

УДК 622.691.24

ОЦІНКА ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ПРИВИБІЙНОЇ ЗОНИ ПЛАСТІВ ПІДЗЕМНИХ СХОВИЩ ГАЗУ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ВОДНЮ

Отримано 7 вер. 2021; рекомендовано до публікації 21 бер. 2022.
Доступно онлайн 2 трав. 2022

Ю. П. Морозов¹, О. В. Бачеріков²,
Н. В. Ніколаєвська³

Автор для кореспонденції: Олександр Бачеріков
e-mail: geotherm@ukr.net

У статті представлено аналіз особливостей експлуатації підземного сховища газу та зроблено оцінку можливості використання вітчизняного досвіду для потреб підземного зберігання водню. З цією метою досліджено основні фактори, що впливають на фільтраційні параметри приви́бійної зони пласта свердловин у процесі експлуатації підземного сховища газу. Встановлено, що при нагнітанні газу в підземне сховище відбувається техногенне забруднення колектора компресорною оливою і твердими частинками, що потрапляють у приви́бійну зону пласта разом із газом. Тверда фаза, як показали наступні дослідження, в основному представлена магнітоактивними високодисперсними частинками продуктів корозії та ерозії металів, облаштування свердловин й експлуатаційного обладнання. Компресорна олива, потрапляючи в ПЗП, знижує фазову проникність для газу, а тверді частинки викликають кольматацию фільтраційних каналів колектора. Для відновлення проникності ПЗП досліджено ефективні розчини ПАР для очищення пористого пласта від компресорної оливи й кислотні композиції для розчинення магнітоактивних частинок і декольматации фільтраційних каналів. Запропонована технологія очищення приви́бійної зони пласта обробкою активними кислотними розчинами при апробації показала високу ефективність. Розроблена технологія має практичне значення і для підземного сховища водню, оскільки основні фактори, що впливають на продуктивність свердловин, є спільними для підземного зберігання газу і водню. Експериментальні дослідження і накопичений досвід підтверджують, що як геологічні об'єкти для зберігання газу доцільно використовувати пористі водонасичені пласти, або пласти-колектори виснажених нафтогазових покладів, над якими залягають пласти – покрівлі зі щільної породи. Бібл. 5, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: підземне зберігання водню, підземні сховища газу, продуктивність свердловин, приви́бійна зона, техногенне забруднення.

¹ д-р техн. наук, Інститут відновлюваної енергетики НАН України, м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-1632-9735>

² канд. техн. наук, Інститут відновлюваної енергетики НАН України, м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-0939-8804>

³ мол. наук. співроб., Інститут відновлюваної енергетики НАН України, м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-9997-4627>

EVALUATION OF THE APPLICATION OF THE BOTTOM BOREHOLE ZONE FORMATIONS OF UNDERGROUND GAS STORAGE FOR HYDROGEN STORAGE

Received 7 Sep. 2021; accepted 21 March 2022.
Available online 2 May 2022

Y. Morozov¹, O. Bacherikov², N. Nikolaievskaya³

Author for correspondence Oleksandr Bacherikov
e-mail: geotherm@ukr.net

The article presents an analysis of the peculiarities of the exploitation of the underground gas storage system, and an assessment of the flexibility of the current supply for the consumption of underground water supply. At the same time, the main factors have been detected, which are used to inject gas into the filter parameters of the pre-shaped zone and the formation of the upper holes in the process of exploitation of the subterranean groove. It has been established that when gas is pumped underground, the technogenic obstruction of the collector with compressor olive oil and solid particles is added to the reservoir zone with gas. The technol-

¹ head of the Department of Geothermal Energy of the Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, DScTech, senior researcher
<https://orcid.org/0000-0003-1632-9735>

² researcher at the Department of Geothermal Energy of the Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0939-8804>

³ junior researcher of the department Institute of Renewable Energy of National Academy of Sciences of Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9997-4627>

ogy of purification of the pre-vibration zone and the formation by means of filthy active acid breaks has been promoted, during testing it has shown a high efficiency. The developed technology is of practical importance for underground hydrogen storage, as the main factors affecting the productivity of wells are common to underground storage of gas and hydrogen. Experimental studies and accumulated experience confirm that it is possible to use porous water-saturated formations or reservoirs of flooded oil and gas deposits as geological objects for gas storage. Ref. 5, table 2, fig. 4.

