

КИНЕТИКА АБСОРБЦИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ВОДНЫМ РАСТВОРОМ КАРБОНАТА ЛИТИЯ

Д.И. Ярыкин, Р.С. Гегова, В.Ю. Конюхов

Даниил Игоревич Ярыкин (ORCID 0000-0002-1362-5187)*

Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Ленинский просп., 31, корп. 4, Москва, Российская Федерация, 119071

E-mail: d.yarykin@rambler.ru*

Радостина Стефанова Гегова (ORCID 0000-0003-4869-3371), Валерий Юрьевич Конюхов (ORCID 0000-0002-6128-9413)

Кафедра физической химии, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Миусская площадь, 9, Москва, Российская Федерация, 125047

E-mail: rr_adius696@mail.ru, volkon_1@mail.ru

Исследована кинетика абсорбции (хемосорбции) диоксида углерода водным раствором карбоната лития при температуре 293 К и в интервале давления $8,0 \cdot 10^3 - 3,2 \cdot 10^4$ Па. Отсутствие торможения реакции растворением диоксида углерода, т.е. протекание реакции в кинетической области, доказано проведением экспериментов по установлению зависимости скорости процесса от интенсивности перемешивания раствора: определено напряжение, подаваемое на двигатель мешалки, начиная с которого кинетические кривые поглощения CO_2 сливались друг с другом, т.е. скорость абсорбции CO_2 переставала зависеть от интенсивности перемешивания – достигалась т.н. максимальная скорость абсорбции. Влияние концентрации карбоната лития на скорость абсорбции исследовали при постоянном давлении диоксида углерода $1,6 \cdot 10^4$ Па, было установлено, что начальная скорость реакции практически не зависела от исходной концентрации (нулевой порядок реакции). Однако, по мере накопления продукта реакции происходило ее замедление: нулевой порядок реакции переходил в первый. Зависимость скорости реакции от давления углекислого газа определяли при одинаковой начальной концентрации раствора карбоната лития $0,2027$ М и различном давлении. Установили, что с увеличением давления скорость процесса линейно возрастала – наблюдался первый порядок по диоксиду углерода. Для объяснения найденных закономерностей предложена схема механизма реакции, из которой выведено кинетическое уравнение. Вычислены эффективные константы скорости абсорбции. На основании предложенного механизма реакции объяснено торможение абсорбции продуктом реакции: его добавление смещает абсорбционно-химическое равновесие, снижая тем самым концентрацию ионов водорода. Полученное кинетическое уравнение может служить основой для расчета и оптимизации работы промышленных абсорберов диоксида углерода.

Ключевые слова: абсорбция диоксида углерода, карбонат лития, кинетическое уравнение, порядок реакции, эффективная константа скорости

ABSORPTION KINETICS OF CARBON DIOXIDE BY LITHIUM CARBONATE AQUEOUS SOLUTION

D.I. Yarykin, R.S. Gegova, V.Yu. Konyukhov

Daniil I. Yarykin (ORCID 0000-0002-1362-5187)*

Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the RAS, Leninskiy ave., 31, bldg. 4, Moscow, 119071, Russia

E-mail: d.yarykin@rambler.ru*

Radostina S. Gegova (ORCID 0000-0003-4869-3371), Valeriy Yu. Konyukhov (ORCID 0000-0002-6128-9413)
 Department of Physical Chemistry, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Miusskaya sqr.,
 9, Moscow, 125047, Russia
 E-mail: volkon_1@mail.ru, rr_adius696@mail.ru

The kinetics of absorption (chemisorption) of carbon dioxide by an aqueous solution of lithium carbonate at a temperature of 293 K and in the pressure range $8.0 \cdot 10^3 - 3.2 \cdot 10^4$ Pa was studied. Lack of inhibition of the reaction by dissolving carbon dioxide, i.e. the occurrence of the reaction in the kinetic region was proven by conducting experiments to establish the dependence of the process rate on the intensity of stirring the solution. The voltage supplied to the stirrer motor was determined, starting from which the kinetic curves of CO_2 absorption merged with each other, i.e. the rate of CO_2 absorption ceased to depend on the intensity of mixing - the so-called maximum absorption rate. The effect of lithium carbonate concentration on the absorption rate was studied at a constant carbon dioxide pressure of $1.6 \cdot 10^4$ Pa. It was found that the initial reaction rate was practically independent on the initial concentration (zero order reaction). However, as the reaction product accumulated, it slowed down: the zero order of the reaction passed into the first. The dependence of the reaction rate on carbon dioxide pressure was determined at the same initial concentration of lithium carbonate solution 0.2027 M and different pressures. It was found that with increasing pressure the rate of the process increased linearly. First order on carbon dioxide concentration was observed. To explain the observed patterns, a diagram of the reaction mechanism is proposed, from which the kinetic equation was derived. The effective absorption rate constants were calculated. Based on the proposed reaction mechanism, the inhibition of absorption by the reaction product is explained. Its addition shifts the absorption-chemical equilibrium, thereby reducing the concentration of hydrogen ions. The resulting kinetic equation can serve as the basis for calculating and optimizing the operation of industrial carbon dioxide absorbers.

