

УДК 66.074.371

*К.В. Степова, к.т.н. (Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,  
katyastepova@gmail.com)*

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АДСОРБЦІЇ H<sub>2</sub>S З ПРОМИСЛОВИХ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ НА FE-МОДИФІКОВАНОМУ БЕНТОНІТІ

Шляхом хімічного модифікування глини з відвалів видобутку сірки отримано новий адсорбент гідрогенсульфіду. Визначено хімічний склад адсорбента та розраховано площу питомої поверхні за методом Брунауера, Еммета і Тейлора (БЕТ). На основі спостережень за зміною швидкості поглинання гідроген сульфід сорбентом в умовах незмінної концентрації його у газі запропоновано механізм хемосорбції, який складається із двох стадій, що пов'язано з наявністю зовнішньої та внутрішньої поверхні поглинання. У статті наведено математичні моделі та опис механізму хемосорбції на Fe-вмісному бентоніті.

**Ключові слова:** хемосорбція, гідроген сульфід, модифікований бентоніт, ферумвмісний адсорбент.

*Е.В. Степовая*

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АДСОРБЦИИ H<sub>2</sub>S ИЗ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ НА FE-МОДИФИЦИРОВАННОМ БЕНТОНИТЕ

Посредством химического модифицирования глины с отвалов добычи серы получен новый адсорбент сероводорода. Определен химический состав адсорбента и рассчитана площадь удельной поверхности по методу Брунауэра, Эммета и Тейлора (БЭТ). На основании наблюдений за изменением скорости поглощения гидроген сульфида сорбентом в условиях неизменной концентрации его в газе предложен механизм хемосорбции, который состоит из двух стадий, что связано с наличием внешней и внутренней поверхности поглощения. В статье приведены математические модели и описание механизма хемосорбции на Fe-содержащем бентоните.

**Ключові слова:** хемосорбция, гидроген сульфид, модифицированный бентонит, ферумсодержащий адсорбент.

*K.V. Stepova*

## MATHEMATICAL MODEL OF H<sub>2</sub>S ADSORPTION FROM INDUSTRIAL WASTE GASES ON FE-MODIFIED BENTONITE

New H<sub>2</sub>S adsorbent was synthesized by chemical modifying of the bentonite from the sulfur mining dumps. Chemical composition analysis and Brunauer–Emmett–Teller (BET) surface area analysis were carried out. According to investigations of H<sub>2</sub>S sorption rate under constant concentration in gas flow chemisorption mechanism was identified. It consists of two stages caused by availability of external and internal surface of adsorption. In this paper mathematical models and chemisorption mechanism description are presented.

**Keywords:** chemisorption; hydrogen sulfide; modified bentonite; iron-containing adsorbent.

**Постановка проблеми.** Гідроген сульфід (H<sub>2</sub>S) є одним із найпоширеніших забрудників, що потрапляють в атмосферу з викидами промислових підприємств. Він є

побічним продуктом таких виробництв як шкіряне, текстильне, хімічна промисловість.

Адсорбційні методи вилучення гідроген сульфідів із газових потоків дозволяють досягнути високого ступеня очищення (до 99,9 %). Основним для успішного застосування таких методів є вибір доступного і дешевого адсорбенту, вивчення механізму сорбційного поглинання, технологічне оформлення процесів, яке б відповідало основам сорбції кислих газів. Виникає необхідність у створенні нових ефективних матеріалів із широким спектром властивостей на основі дешевої сировини, якою можуть бути природні мінерали. Проте вони поступаються за сорбційними характеристиками існуючим аналогам, тому з метою поліпшення сорбційних властивостей їх піддають хімічному модифікуванню [1-7]. Отже, актуальним завданням є створення нових ефективних сорбційних матеріалів на основі модифікованих природних мінералів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** В наш час глини використовуються не тільки для виробництва кераміки, будматеріалів, у паперових покриттях та наповнювачах, бурових розчинах, медпрепаратах, а і як адсорбенти, каталізатори, іонообмінники тощо в залежності від їх специфічних властивостей [8]. Найчастіше як адсорбенти та каталізатори використовують кислотно активовані глини або їх катіонообмінні форми [1, 9].