Keywords: underground storage of hydrogen, underground gas storage, well productivity, perimeter zone, technogenic pollution.

Перелік використаних скорочень та позначень:

ПСВ – підземне сховище водню

ПСГ – підземне сховище газу

ПЗП – привибійна зона пласта

ПАР – поверхнева активна речовина

Вступ. З розширенням сфери застосування водню та збільшення його виробництва зростає актуальність проблеми зберігання значних об'ємів цього газу.

У світовій практиці з 1916 року розпочато зберігання великих об'ємів природного газу в підземних сховищах. Значна частина набутого за цей час досвіду успішно використовується при вирішенні проблем зберігання водню.

Основні дослідження проблем підземного зберігання водню були завершені в 1979 році Інститутом газових технологій США [1]. Заключний звіт підтвердив економічну й технічну доцільність будівництва підземних сховищ водню (ПСВ). Наприклад, у Франції у м. Бейнс компанія Gaz de France експлуатує підземне сховище водню об'ємом 300 млн м³, яке створене у водоносному пористому пласті [2].

Згідно з техніко-економічною оцінкою методів зберігання великої кількості водню підземне зберігання на два порядки дешевше, ніж резервуарне, при обсягах водню понад 10⁶ м³ [2].

На сьогодні існує позитивний досвід підземного зберігання водню в пористих водоносних горизонтах та штучно створених кавернах у покладах кам'яної солі [3, 4].

Нині в Україні експлуатуються 11 сховищ природного газу (ПСГ), побудованих у водоносних горизонтах та пористих колекторах виснажених газових родовищ.

Попри відмінність у розмірах молекул метану й водню та різницю у фільтраційних і дифузійних властивостях гірських порід світовий досвід показує можливість успішного зберігання великих об'ємів водню в підземних сховищах, створених за аналогією з підземними сховищами метану водоносних горизонтів і кавернах, у покладах кам'яної солі. [1–3].

Мета і завдання. В Україні накопичено значний практичний досвід експлуатації підземних сховищ природного газу та проведено ряд досліджень фільтраційних параметрів привибійної зони пласта

у свердловинах у процесі експлуатації підземних сховищ газу, тобто при нагнітанні газу в пласт і його зворотному русі на поверхню. Аналіз проведених досліджень щодо очищення привибійної зони пласта має універсальний характер і може бути використаний при створенні й експлуатації підземних сховищ водню.

Основним завданням статті є аналіз особливостей експлуатації ПСГ та оцінка можливості використання вітчизняного досвіду для обслуговування підземних сховищ водню.

Результати досліджень. Однією з важливих задач експлуатації ПСГ є підтримання проектних величин дебітів свердловин, які змінюються внаслідок впливу технологічних операцій на фільтраційно-ємнісні властивості привибійної зони продуктивного горизонту.

Головним фактором зниження продуктивності свердловин є погіршення фільтраційних характеристик привибійної зони пласта (ПЗП) внаслідок проникнення компресорних олій і твердих домішок, що заносяться потоком газу в процесі нагнітання його в сховище.

У період відбору газу з підземного сховища частина забруднювальних компонентів виноситься з ПЗП і відділяється від газу на сепараторах. Для визначення компонентного складу забруднювальних матеріалів були відібрані проби рідин із сепараторів Пролетарського ПСГ, (Дніпропетровська обл.) і Опарського ПСГ (Львівська обл.) після завершення періоду відбору газу. З рідкої фази проби виділяли воду й оливу, а тверду фазу розділяли на магнітоактивні тверді частинки, які виділяли магнітом, колоїдні частинки глинистих матеріалів і пісок.

Результати досліджень компонентного складу проб рідин із сепараторів Пролетарського ПСГ і Опарського ПСГ наведено на рис. 1 і 2.

