционной

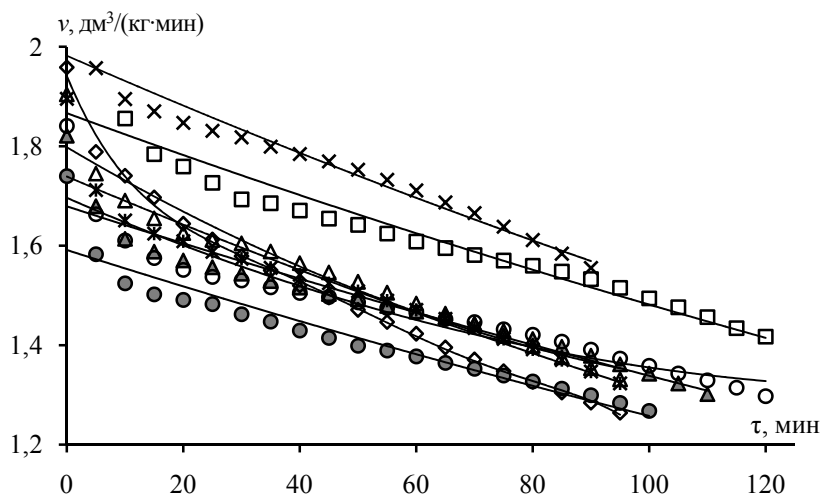


Рис. 1. Кинетические кривые хемосорбции для образцов:

▲ – ХП-И; ◇ – № 2; ○ – № 5; □ – № 6; Δ – № 8; * – № 9; × – № 10; ● – № 11

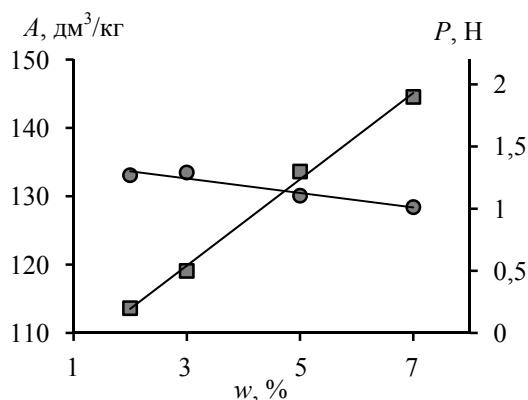


Рис. 2. Зависимость сорбционной емкости и прочности гранул от массовой доли ПВС, w , масс. %

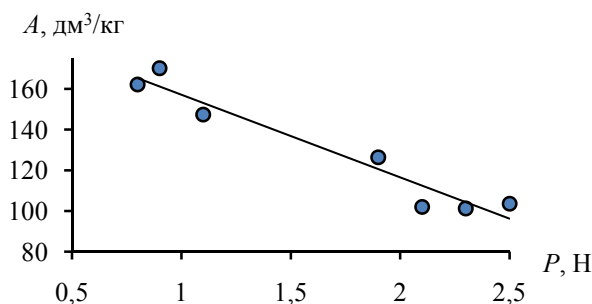


Рис. 3. Зависимость сорбционной емкости от прочности гранул

емкости. Снижение прочности гранул нежелательно в связи с возможностью возникновения пыли, которая приводит не только к раздражению дыхательных путей человека при эксплуатации аппаратов с химическим поглотителем, но и нарушению порозности слоя поглотителя, что ведет к нарушению массообменных процессов при очистке воздуха от CO_2 .

В ходе экспериментальных работ сделаны следующие выводы:

1. Получение известкового химического поглотителя с высокой активностью к CO_2 без использования активных щелочей возможно, при этом добавками, увеличивающими сорбционную емкость, являются натриевое и калиевое стекло, ПВС в качестве связующего, оксид магния, кремнезоль и цеолит NaX.

2. Экспериментально установлено, что добавки хлоридов кальция и магния, сульфата кальция уменьшают сорбционную емкость химического поглотителя на 25 – 45 %.

3. Анализ кинетических кривых показал, что скорость хемосорбции выше чем у ХП-И имеют образцы, содержащие кремнезоль и ПВС, а также натриевое стекло.

4. Введение в состав известкового химического поглотителя MgO значительно уменьшает его прочность на раздавливание. Экспериментально установлено, что прочность гранул с MgO можно увеличить в пределах 0,2...2 Н, увеличивая массовую долю ПВС в диапазоне 2 – 7 %.

5. Экспериментально установлено, что прочность гранул увеличивают также добавки цеолита, хлоридов кальция и магния, сульфата кальция.

6. Показано, что увеличение прочности гранул приводит к уменьшению их сорбционной емкости.

Список литературы

1. Известковые хемсорбенты. Получение. Свойства. применение / Т. В. Гладышева [и др.]. – М. : Издательский дом «Спектр», 2015. – 184 с.
2. Морган, Дж. Э. Клиническая анестезиология : книга 1-я / Дж. Э. Морган, С. М. Мэгид. – Изд. 2-е, испр. – Пер. с англ. – СПб. : Издательство БИНОМ-Невский Диалект, 2001. – 396 с.
3. Пат. 0557182 Япония, МПК А61М16/01, А61М16/22, В01D53/34. Carbon dioxide absorbent. / Kumakura M., Kawai T. – Оpubл. 09.03.1993.
4. Пат. 19740736 ФРГ, МПК А1В01J20/04, С01F11/02, С01F5/14. Respirator lime for use in anaesthetising apparatus / Foerster H. – Оpubл. 18.03.1999.
5. Пат. 2531738 Великобритания, МПК А62В19/00, А61М16/22, А62В19/00. Chemical absorbent / Holder M. J. – Оpubл. 04.05.2016.
6. Пат. 2008110278 Япония, МПК В01J20/04, В01J20/12. Method for producing carbon dioxide absorbing agent / Sato T. H. Sh. – Оpubл. 15.05.2008.
7. Заявка WO 0216027, МПК В01J20/04. Improvements in or relating to carbon dioxide absorbent formulations / Clarke M. J.; Molecular Products Ltd. – Оpubл. 2002.
8. Пат. 2006142280 Япония, МПК А61М16/01, А61М16/22, В01J20/04. Carbon dioxide absorbent / Sato N. I. K. – Оpubл. 08.06.2006.
9. Заявка WO 9823370, МПК В01J20/04. Carbon dioxide absorbent in anaesthesiology / Armstrong; Raymond J., Murray J. – Оpubл. 1998.
10. Пат. 101690883 Китай, МПК А61М16/22, В01J20/04. Medical soda lime nanocomposite reinforcing agent and using method thereof / Haisheng H., Wenjian W., Kui Ch. – Оpubл. 07.04.2010.