Вперше активовані кислотою глини були впроваджені у промисловість у 1915 році, коли оброблений 30% сірчаною кислотою монтморилоніт почали застосовувати як каталізатор крекінгу нафтових фракцій [10]. Кислотна активація глин є ефективним методом глибокого впливу на структуру і хімічний склад глинистих мінералів [11].

В наш час проводяться численні дослідження з метою розробки ефективних та високоселективних сорбційних матеріалів на основі стовпчастих глин, модифікованих катіонами різних металів [6, 7, 12]. Зокрема, для створення сорбентів гідрогенсульфіду до складу стовпчастих глин вводять катіони d-металів [6,7]. Дослідження показали, що таким чином значно збільшується адсорбційна здатність монтморилоніту щодо  $H_2S$ , який вловлюється завдяки хімічній реакції і фіксується на поверхні у формі сульфідів металів.

Аналіз наукової інформації свідчить про перспективність широкого використання сорбентів на основі кислотно- та лужноактивованих або хімічно модифікованих природних мінералів, зокрема для поглинання гідрогенсульфіду із газових потоків.

Мета роботи полягає у дослідженні процесу хімічної адсорбції гідроген сульфідів глинистими мінералами модифікованими ферум (III) хлоридом та розробці математичної моделі для прогнозування поглинальних властивостей синтезованого сорбента.

#### **Виклад основного матеріалу.**

Для одержання поглинаючої маси використовували карбонатомісну бентонітову глину Язівського родовища сірки (Львівська область, Україна). На основі аналізу хімічного складу

сірих язівських глин встановлено [13], що в них переважають бентонітові компоненти, зокрема монтморилоніт (45-50 %), що володіє здатністю до значного набухання завдяки своїй структурі і має чітко виражені сорбційні властивості, а також каолініт, гідрослюда тощо. Вміст карбонатів кальцію та магнію є досить високим (до 20% мас.).

Модифіковану ферумвмісну бентонітову глину одержували шляхом обробки карбонатомісної бентонітової глини ферум(II) хлоридом при кімнатній температурі. При цьому відбувається руйнування карбонатної складової з виділенням CO<sub>2</sub> та осадженням на глинистій матриці еквівалентної кількості гідролізованих нерозчинних форм феруму(II).

Елементний аналіз зразків природної та модифікованої глини здійснювали на атомно-абсорбційному спектрофотометрі Hitachi Z-5300. Результати наведено у табл.1.

**Таблиця 1**

*Результати атомно-абсорбційної спектроскопії*

	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Fe <sup>2+</sup>
Природна глина	3,99%	0,33%	1,12%
Fe-вмісна глина	0,89%	0,18%	4,54%

Питому поверхню визначали за допомогою порозиметра Micromeritics ASAP 2010 шляхом адсорбції азоту при температурі 77 К. Результати наведено у табл.2.