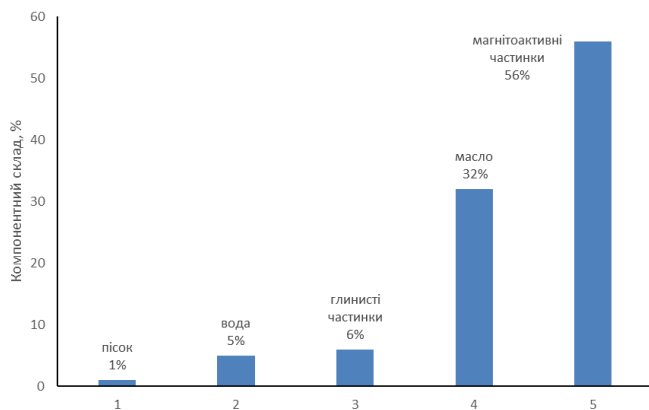


Рис. 1. Компонентний склад проб рідини із сепараторів Пролетарського ПСГ

Fig. 1. Component composition of liquid samples from separators of Proletarskiy PSG

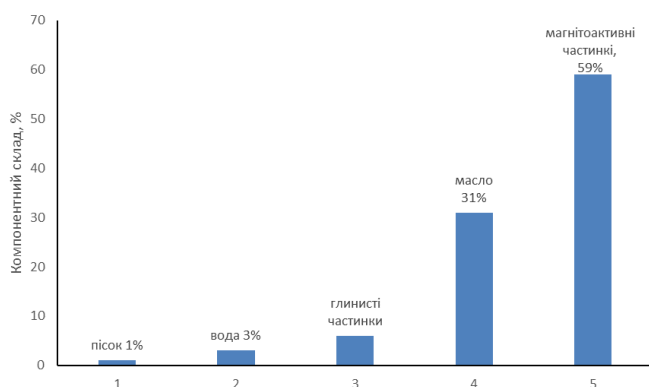


Рис. 2. Компонентний склад проб рідини з сепараторів Опарського ПСГ

Fig. 2. Component composition of liquid samples from the Oparskyi PSG separators

На рис. 1 видно, що головним елементом забруднювальних рідин з Пролетарського ПСГ та з Опарського ПСГ, що колюмає ПЗП, є магнітоактивні частинки, вміст яких у пробах рідин складає відповідно 56 і 59 % всієї маси проб.

Задача розробки технології очищення ПЗП від виявлених компонентів полягала в пошуку рецептури активної рідини для обробки привибійної зони свердловин, яка б забезпечувала ефективне відмивання фільтраційних каналів ПЗП від компресорної оливи і розчинення магнітоактивних частинок, представлених продуктами корозії та ерозії металів [5, 6].

Були проведені дослідження оливодімовної здатності як водорозчинних, так і вуглеводневонерозчинних ПАР. Концентрацію ПАР у розчинах змінювали в діапазоні від 2 до 8 % маси за активною речовиною. В експериментах використовувалась пластова вода Богородчанського ПСГ (УМГ «Прикарпаттрансгаз») і компресорна олива МС-20.

У табл. 1 наведено досягнуті в процесі досліджень максимальні показники відмивання компресорних оливи різними розчинами ПАР.

Таблиця 1. Показники відмивання компресорної оливи ПАР

Table 1. Parameters of compressor oil washing off PAR

	Досліджуваний розчин ПАР	Коефіцієнт відмивання оливи, %
1	2	3
1	Водний розчин барвоцелу	51,8
2	Водний розчин МК	71,4
3	Вуглеводневий розчин жириноксу	63,0
4	Водний розчин савенолу SWP (після обробки розчином МК)	93,9

Проведеними дослідженнями встановлено, що обробка ПЗП водним розчином поверхневого реагенту МК високої концентрації (2–8 % маси) та водним розчином савенолу SWP (0,3–0,51 % маси) забезпечує 93,9 % вимивання компресорної оливи з пористого середовища [7].

Для розчинення магнітоактивних частинок було досліджено ефективність композиції з оцтової та фосфорної кислот у різних концентраціях. Результати досліджень наведено на рис. 3 і 4.