The Influence of the Composite Chemical Absorbent on Its Sorption and Performance Characteristics

Yu. A. Suvorova^{1,2}, A. A. Tarova^{1,3}, I. V. Ryazanov¹

*OJSC Corporation Roskhimzashchita (1);
Departaments of Nature Management and Environment Protection (2),
Technological Processes, Devices and Technosphere Safety (3),
TSTU, Tambov, Russia; suvorovaya@mail.ru*

Keywords: calcareous chemical absorber; chemisorption; carbon dioxide; sorption capacity; strength; active alkali.

Abstract: The influence of chemisorbing, binding, moisture-retaining and pore-forming additives on the sorption and strength characteristics of a calcareous chemical absorber containing no active alkalis has been experimentally studied. The experimental results of the determination of the sorption capacity, the rate of chemisorption, and the strength of crushing of the absorber granules are obtained. A linear dependence of the sorption capacity on strength is established. The possibility of obtaining a calcareous chemical absorber that does not contain active alkalis and has high sorption and strength characteristics is shown.

References

1. Gladysheva T.V., Gladyshev N.F., Dvoretzkiy S.I., Suvorova Yu. A. *Izvestko-vyye khemsorbenty. Poluchenije. Svoystva. Primeneniye* [Lime chemisorbents. Receiving. Properties. Application], Moscow: Izdatel'skiy dom «Spektr», 2015, 184 p. (In Russ.)

2. Morgan Dzh.E., Megid S.M. *Klinicheskaya anesteziologiya: kniga 1-ya* [Clinical Anesthesiology: Book 1], St. Petersburg: Izdatel'stvo BINOM-Nevskiy Dialekt, 2001, 396 p. (In Russ.)
 3. Kumakura M., Kawai T. *Carbon dioxide absorbent*, JP, 1993, pat. 0557182.
 4. Foerster H. *Respirator lime for use in anaesthetising apparatus*, FRG, 1999, pat. 19740736.
 5. Holder M. J. *Chemical absorbent*, GB, 2016, pat. 2531738.
 6. Sato T. H. Sh. *Method for producing carbon dioxide absorbing agent*, JP, 2008, pat. 2008110278.
 7. Clarke M. J. *Improvements in or relating to carbon dioxide absorbent formulations*, 2002, application WO 0216027.
 8. Sato N. I. K. *Carbon dioxide absorbent*, JP, 2006, pat. 2006142280.
 9. Raymond J., Murray J. *Carbon dioxide absorbent in anaesthesiology*, 1998, application WO 9823370.
 10. Haisheng H., Wenjian W., Kui Ch. *Medical soda lime nanocomposite reinforcing agent and using method thereof*, CN, 2010, pat. 101690883.
-

Einfluss der kalkchemischen Zusammensetzung des Absorbers auf seine Sorptionsfähigkeit und Festigkeitseigenschaften

Zusammenfassung: Es ist der Einfluss chemisorbierender, bindender, feuchtigkeitszurückhaltender und porenbildender Additive auf die Sorptions- und Festigkeitseigenschaften eines kalkhaltigen chemischen Absorbers, der keine aktiven Alkalien enthält, experimentell untersucht. Experimentelle Ergebnisse der Bestimmung der Sorptionskapazität, der Geschwindigkeit der Chemosorption und der Stärke der Zerkleinerung der Absorbergranalien sind erhalten. Eine lineare Abhängigkeit der Sorptionskapazität von der Festigkeit ist festgestellt. Die Möglichkeit, einen kalkhaltigen chemischen Absorber zu erhalten, der keine aktiven Alkalien enthält und hohe Sorptions- und Festigkeitseigenschaften aufweist, ist gezeigt.

Influence de la composition de l'absorbeur chimique calcaire sur ses caractéristiques de sorption et de résistance

Résumé: Expérimentalement est étudiée l'influence des additifs chimiosorbants, liants, contenant de l'humidité et de la poudre sur les caractéristiques de sorption et de résistance d'un absorbant chimique calcaire ne contenant pas d'alcalis actif. Sont obtenus le résultats expérimentaux de la détermination de la capacité de sorption, de la vitesse de l'hémosorption, de la résistance à l'écrasement des granules de l'absorbant. Est établie une dépendance linéaire de la capacité de sorption de la résistance. Est montrée la possibilité de produire un absorbeur chimique calcaire ne contenant pas d'alcalis actif et ayant des caractéristiques de sorption et de résistance élevées.

Авторы: *Суворова Юлия Александровна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», ФГБОУ ВО «ТГТУ», старший научный сотрудник ОАО «Корпорация «Росхимзащита»; *Тарова Анна Александровна* – инженер ОАО «Корпорация «Росхимзащита», аспирант кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ»; *Рязанов Иван Викторович* – инженер ОАО «Корпорация «Росхимзащита», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.