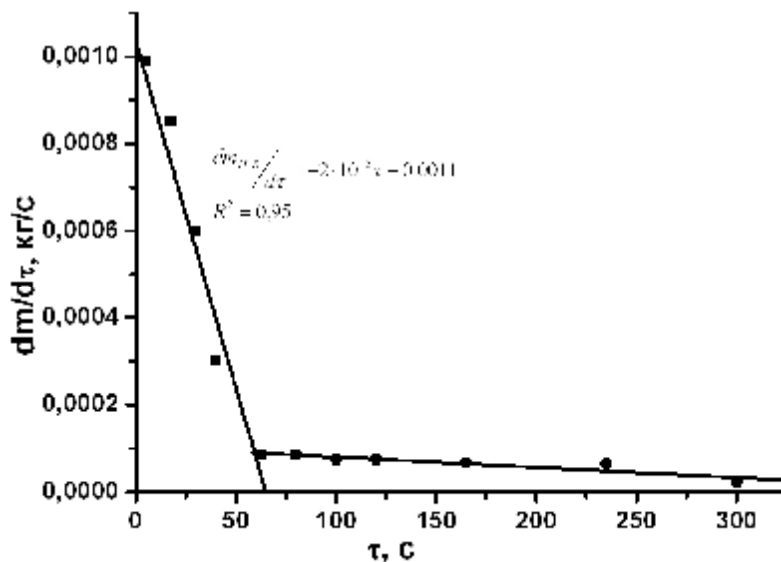
**Таблиця 2**

*Площа питомої поверхні природної глини та модифікованих зразків виміряна за методом BET*

Адсорбент	Площа питомої поверхні, (м <sup>2</sup> г <sup>-1</sup> )	Відсоток зміни поверхні, %
Природна глина	26	-
Fe-вмісна глина: до сорбції	69	86,4
відпрацьована	9,4	

Як видно з табл. 2, хімічне модифікування приводить до збільшення питомої поверхні зразку. Проте значення питомої поверхні модифікованого зразка всеодно залишається невеликим, а отже відсоток фізичної адсорбції в ньому є незначним. Значне зменшення питомої поверхні після насичення зразку воднем сульфідом пояснюється утворенням елементарної сірки, що акумулюються у порах, спричиняючи значне зменшення питомої поверхні.

Кінетику процесу хімічної адсорбції вивчали на дослідній установці описаній у [14]. На основі отриманих результатів побудовано графік залежності швидкості поглинання  $H_2S$  від часу в умовах незмінної концентрації  $H_2S$  у газі та при сталому тиску і температурі. Графік наведено на рис. 1.



*Рис. 1. Графік зміни швидкості поглинання гідрогенсульфіду ферумвмісним сорбентом у часі*

Для цілей дослідження кінетики процесу було зроблено ряд припущень: 1) твердий сорбент є частинкою кулеподібної форми; 2) концентрація гідрогенсульфіду по всій поверхні частинки є однаковою та незмінною, а тому фактором зовнішньої дифузії можна знехтувати.

З рис. 1 видно, що процес поглинання можна розділити на два етапи. Спочатку швидкість поглинання є великою, оскільки процес лімітується тільки швидкістю гетерогенного процесу між гідрогенсульфідом та ферум(III) гідроксидом, нанесеним на поверхню зерна. З часом на поверхні сорбента кількість активних центрів зменшується і реакція переміщується у пори, тому процес сповільнюється. Отже, на другому етапі поглинання лімітується внутрішньою дифузійною адсорбата у порах.

Перший етап поглинання протікає у кінетичній області і описується рівнянням швидкості гетерогенного процесу:

$$\left( \frac{dm_{H_2S}}{dt} \right)_{\max} = k \cdot F_{0\text{зов.}} \cdot C_{H_2S}^j, \quad (1)$$

де  $\left( \frac{dm_{H_2S}}{dt} \right)_{\max}$  — швидкість поглинання  $H_2S$  у початковий момент сорбції, кг/с;  $k$  — коефіцієнт швидкості процесу, м/с;  $F_{0\text{зов.}}$  — площа умовно зовнішньої поверхні адсорбента,

яка складається із зовнішньої поверхні зерна та легкодоступних для гідрогенсульфіду поверхневих макропор, до початку сорбції,  $m^2$ ;  $C_{H_2S}$  — об'ємна масова концентрація гідрогенсульфіду в потоці, що склала  $1,15 \text{ кг/м}^3$ ;  $j$  – порядок реакції. Прямолінійний характер зміни  $\left(\frac{dm_{H_2S}}{dt}\right)$  на першому етапі поглинання свідчить про те, що показник степені  $j = 1$ .

Умовно зовнішня поверхня зерна  $F_{0зоб.}$  визначається кількістю наявних активних центрів, а отже є пропорційною масі нанесеного Феруму:

$$\frac{F_{0зоб.}}{F_{\Sigma}} = \frac{m(Fe)_{0зоб.}}{m(Fe)_{\Sigma}}, \quad (2)$$

$F_{\Sigma}$  — загальна площа поверхні поглинач,  $m^2$ ;  $m(Fe)_{0зоб.}$  — маса Феруму на зовнішній поверхні поглинач, кг;  $m(Fe)_{\Sigma}$  — загальна маса нанесеного Феруму, кг.