Key words: carbon dioxide absorption, lithium carbonate, kinetic equation, reaction order, effective rate constant

Для цитирования:

Ярыкин Д.И., Гегова Р.С., Конюхов В.Ю. Кинетика абсорбции диоксида углерода водным раствором карбоната лития. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2024. Т. 67. Вып. 1. С. 60–66. DOI: 10.6060/ivkkt.20246701.6823.

For citation:

Yarykin D.I., Gegova R.S., Konyukhov V. Yu. Absorption kinetics of carbon dioxide by lithium carbonate aqueous solution. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 1. P. 60–66. DOI: 10.6060/ivkkt.20246701.6823.

ВВЕДЕНИЕ

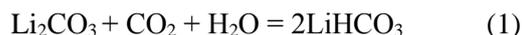
Широкое распространение в промышленности получили процессы извлечения из газовых смесей углекислого газа [1-2], который может использоваться как сырье для химических синтезов, например, для получения карбамида.

Процессы абсорбции CO_2 из газовой фазы предъявляют противоречивые требования к свойствам хемосорбентов. С одной стороны, предпочтительно их сильное сродство к CO_2 и высокая поглощательная способность, но с другой стороны, чем выше эти показатели, тем труднее проходит регенерация хемосорбента и тем выше расход энергии на осуществление процесса в целом.

Из промышленных хемосорбентов наибольшей емкостью обладает моноэтаноламин, но его растворы имеют высокую коррозионную активность.

Широко распространен метод абсорбции углекислого газа раствором щелочи. Скорость реакции определяется стадией взаимодействия диоксида углерода и гидроксильных ионов. При избытке ионов OH^- можно считать, что реакция имеет псевдопервый порядок.

Известным абсорбентом является водный раствор поташа K_2CO_3 , но его применение ограничено тем обстоятельством, что продукт реакции – гидрокарбонат калия в 3,3 раза менее растворим, чем исходный карбонат, что приводит к выпадению осадка в ходе абсорбции. Растворы поташа к тому же коррозионно активны. В этой связи перспективным поглотителем двуокиси углерода может служить система $\text{H}_2\text{O}-\text{Li}_2\text{CO}_3$ [3]. При пропускании двуокиси углерода через водную суспензию Li_2CO_3 происходит ее растворение вследствие образования более растворимого гидрокарбоната лития по уравнению:



Образующийся гидрокарбонат лития LiHCO_3 менее устойчив по сравнению с гидрокарбонатами других щелочных металлов: он легко разлагается при нагревании его раствора с выделением Li_2CO_3 , регенерируя тем самым исходный абсорбент. Простотой регенерации и обусловлен интерес к применению именно карбоната лития в качестве перспективного поглотителя CO_2 .

В литературе имеется множество работ, посвященных поглощению CO_2 водными растворами гидроксидов и карбонатов щелочных или щелочноземельных металлов, а также растворами различных аминов. В большинстве из них, например, [4-25] обсуждаются технологические особенности процесса и его моделирование, в некоторых работах [26, 27] изучена кинетика процесса, а также вопросы межфазного массообмена при хемосорбции диоксида углерода растворами щелочи с применением мембранного микробарботажного аппарата [15]. Кинетика поглощения углекислого газа водными растворами карбоната лития ранее не исследовалась.

Поэтому данная работа посвящена исследованию кинетики абсорбции CO_2 водными растворами карбоната лития как основы для использования его в качестве хемосорбента.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Опыты проводили при 293 К на установке, позволяющей исследовать кинетику абсорбции CO_2 при постоянном давлении P_{CO_2} газа в интервале $8,0 \cdot 10^3$ - $3,2 \cdot 10^4$ Па (точность поддержания давления $\pm 9 \cdot 10^2$ Па). Давление измеряли деформационным мембранным вакуумметром фирмы Vernier (США), подключенным к компьютерной измерительной системе. Время считывания сигнала в каждом опыте составляло 1/1000 от общей продолжительности процесса и задавалось автоматически.

Абсорбером служил конический стеклянный стакан с притертой пробкой, в который помещали водный раствор Li_2CO_3 заданной начальной концентрации $C_{\text{Li}_2\text{CO}_3} = 0,2027$ М. Перемешивание производили с помощью магнитной мешалки.