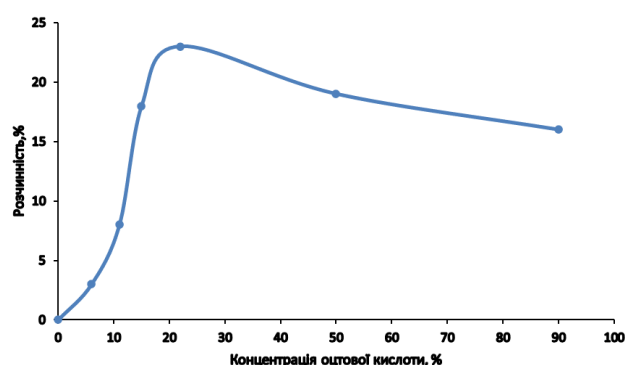


Рис. 3. Залежність розчинення магнітоактивних частинок від концентрації оцтової кислоти

Fig. 3. Dependence of the dissolution of magnetoactive particles on the concentration of acetic acid

На рис. 3 видно, що найефективніше розчинення магнітоактивних частинок досягається при концентрації оцтової кислоти 20–30 % маси. А ефективність

розчинення магнітоактивних частинок фосфорною кислотою, як видно на рис. 4, пропорційно зростає при концентрації від 0 до 10–12 % маси, й подальше збільшення вмісту кислоти в розчині економічно не-доцільне.

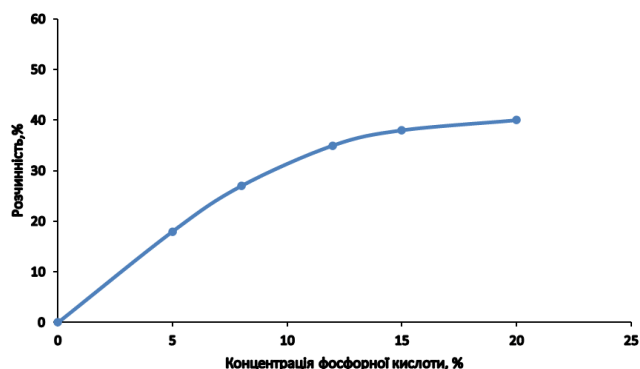


Рис. 4. Залежність розчинення магнітоактивних частинок від концентрації фосфорної кислоти

Fig. 4. Dependence of the dissolution of magnetoactive particles on the concentration of phosphoric acid

Дослідженнями встановлено, що для обробки ПЗП доцільно застосовувати розчин оцтової та фосфорної кислот у співвідношенні 2:1. Наприклад, 20 % маси оцтової й 10 % маси фосфорної кислоти забезпечує збільшення проникності в 1,5–3,9 раза за рахунок розчинення магнітоактивних частинок і декольматзації ПЗП [8].

На основі цих досліджень розроблена технологія очищення ПЗП у свердловинах підземних сховищ газу від техногенного забруднення.

Алгоритм розробленої технології такий: приготування біля гирла свердловини розчинів ПАР і суміші оцтової та фосфорної кислот; закачування на вибір в інтервал залягання газонасиченого пласта; видержування під тиском протягом 2–4 годин для реагування з забруднювальними компонентами; витіснення відпрацьованих розчинів із свердловини на сепаратор; промивання колони від залишків розчинів і запуск свердловини в експлуатацію.

Технологія успішно застосовувалася на ПСГ ДК «Укртрансгаз». Ефективність технології підтверджено дослідженнями продуктивності свердловин до і після застосування технології. Результати досліджень представлено в табл. 2.

Висновки. На основі проведених О. Бачеріковим експериментальних досліджень і зібраних матеріалів була розроблена технологія очищення ПЗП у свердловинах підземних сховищ газу від техногенного забруднення.

Представлена технологія очищення ПЗП свердловин ПСГ має практичне значення і для вирішення задач підземного зберігання водню, оскільки принципи створення й експлуатації підземних сховищ для зберігання великих об'ємів як газу, так і водню аналогічні.

Таблиця 2. Результати застосування технології на свердловинах ПСГ ДК «Укртрансгаз»

Table 2. The results of the application of the technology at the wells of the PSG of the DC "Ukrtransgaz"