Загальна площа поверхні поглинач складає  $69 \text{ м}^2/\text{г}$  (табл. 2). Загальну масу Fe в 1 г сорбента визначали методом атомно-абсорбційної спектrophотометрії (табл.1). Вона складає  $45,4 \cdot 10^{-6} \text{ кг}$ .

В залежності від часу сорбції буде змінюватись і площа умовно зовнішньої поверхні  $F_{зоб.}$ . Беручи до уваги встановлену лінійну залежність:

$$\frac{dm_{H_2S}}{dt} = -at + b, \quad (3)$$

рівняння (1) можна записати:

$$-at + b = kF_{зоб.} C_{H_2S}. \quad (4)$$

Звідси

$$F_{зоб.} = \frac{-at + b}{kC_{H_2S}}. \quad (5)$$

З виразу (1) знаходимо:

$$kC_{H_2S} = \left(\frac{dm_{H_2S}}{dt}\right)_{\max} \cdot \frac{1}{F_{0зоб.}}. \quad (6)$$

Підставляючи вираз (6) у рівняння (5) одержуємо:

$$F_{зоб.} = \frac{(-at + b) \cdot F_{0зоб.}}{\left(\frac{dm_{H_2S}}{dt}\right)_{\max}}. \quad (7)$$

Тоді коефіцієнт залежності умовно зовнішньої поверхні від часу сорбції  $a$  дорівнює:

$$a = \frac{(-at + b)}{\left(\frac{dm_{H_2S}}{dt}\right)_{\max}} \quad (8)$$

Отже, площу умовно зовнішньої поверхні  $F_{зov.}$  у будь-який момент часу можна визначити із залежності:

$$F_{зov.} = aF_{0зov.} \quad (9)$$

Масу феруму на зовнішній поверхні поглинача визначали за кількістю гідрогенсульфіду, що поглинається за реакцією. Оскільки на першій стадії може максимально поглинутись приблизно  $23 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$  газу із об'ємною часткою гідрогенсульфіду 0,9, то  $m(\text{Fe})_{0зov.} = 31,05 \cdot 10^{-6} \text{ кг}$ . За співвідношенням (2) розраховали  $F_{0зov.} = 46,05 \text{ м}^2$ .

Із рівняння (1) можна визначити коефіцієнт швидкості гетерогенного процесу

$$k = \left(\frac{dm_{H_2S}}{dt}\right)_{\max} / F_{0зov.} \cdot C_{H_2S}^j \quad (10)$$

З рівняння прямої знаходимо, що при  $t \rightarrow 0$   $\left(\frac{dm_{H_2S}}{dt}\right)_{\max} \approx 0,001 \text{ кг} / \text{с}$ . Тоді

$$k = 0,001 / 46,05 \cdot 1,15 = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ м} / \text{с}$$

Перевірку адекватності моделі здійснювали за допомогою t-критерію. Оскільки  $t < t(0,95; 3)$ , то модель є адекватною і її можна використовувати для визначення швидкості поглинання гідрогенсульфіду сорбентом на основі бентонітових глин, модифікованих ферум(III) хлоридом, в залежності від наявної питомої поверхні поглинача.

### **Визначення коефіцієнта внутрішньої дифузії**

Другий етап поглинання відбувається у внутрішньодифузійній області, у якій швидкість внутрішньої дифузії є значно меншою від швидкості гетерогенного процесу. Разом з тим можна передбачити пошарову хемосорбцію гідрогенсульфіду, враховуючи високу активність ферумвмісного комплексу. Математично його можна описати за допомогою другого закону Фіка у сферичній системі координат з граничними умовами першого роду. Для даного випадку хемосорбції концентрація на поверхні частинки відповідає концентрації в об'ємі газової фази  $C_{H_2S}$ , тому цей випадок граничних умов відноситься до першого роду [15].