Для экспериментов использовали порошкообразные Li_2CO_3 и LiHCO_3 квалификации ХЧ («Химспектр»). Диоксид углерода подавали в реактор из баллона [29].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения области протекания процесса (диффузионная или кинетическая) провели серию экспериментов при постоянном давлении диоксида углерода ($P_{\text{CO}_2} = 1,6 \cdot 10^4$ Па) с раствором

карбоната лития с концентрацией $C_{\text{Li}_2\text{CO}_3} = 0,2027$ М при различной скорости вращения мешалки. Было установлено, что при скоростях вращения мешалки, соответствующих напряжению $U > 35$ В, подаваемом на двигатель мешалки, точки кинетических кривых поглощения CO_2 практически сливались друг с другом, т.е. скорость абсорбции CO_2 переставала зависеть от интенсивности перемешивания. Это свидетельствовало об отсутствии торможения реакции растворением CO_2 в жидкости, т.е. лимитирующей стадией являлась химическая реакция между раствором карбоната лития и растворенным CO_2 . Все последующие опыты проводили при напряжении $U = 45$ В.

Для исследования влияния концентрации продукта на скорость протекания реакции к раствору одной и той же начальной концентрации Li_2CO_3 добавляли различные количества гидрокарбоната лития.

Установили, что с увеличением концентрации LiHCO_3 скорость процесса замедляется, т.е. продукт тормозит реакцию. Предварительно можно предположить, что влияние продукта обусловлено высаливающим эффектом, т.е. снижением равновесной концентрации CO_2 в растворе.

При постоянном давлении $P_{\text{CO}_2} = 1,6 \cdot 10^4$ Па исследовали зависимость скорости реакции от начальной концентрации карбоната лития. Результаты представлены на рис. 1.

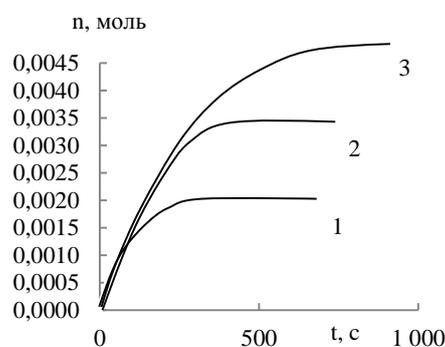


Рис. 1. Зависимость количества поглощенного углекислого газа от времени процесса при постоянном давлении CO_2 и различных концентрациях Li_2CO_3 в растворе: 1 – 0,0675 М, 2 – 0,135 М, 3 – 0,2027 М

Fig. 1. Dependence of the amount of absorbed carbon dioxide on the process time at a constant pressure of CO_2 and various concentrations of Li_2CO_3 solution: 1 – 0.0675 M, 2 – 0.135 M, 3 – 0.2027 M

Видно, что при малых временах реакции скорость практически не зависит от исходной концентрации карбоната лития: на начальном участке кривые группируются вдоль одной линии (нулевой порядок реакции). Однако, далее кинетические кривые по мере протекания процесса расходятся, т.е.

накопление LiHCO_3 в растворе приводит к замедлению реакции. По этой причине имеет смысл определять порядок реакции n не по концентрации Li_2CO_3 , а по отношению концентраций $\left(\frac{C_{\text{Li}_2\text{CO}_3}}{C_{\text{LiHCO}_3}}\right)^n$.

С этой целью, учитывая стехиометрию реакции, кривые рис.1 преобразовали в кинетические кривые вида $C_{\text{Li}_2\text{CO}_3} = f(t)$. Путем их дифференцирования вычислили скорость реакции r при различном времени t и $C_{\text{Li}_2\text{CO}_3}$. Концентрацию LiHCO_3 рассчитывали, исходя из материального баланса реакции.

Оказалось, что при всех исследованных начальных концентрациях Li_2CO_3 полученные данные группируются вдоль прямых. Это означает, что скорость реакции пропорциональна отношению концентраций $\left(\frac{C_{\text{Li}_2\text{CO}_3}}{C_{\text{LiHCO}_3}}\right)^n$ с порядком реакции n , равным 1.

Для исследования зависимости скорости реакции от давления углекислого газа опыты проводили при одинаковой начальной концентрации раствора карбоната лития $C_{\text{Li}_2\text{CO}_3} = 0,2027 \text{ M}$ и различном давлении CO_2 над ним. Наблюдали, что с увеличением давления скорость процесса возрастает (рис. 2).

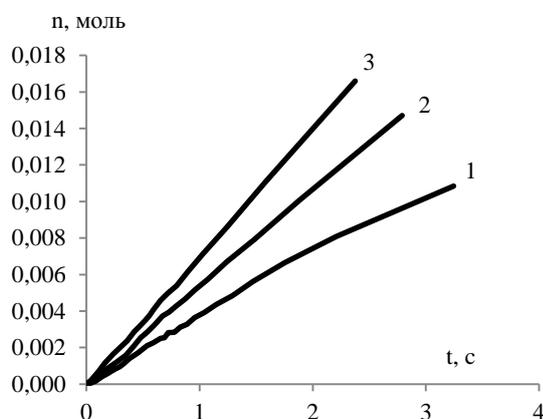


Рис. 2. Зависимость количества поглощенного углекислого газа от времени процесса при концентрации Li_2CO_3 в растворе 0,2027 M и при различных давлениях CO_2 : 1 – 120 мм рт. ст., 2 – 180 мм рт. ст., 3 – 240 мм рт. ст.

Fig. 2. Dependence of the amount of absorbed carbon dioxide on the process time at a constant concentration of Li_2CO_3 solution and various pressures of CO_2 : 1 – 120 mm Hg, 2 – 180 mm Hg, 3 – mm Hg

Для определения порядка реакции по CO_2 полученные кинетические кривые преобразовали в зависимости вида $C_{\text{Li}_2\text{CO}_3} = f(t)$. Графическим дифференцированием последних вычислили скорость

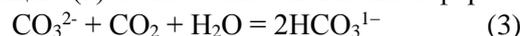
реакции r при различных t и давлениях CO_2 . Полученные результаты дали линейную зависимость r от $\left(\frac{C_{\text{Li}_2\text{CO}_3}}{C_{\text{LiHCO}_3}}\right)$ с различными угловыми коэффициентами β при различных давлениях P_{CO_2} . Оказалось, что вычисленные значения β в координатах $\beta = f(P_{\text{CO}_2})$ группируются вдоль прямой, это свидетельствует о первом порядке реакции по CO_2 .

С учетом установленных порядков реакции по компонентам эмпирическое кинетическое уравнение реакции имеет вид:

$$r = k_{\text{эфф}} \frac{C_{\text{Li}_2\text{CO}_3}}{C_{\text{LiHCO}_3}} C_{\text{CO}_2}, \quad (2)$$

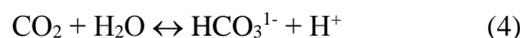
где $k_{\text{эфф}}$ – эффективная константа скорости реакции.

Полученное уравнение и кинетические закономерности процесса можно объяснить следующей схемой механизма реакции. Все соли, участвующие в реакции (1) – сильные электролиты, диссоциирующие полностью на ионы в водных растворах. Тогда реакцию (1) можно записать в ионной форме:

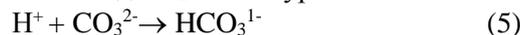


Далее вместо концентраций солей $C_{\text{Li}_2\text{CO}_3}$ и C_{LiHCO_3} будут фигурировать концентрации соответствующих ионов в форме $[\text{CO}_3^{2-}]$ и $[\text{HCO}_3^{1-}]$.

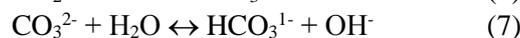
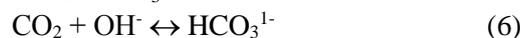
Реакция (3) сложная, она складывается из нескольких элементарных стадий, ее возможные стадии:



Образующийся ион H^+ взаимодействует с растворенным в воде Li_2CO_3 по уравнению:



Возможна также реакция растворенного в воде CO_2 с ионом OH^- , образующимся в результате гидролиза аниона CO_3^{2-} :



В отсутствие в воде растворенного карбоната лития имеет место только реакция (4), которая протекает быстро, но равновесие сильно смещено в сторону исходных веществ (рН раствора слабо отличается от 7). Гидролиз (7) протекает неглубоко и вклад реакции (6) в накопление в растворе ионов HCO_3^{1-} пренебрежимо мал. Следовательно, лимитирующей стадией процесса абсорбции (3) является стадия (5) – растворенные в воде ионы CO_3^{2-} медленно взаимодействуют с образовавшимися в реакции (4) ионами H^+ , которые в отсутствие CO_3^{2-} давали бы в воде ионы гидроксония H_3O^+ . При этом равновесие реакции (4) по мере связывания H^+ смещается вправо.

Тогда скорость всего процесса равна:

$$r = k_5 [H^+] [CO_3^{2-}] \quad (8)$$

Применяя метод стационарных концентраций, можно получить уравнение для концентрации ионов H^+ :

$$[H^+] = \frac{k_4 [CO_2] [H_2O]}{k_5 [CO_3^{2-}] + k_{-4} [HCO_3^{1-}]}$$

Индексы при константах скоростей k обозначают номера стадий 4 – 7. Тогда, учитывая (8), получаем кинетическое уравнение процесса абсорбции (уравнение 9):

$$r = \frac{k_5 k_4 [CO_2] [H_2O] [CO_3^{2-}]}{k_5 [CO_3^{2-}] + k_{-4} [HCO_3^{1-}]} \quad (9)$$

При достаточно высоких концентрациях $[HCO_3^{1-}]$ (начиная с которых кривые на рис. 1 расходятся), принимая во внимание медленность стадии (5), можно записать:

$$k_5 [CO_3^{2-}] \ll k_{-4} [HCO_3^{1-}], \quad (10)$$

Учитывая условие (10), из (9) получаем кинетическое уравнение, аналогичное эмпирическому (2):

$$r = \frac{k_5 k_4 [H_2O] [CO_3^{2-}]}{k_{-4} [HCO_3^{1-}]} [CO_2] \quad (11)$$

При этом $k_{эфф} = \frac{k_5 k_4 [H_2O]}{k_{-4}} = k_5 K_4 [H_2O]$, где

K_4 – константа равновесия стадии 4.