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} = D^* \left( \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial C}{\partial r} \right), 0 \leq r \leq R \\ C(r=R, t) = C_{H_2S} \\ C(r, t=0) = 0 \\ \left( \frac{\partial C}{\partial r} \right)_{r=0} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

де  $C$  – концентрація гідрогенсульфіду у порах в будь-який момент часу  $\tau$  на будь-якій відстані від зовнішньої поверхні частинки,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\tau$  – час, с;  $D^*$  – коефіцієнт внутрішньої дифузії,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $r$  – біжучий радіус, м;  $R$  – радіус частинки, що в нашому випадку складає  $0,75 \cdot 10^{-3}$  м.

Розв'язок системи подаємо для середнього значення концентрації  $\text{H}_2\text{S}$  у твердій частинці сорбента [15]:

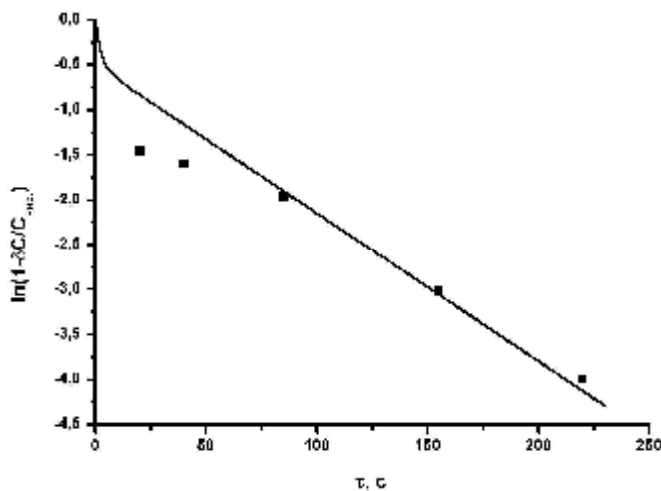
$$\frac{\bar{C}}{C_{нас.}} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6}{p^2 n^2} \cdot e^{-p^2 n^2 \frac{D^* t}{R^2}}, \quad (12)$$

де  $\bar{C}$  – середня концентрація гідроген сульфїду у порах,  $\text{кг/м}^3$ ;  $C_{нас.}$  – концентрація гідроген сульфїду в адсорбенті у момент його насичення,  $\text{кг/м}^3$ .

При високих значеннях  $\tau$  членами  $n \geq 2$  можна знехтувати, залишивши лише перший член (область регулярного режиму). Після логарифмування виразу (12) для  $n = 1$  отримаємо:

$$\ln \left( 1 - \frac{\bar{C}}{C_{нас.}} \right) = \ln \frac{6}{p^2} - p^2 \frac{D^* t}{R^2} \quad (13)$$

Для визначення коефіцієнта внутрішньої дифузії  $D^*$  експериментальні дані представили у вигляді графічної залежності  $\ln \left( 1 - \frac{\bar{C}}{C_{нас.}} \right) = f(t)$  (рис. 2).



**Рис. 2.** Залежність  $\ln(1 - \bar{C}/C_{нас.}) = f(t)$  для визначення коефіцієнту внутрішньої дифузії

Отримані точки апроксимували прямою лінією. Коефіцієнт дифузії ( $D^*$ ) визначали за тангенсом кута нахилу прямої до осі абсцис.

$$\operatorname{tg} a = 0,0165 = p^2 \frac{D^*}{R^2}; \quad D^* = 9,4 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2 / \text{с}.$$

Перевірку адекватності моделі здійснювали, як і в попередньому випадку, за допомогою t-критерію. Оскільки  $t < t(0,95; 4)$ , то модель є адекватною і її можна використовувати для визначення швидкості поглинання гідроген сульфїду сорбентом на основі бентонітових глин, модифікованих ферум(III) хлоридом, в залежності від часу.