Становится понятным механизм торможения абсорбции CO_2 добавленным $LiHCO_3$ – он смещает абсорбционно-химическое равновесие (4), снижая тем самым концентрацию ионов H^+ . Торможение происходит по аналогии со смещением адсорбционно-химического равновесия в двухстадийных гетерогенно-каталитических реакциях, например, реакции синтеза аммиака, когда добавляемый аммиак тормозит реакцию [25].

Уравнение (9) позволяет объяснить найденный в эксперименте нулевой порядок по Li_2CO_3 при низких концентрациях $[HCO_3^{1-}]$ (когда точки на рис. 1 еще группируются вдоль единой кривой). Действительно, в этом случае можно принять, что $k_5 [CO_3^{2-}] \gg k_{-4} [HCO_3^{1-}]$, тогда:

$$r = k_4 [H_2O] [CO_2]$$

Т.е. при малых $[HCO_3^{1-}]$ полученное уравнение (9) предполагает нулевой порядок по Li_2CO_3 и первый по CO_2 , что и имеет место в экспериментах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филимонова О.Н., Викулин А.С., Енютина М.В., Иванов А.В. Влияние входной температуры на изотермическую очистку газа от монопримеси неподвижным слоем адсорбента. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 9. С. 88. DOI: 10.6060/ivkkt.20206309.6247.

Зная скорости абсорбции при различных концентрациях Li_2CO_3 , $LiHCO_3$ и давлении CO_2 , можно определить эффективную константу скорости $k_{эфф}$ по уравнению (2). Концентрации диоксида углерода вычислили по константе Генри $K_H = 6,127 \cdot 10^{-3}$ дм³·Па·моль⁻¹ при 293 К. В таблице приведены результаты определения $k_{эфф}$ при различных начальных концентрациях Li_2CO_3 .

Таблица

Эффективные константы скорости $k_{эфф}$ уравнения (2) при различных начальных концентрациях Li_2CO_3
Table. Effective rate constants $k_{эфф}$ of equation (2) at various concentrations of Li_2CO_3

$C_{Li_2CO_3}$, М	$k_{эфф}$, с ⁻¹
0,0675	0,669±0,005
0,135	0,620±0,004
0,203	0,588±0,003

Согласно расчетным данным, значения $k_{эфф}$ близки друг к другу даже при столь широком варьировании концентраций реагентов. Некоторое снижение эффективной константы с ростом $[CO_3^{2-}]$ также можно объяснить представленным механизмом процесса. Действительно, $k_{эфф} = k_5 K_4 [H_2O]$, тогда с увеличением концентрации карбоната лития, снижается концентрация воды, что и уменьшает константу скорости.

ВЫВОДЫ

Исследована кинетика абсорбции двуокиси углерода водными растворами карбоната лития при различных его концентрациях и давлениях CO_2 . На основании предложенного механизма процесса получено эмпирическое кинетическое уравнение. Торможение хемосорбции диоксида углерода образующимся или искусственно добавленным гидрокарбонатом лития происходит вследствие смещения абсорбционно-химического равновесия раствора CO_2 в воде.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

REFERENCES

1. Filimonova O.N., Vikulin A.S., Enyutina M.V., Ivanov A.V. Inlet temperature influence on isothermal gas cleaning from mono-impurities by fixed layer of adsorbent. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim.*

2. **Филимонова О.Н., Викулин А.С., Енютина М.В., Хорват О.В.** Модель кинетики адсорбционной очистки атмосферного воздуха гранулами цеолита NaX при неизотермических условиях. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 64. Вып. 12. С. 17. DOI: 10.6060/ivkkt.20216412.6393.
3. **Рамазанов А.Ш., Атаев Д.Р., Каспарова М.А.** Получение карбоната лития высокого качества из литийсодержащих природных рассолов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 4. С. 52. DOI: 10.6060/ivkkt.20216404.6238.
4. **Яцук А.Е., Гарипов В.К.** Анализ методов очистки воздуха от двуокси углерода с применением жидких поглотителей. *Вестн. Моск. госуд. универ. приборостроен. и информ. Серия: Приборостроен. и информ. технол.* 2009. № 22. С. 72.
5. **Новицкий Э.Г., Василевский В.П., Васильева В.И., Голева Е.А., Грушевенко Е.А., Волков А.В.** Влияние состава и структуры водных растворов моноэтаноламина на процессы сорбции и десорбции диоксида углерода при очистке газовых смесей. *Журн. приклад. химии*. 2018. Т. 91. № 5. С. 700. DOI: 10.1134/S1070427218050129.
6. **Юсубов Ф.В., Мансуров Э.Ф.** Пути интенсификации процесса сорбции CO₂ из дымовых газов. *Вест. науки и образов.* 2017. Т. 1. № 7 (31). С. 8. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-7-63-67.
7. **Юсубов Ф.В., Мансуров Э.Ф.** Выделение диоксида углерода из дымовых газов. *Нефтеперераб. и нефтехим. Науч.-техн. дост. и передовой опыт*. 2018. № 8. С. 35.
8. **Юсубов Ф.В., Мансуров Э.Ф.** Исследование и проектирование процесса адсорбционного выделения CO₂ из дымовых газов. *Экология и пром-сть России*. 2020. Т. 24. № 7. С. 63-67. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-7-63-67.
9. **Ануфриков Ю.А., Куранов Г.Л., Смирнова Н.А.** Растворимость CO₂ и H₂S в водных растворах, содержащих алканол амины (обзор). *Жур. приклад. химии*. 2007. Т. 80. № 4. С. 529. DOI: 10.1134/S1070427207040015.
10. **Ежова Н.Н., Сударева С.В.** Современные методы очистки дымовых газов тепловых электростанций от диоксида углерода. *Теплоэнергетика*. 2009. № 1. С. 14.
11. **Нижник А.Е., Паранук А.А., Хрисониди В.А.** Совершенствование установки очистки газов от диоксида углерода. *Оборуд. и технол. для нефтегаз. компл.* 2018. № 3. С. 36. DOI: 10.30713/1999-6934-2018-3-36-38.
12. **Зиганшина Р.Р., Голубина Е.И., Харьков В.В., Николаев А.Н.** Математическое моделирование процесса поглощения диоксида углерода из дымовых газов. *Вестн. технол. универ.* 2017. Т. 20. № 9. С. 85.
13. **Терпугов Д.Г., Акинин Н.И., Монахов А.А.** Исследование процессов улавливания углекислого газа щелочными растворами в трубчатой колонне. *Успехи в химии и хим. технол.* 2017. Т. 31. № 13 (194). С. 81.
14. **Акимов В.В., Дмитриев Е.А., Трушин А.М.** Исследование массообмена при хемосорбции CO₂ в мембранном микробарботажном аппарате. *Теорет. основы хим. техн.* 2011. Т. 45. № 6. С. 621. DOI: 10.1134/S0040579511060017.
15. **Иванова М.С., Вишнецкая М.В., Томский К.О.** Каталитическая очистка газовых выбросов от CO₂. *Вестн. сев.-вост. Фед. Ун-та им. М.К. Амосова*. 2019. № 1(69). С. 24 – 31. DOI: 10.25587/SVFU.2019.69.25522.
16. **Новицкий Э.Г., Баженов С.Д., Волков А.В.** Оптимизация методов очистки газовых смесей от диоксида углерода (обзор). *Нефтехимия*. 2021. Т. 61. № 3. С. 291-310. DOI: 10.31857/S0028242121030011.
17. **Повтарев И.А., Блиничев В.Н., Чагин О.В.** Экспериментальное исследование процесса адсорбции CO₂. *Tekhnol.* 2020. V. 63. N 9. P. 88 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206309.6247.