**Висновки.** Запропонована математична модель дозволяє встановити час до повного насичення сорбента, що у свою чергу дає змогу вибрати оптимальні умови для процесу очищення газових викидів від гідрогенсульфїду синтезованим сорбційним матеріалом.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Jiang J.-Q. Comparison of modified montmorillonite adsorbents Part II: The effects of the type of raw clays and modification conditions on the adsorption performance / Jia-Qian Jiang, Zhiqiang Zeng // *Chemosphere*. - 2003. - № 53. - P. 53–62.
2. Adib F. Adsorption/Oxidation of Hydrogen Sulfide on Nitrogen-Containing Activated Carbons/ Adib F., Bagreev A., Bandosz T.J.// *Langmuir*. - 2000. - № 16. - p. 1980-1986.
3. Bahranowski K. Influence of doping with copper on the texture of pillared montmorillonite catalysts / K. Bahranowski, A. Kielski, E.M. Serwicka, E. Wisla-Walsh, K. Wodnicka // *Microporous and Mesoporous Materials*. - 2000. - № 41. - P. 201-215.
4. Dorado F. Copper ion-exchanged and impregnated Fe-pillared clays. Study of the influence of the synthesis conditions on the activity for the selective catalytic reduction of NO with C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> / Fernando Dorado, Antonio de Lucas, Prado B. Garcia, Amaya Romero, Jose' L. Valverde // *Applied Catalysis A: General*. - 2006. - № 305. - P. 189–196.
5. Altunlu M. Effect of OH<sup>-</sup>/Al<sup>3+</sup> and Al<sup>3+</sup>/clay ratios on the adsorption properties of Al-pillared bentonites / Mujde Altunlu, Saadet Yapar // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. - 2007. - № 306. - P. 88–94.
6. Nguyen-Thanh D. Effect of Transition-Metal Cations on the Adsorption of H<sub>2</sub>S in Modified Pillared Clays/ Danh Nguyen-Thanh, Teresa J Bandosz // *J. Phys. Chem. B*. - 2003. - №107. - P. 5812-5817.
7. Zhu H. Controlled Doping of Transition Metal Cations in Alumina Pillared Clays/ Zhu H.Y., Zhu Z.H., Lu G.Q.// *J. Phys. Chem. B*. - 2000. - №104. - p. 5674-5680.



8. Ayari F. Characterization of bentonitic clays and their use as adsorbent / F. Ayari, E. Srasra, M. Trabelsi-Ayadi // *Desalination*. - 2005. - № 185. - P. 391–397.
9. Sandeep R. C. Industrial applications of acid-treated clays as catalysts / Sandeep R. Chitnis, Man Mohan Sharma // *Reactive & Functional Polymers*. - 1997. - № 32. - P. 93-115
10. Приходько Р. В. Приготування та властивості каталізаторів на основі синтетичних глин: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.01 / Приходько Роман Вікторович. – НТУУ “Київський політехнічний інститут”, К., 2002. — 191 с.
11. Lenarda M. Solid acid catalysts from clays: Preparation of mesoporous catalysts by chemical activation of metakaolin under acid conditions/ M. Lenarda, L. Storaro, A. Talon, E. Moretti, P. Riello // *Journal of Colloid and Interface Science*. - 2007. - № 311. - P. 537-543.
12. Nguyen-Thanh D. Adsorption of hydrogen sulfide on montmorillonites modified with iron/ Nguyen-Thanh D., Block K., Vadosz T.J.// *Chemosphere*. - 2005. - № 59. - p. 343-353.
13. Даценко, Н.М. Литолого-минералогическая характеристика глинистых пород Язовского серного месторождения / Н.М. Даценко, Д.Б. Кузьма. – Львов, 1988. – 33 с. – Деп. в УкрНИИТИ 22.06.1988, № 1584 – Ук88.
14. Степова К.В. Механізм та математична модель хемосорбції сірководню на модифікованому бентоніті / Степова К.В., Мовчан І.О. // *Екологічна безпека*. – 2012 (13). – № 1. – С. 85-89.
15. Лыков А.В. Теория теплопроводности – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