2. **Filimonova O.N., Vikulin A.S., Enyutina M.V., Khorvat O.V.** Model of kinetics of adsorption purification of atmospheric air by zeolite NaX granules under non-isothermal conditions. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 12. P. 17 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216412.6393.
3. **Ramazanov A.Sh., Ataev D.R., Kasparova M.A.** Obtaining high quality lithium carbonate from natural lithium-containing brines. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 4. P. 52 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216404.6238.
4. **Yatsuk A.E., Garipov V.K.** Analysis of methods for air purification from carbon dioxide using liquid absorbers. *Vestn. Moskov. Gos. Univer. Priborostroen. Inform. Ser.: Priborostroen. Inform. Tekhnol.* 2009. N 22. P. 72 (in Russian).
5. **Novitsky E.G., Vasilevsky V.P., Vasilyeva V.I., Goleva E.A., Grushevenko E.A., Volkov A.V.** The effect of the composition and structure of aqueous solutions of monoethanolamine on the processes of sorption and desorption of carbon dioxide during the purification of gas mixtures. *Zhurn. Priklad. Khim.* 2018. V. 91. N 5. P. 700 (in Russian). DOI: 10.1134/S1070427218050129.
6. **Yusubov F.V., Mansurov E.F.** Ways to intensify the process of CO₂ absorption from flue gases. *Vestn. Nauki Obrazov.* 2017. V. 1. N 7 (31). P. 8 (in Russian). DOI: 10.18412/1816-0395-2020-7-63-67.
7. **Yusubov F.V., Mansurov E.F.** Emission of carbon dioxide from flue gases. *Neftepereerab. Neftekhim. Nauch.-Tekhn. Dost. Peredovoy Opyt*. 2018. N 8. P. 35 (in Russian).
8. **Yusubov F.V., Mansurov E.F.** Research and design of the process for the absorption of CO₂ from flue gases. *Ekologiya Prom-st' Rossii*. 2020. V. 24. N 7. P. 63-67 (in Russian). DOI: 10.18412/1816-0395-2020-7-63-67.
9. **Anufrikov Yu.A., Kuranov G.L., Smirnova N.A.** Solubility of CO₂ and H₂S in aqueous solutions containing alkanolamines (review). *Zhurn. Priklad. Khim.* 2007. V. 80. N 4. P. 529 (in Russian). DOI: 10.1134/S1070427207040015.
10. **Yezhova N.N., Sudareva S.V.** Modern methods for cleaning flue gases of thermal power plants from carbon dioxide. *Teploenergetika*. 2009. N 1. P. 14 (in Russian).
11. **Nizhnik A.E., Paranuk A.A., Hrisonidi V.A.** Improving the installation of carbon dioxide gas purification. *Oborud. Tekhnol. Neftegaz. Kompl.* 2018. N 3. P. 36 (in Russian). DOI: 10.30713/1999-6934-2018-3-36-38.
12. **Ziganshina R.R., Golubina E.I., Kharkov V.V., Nikolaev A.N.** Mathematical modeling of the process of absorption of carbon dioxide from flue gases. *Vestn. Tekhnol. Univer.* 2017. V. 20. N 9. P. 85 (in Russian).
13. **Terpugov D.G., Akinin N.I., Monkhov A.A.** Investigation of carbon dioxide capture by alkaline solutions in a tubular column. *Uspekhi Khim. Khim. Tekhnol.* 2017. V. 31. N 13 (194). P. 81 (in Russian).
14. **Akimov V.V., Dmitriev E.A., Trushin A.M.** Investigation of mass transfer during the chemisorption of CO₂ in a membrane microbubbling apparatus. *Teoret. Osnovy Khim. Tekhnol.* 2011. V. 45. N 6. P. 621 (in Russian). DOI: 10.1134/S0040579511060017.
15. **Ivanova M.S., Vishnetskaya M.V., Tomskiy K.O.** Catalytic clearing of das emissions from CO₂. *Vestn. Sev.-Vost. Fed. Un-ta im. M.K. Amosova*. 2019. N 1(69). P. 24 – 31 (in Russian). DOI: 10.25587/SVFU.2019.69.25522.
16. **Novitskiy E.G., Bazhenov S.D., Volkov A.V.** Optimization methods of carbon dioxide gas purification (review).

- Совр. наукоем. технол. Регион. прилож.* 2018. № 4(56). С. 58–65.
18. Дружинин К.Е., Васюнина Н.В., Немчинова Н.А., Гильманшина Т.Р. Очистка отходящих газов печей спекания с использованием подшламовой воды в качестве газоочистного раствора. *Экология и пром-сть России*. 2020. Т. 24. № 3. С. 4–9. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-3-4-9.
 19. Гармашов А.С., Терпугов Д.Г., Акинин Н.И. Усовершенствование способа улавливания диоксида углерода в поглотительной установке. *Усп. химии и хим. технологии*. 2016. Т. 30. № 8 (177). С. 24–25.
 20. Голубева И.А., Дашкина А.В., Шульга И.В. Актуальные проблемы аминовой очистки природных газов, анализ и пути решения. *Нефтехимия*. 2020. Т. 60. № 1. С. 51–56. DOI: 10.31857/S0028242120010086.
 21. Сивцова О.Н., Еременко С.И., Деревщиков В.С., Веселовская Ж.В. Кинетика поглощения углекислого газа из воздуха в проточном реакторе с неподвижным слоем сорбента на основе K_2CO_3 . *ЖФХ*. 2017. Т. 91. № 5. С. 807–813. DOI: 10.7868/S0044453717050247.
 22. Старкова А.В., Бакиров Н.Г., Махоткин А.Ф., Сахаров Ю.Н. Исследование закономерностей механизма и кинетики хемосорбции углекислого газа водными растворами аммиака. *Вестн. технол. ун-та*. 2021. Т. 24. № 7. С. 59–63.
 23. Деревенщиков В.С., Казакова Е.Д., Веселовская Ж.В., Яценко Д.А., Козлов Д.В. Закономерности поглощения CO_2 известковым сорбентом в проточном адсорбере. *ЖФХ*. 2021. Т. 95. № 7. С. 1095–1100. DOI: 10.1134/S0036024421070098.
 24. Ахметова В.Р., Смирнов О.В. Улавливание и хранение диоксида углерода – проблемы и перспективы. *Башкир. хим. журн.* 2020. Т. 27. № 3. С. 103–115. DOI: 10.17122/bcj-2020-3-103-115.
 25. Самонин В.В., Зотов А.С., Спиридонова Е.А., Подвызников М.Л. Влияние параметров газовой среды на эффективность работы поглотителей диоксида углерода. *ЖПХ*. 2017. Т. 90. № 1. С. 38–44. DOI: 10.1134/S1070427217010062.
 26. Чжао Чжо. Кинетика карбонизации безводного гидроксида лития и его моногидрата. М.: Химия. 2005. 363 с.
 27. Суворова Ю.А., Тарова А.А. Кинетика хемосорбции диоксида углерода композиционным поглотителем в замкнутом объеме. *ЖФХ*. 2019. Т. 93. № 4. С. 536–538. DOI: 10.1134/S0044453719040265.
 28. Темкин М.И. Кинетика реакций, включающих адсорбционно-химические равновесия. *Кинетика и катализ*. 1967. Т. VIII. Вып. 5. С. 1005.
 29. Пожаров В.Н., Чащин В.А., Конюхов В.Ю. Кинетика поглощения CO_2 водным раствором карбоната лития. В сб. науч. тр. VIII Междунар. науч. конф. «Химическая термодинамика и кинетика» (28 мая – 01 июня 2018. Тверь). С. 292 – 293.
 30. *Нефтехимия*. 2021. V. 61. N 3. P. 291–310 (in Russian). DOI: 10.31857/S0028242121030011.
 17. Povtarev I.A., Blinichev V.N., Chagin O.V. Experimental study of the process of CO_2 absorption. *Sovr. Naukoem. Tekhnol. Region. Prilozh.* 2018. N 4(56). P. 58–65 (in Russian).
 18. Druzhinin K.E., Vasyunina N.V., Nemchinova N.V., Gilmanshina T.R. Exhaust gases purification of sintering furnaces using under-sludge water as a gas cleaning solution. *Ekologiya Prom-st' Rossii*. 2020. V. 24. N 3. P. 4–9 (in Russian). DOI: 10.18412/1816-0395-2020-3-4-9.
 19. Garmashov A.S., Terpugov D.G., Akinin N.I. Improving the method of capturing carbon dioxide in an absorption plant. *Usp. Khim. Khim. Tekhnol.* 2016. V. 30. N 8 (177). P. 24–25 (in Russian).
 20. Golubeva I.A., Dashkina A.V., Shulga I.V. Demanding Problems of Amine Treating of Natural Gas: Analysis and Ways of Solution. *Нефтехимия*. 2020. V. 60. N 1. P. 51–56 (in Russian). DOI: 10.31857/S0028242120010086.
 21. Sivtsova O.N., Eremenko S.I., Derevshchikov V.S., Veselovskaya J.V. Kinetics of carbon dioxide absorption from air in a flow reactor with a fixed bed of K_2CO_3 -based sorbent. *Zhurn. Fiz. Khim.* 2017. V. 91. N 5. P. 807–813 (in Russian). DOI: 10.7868/S0044453717050247.
 22. Starkova A.V., Bakirov N.G., Makhotkin A.F., Saharov Yu.N. Investigation of the interaction of CO_2 and NH_3 in the gaseous phase. *Vestn. Tekhnol. Un-ta*. 2021. V. 24. N 7. P. 59–63 (in Russian).
 23. Derevenshchikov V.S., Kazakova E.D., Veselovskaya J.V., Yatsenko D.A., Kozlov D.V. Patterns of CO_2 Absorption by a Calciferous Sorbent in a Flow Adsorber. *Zhurn. Fiz. Khim.* 2021. V. 95. N 7. P. 1095 – 1100 (in Russian). DOI: 10.1134/S0036024421070098.
 24. Akhmetova V.R., Smirnov O.V. Carbon dioxide capture and storage problems and perspectives. *Bashkir. Khim. Zhurn.* 2020. V. 27. N 3. P. 103–115 (in Russian). DOI: 10.17122/bcj-2020-3-103-115.
 25. Samonin V.V., Zotov A.S., Spiridonova E.A., Podvyaznikov M.L. Effect of gas environment parameters on operation efficiency of chemical absorbents of carbon dioxide. *Zhurn. Prikl. Khim.* 2017. V. 90. N 1. P. 38–44 (in Russian). DOI: 10.1134/S1070427217010062.
 26. Zhao Zho. Kinetics carbonization of anhydrous lithium hydroxide and its monohydrate. М.: Khimiya. 2005. 363 p. (in Russian).
 27. Suvorova Y.A., Tarova A.A. Kinetics of Carbon Dioxide Chemisorption by a Composite Absorbent in a Closed Volume. *Zhurn. Fiz. Khim.* 2019. V. 93. N 4. P. 536–538 (in Russian). DOI: 10.1134/S0044453719040265.
 28. Temkin M.I. Kinetics of reactions involving adsorption-chemical equilibria. *Kinet. Katal.* 1967. V. VIII. N 5. P. 1005 (in Russian).
 29. Pozharov V.N., Chashchin V.A., Konyukhov V.Yu. Kinetics of CO_2 absorption by a water solution of lithium carbonate. In the collection of scientific works of the VIII International Scientific Conference "Chemical thermodynamics and Kinetics" (May 28 - June 01, 2018. Tver). P. 292 – 293 (in Russian).

Поступила в редакцию (Received) 22.02.2023

Принята к опубликованию (Accepted) 22.05.2023