## REFERENCES

1. Jiang J.-Q. Comparison of modified montmorillonite adsorbents Part II: The effects of the type of raw clays and modification conditions on the adsorption performance / Jia-Qian Jiang, Zhiqiang Zeng // *Chemosphere*. - 2003. - № 53. - P. 53–62.
2. Adib F. Adsorption/Oxidation of Hydrogen Sulfide on Nitrogen-Containing Activated Carbons/ Adib F., Bagreev A., Vadosz T.J.// *Langmuir*. - 2000. - № 16. - p. 1980-1986.
3. Bahranowski K. Influence of doping with copper on the texture of pillared montmorillonite catalysts / K. Bahranowski, A. Kielski, E.M. Serwicka, E. Wisla-Walsh, K. Wodnicka // *Microporous and Mesoporous Materials*. - 2000. - № 41. - P. 201-215.
4. Dorado F. Copper ion-exchanged and impregnated Fe-pillared clays. Study of the influence of the synthesis conditions on the activity for the selective catalytic reduction of NO with C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> / Fernando Dorado, Antonio de Lucas, Prado B. Garcia, Amaya Romero, Jose´ L. Valverde // *Applied Catalysis A: General*. - 2006. - № 305. - P. 189–196.
5. Altunlu M. Effect of OH<sup>-</sup>/Al<sup>3+</sup> and Al<sup>3+</sup>/clay ratios on the adsorption properties of Al-pillared bentonites / Mujde Altunlu, Saadet Yapar // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng.*

Aspects. - 2007. - № 306. - P. 88–94.

6. Nguyen-Thanh D. Effect of Transition-Metal Cations on the Adsorption of H<sub>2</sub>S in Modified Pillared Clays/ Danh Nguyen-Thanh, Teresa J Bandosz // J. Phys. Chem. B. - 2003. - №107. - P. 5812-5817.

7. Zhu H. Controlled Doping of Transition Metal Cations in Alumina Pillared Clays/ Zhu H.Y., Zhu Z.H., Lu G.Q.// J. Phys. Chem. B. - 2000. - №104. - p. 5674-5680.

8. Ayari F. Characterization of bentonitic clays and their use as adsorbent / F. Ayari, E. Srasra, M. Trabelsi-Ayadi // Desalination. - 2005. - № 185. - P. 391–397.

9. Sandeep R. C. Industrial applications of acid-treated clays as catalysts / Sandeep R. Chitnis, Man Mohan Sharma // Reactive & Functional Polymers. - 1997. - № 32. - P. 93-115

10. Prihod'ko, R.V. (2002). "Preparation and properties of catalysts based on synthetic clays" Thesis for Cand.Sc. (Engineering). 05.17.01, National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine.

11. Lenarda M. Solid acid catalysts from clays: Preparation of mesoporous catalysts by chemical activation of metakaolin under acid conditions/ M. Lenarda, L. Storaro, A. Talon, E. Moretti, P. Riello // Journal of Colloid and Interface Science. - 2007. - № 311. - P. 537-543.

12. Nguyen-Thanh D. Adsorption of hydrogen sulfide on montmorillonites modified with iron/ Nguyen-Thanh D., Block K., Bandosz T.J.// Chemosphere. - 2005. - № 59. - p. 343-353.

13. Datsenko, N. and Kuzma, D. (1988), *Litologo-mineralogicheskaya kharakteristika glinistykh porod Yazovskogo sernogo mestorozhdeniya* [Lithologic-and-mineralogical characteristics of Yaziv sulfur deposit clay], Deposited in UkrNIINTI. 1584, Yk88.

14. Stepova, K.V., Movchan, I.O. (2012), "Mechanism and mathematical model of hydrogen sulfide chemisorption on modified bentonite", *Ecological safety*, vol. 1, no. 13, pp. 85-89.

15. Lykov, A.V. (1967), *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conduction], Vyshaya shkola, Moscow, Russia.