Назва підземного сховища газу	№ св.	Дата дослідження свердловин		Результати досліджень					
				Коефіцієнт фільтраційного опору		Розрахунковий дебіт			Абсолютно вільний дебіт, тис. м ³ /д
		До обробки	Після обробки			Умови розрахунку		Q розрах., тис. м ³ /д	
				а	в	Р _{пл} , МПа	Р _{буф} , МПа		
Богородчанське	80	27.05	-	1,367	0,31899	7,0	5,2	71	120
	-/-	-	12.08	0,2517	0,00582	-/-	-/-	400	1258
	-/-	-	14.08	0,1845	0,0031	-/-	-/-	469	1728
	134	11.06	-	6,427	0,5681	-/-		49	86
	-/-	-	16.06	3,456	0,35063	-/-		65	114
	-/-	-	20.06	0,827	0,02766	-/-		219	427
Кегичівське	133	24.06	-	-	-	13,1	11,3	52,7	-/-
	-/-	-	07.08	-	-	-/-	-/-	109,7	-/-
Опарське	207	15.01	-	1,185	0,03100	3,4	1,9	133	212
	-/-	-	26.01	0,879	0,01694	-/-	-/-	176	281
	-/-	-	05.02	0,794	0,01685	-/-	-/-	178	275
Дашавське	114	26.01	-	0,673	0,01453	3,4	1,9	187	227
	-/-	-	26.02	0,402	0,01035	-/-	-/-	193	194
Угерське	78	13.02	-	1,437	0,0067	3,4	1,9	178,8	251
	-/-	-	20.02	0,305	0,0060	-/-	-/-	203	334,9
Більче-Волицько-Угерське	104	01.03	-	0,317	0,0032	3,4	1,9	447	441,3
	-/-	-	10.03	0,486	0,0016	-/-	-/-	542	531,4

Експлуатація підземного сховища газу і водню передбачає циклічне заповнення шляхом нагнітання газу через свердловини, що спричиняє зміну фільтраційних властивостей ПЗП.

Облаштування свердловин і спосіб нагнітання газу, звідки надходять компоненти, що забруднюють ПЗП, мають однакову природу.

Технологію очищення ПЗП свердловин підземних сховищ газу можна рекомендувати для відновлення продуктивності свердловин підземних сховищ водню.

ПОСИЛАННЯ

1. S. Foh, M. Novil, E. Rockar, and P. Randolph, "Underground hydrogen storage". Institute of Gas Technology, Chicago, Tech. Rep. issued as BNL (51275) Dec 1979.
2. J. B. Taylor, J. E. A. Alderson, K. M. Kalyman, A. B. Lyle, and L. A. Phillips, "Technical and economic assessment of methods for the storage of large quantities of hydrogen", *Int J. Hydrogen Energy*, 11, pp. 5–22, 1986.
3. H. B. J. Stone, I. Veldhuis, and R. N. Richardson, "An Investigation into Large-Scale Hydrogen Storage in the UK" in *Proc. International Hydrogen Energy Congress and Exhibition*, IHEC. Istanbul, Turkey, 2005.
4. С. О. Кудря, Ю. П. Морозов, М. П. Кузнецов, "Особенности застосування відновлюваних джерел енергії для отримання водню", на *Науково-практичній конференції «Відновлювана та воднева енергетика-2018»*, Київ, 2018, с. 35–40.
5. С. О. Кудря, Ю. П. Морозов, М. П. Кузнецов та ін. *Фундаментальні аспекти відновлювано-водневої енергетики і паливно-комірчанних технологій. Монографія*. Ю. М. Солонін, ред. Київ, Україна: KIM, 2018.
6. Ю. П. Морозов, *Добыча геотермальных ресурсов и аккумулярование теплоты в подземных горизонтах. Монография*. Киев: Наук. думка, 2017.
7. О. В. Бачеріков, Ю. Б. Хаєцький, Р. Л. Вечерік, "Відновлення фільтраційних властивостей привибійної зони експлуатаційно-нагнітальних свердловин ПСГ", *Науковий вісник Національного Технічного Університету Нафти і Газу*, No. 2 (8), с. 178–180, 2004.
8. О. В. Бачеріков та ін. Патент на корисну модель № 27046. Україна. МПК E21B 43/27. Спосіб обробки свердловини підземних сховищ газу. Заявл. 21.06.2007. Опубл. 10.10.2007. Бюл. No. 8.

REFERENCES

1. S. Foh, M. Novil, E. Rockar and P. Randolph, "Underground hydrogen storage". Institute of Gas Technology, Chicago, Tech. Rep. issued as BNL (51275) Dec 1979.
2. J. B. Taylor, J. E. A. Alderson, K. M. Kalyman, A. B. Lyle, and L. A. Phillips, "Technical and economic assessment of methods for the storage of large quantities of hydrogen", *Int J. Hydrogen Energy*, 11, pp. 5–22, 1986.
3. H. B. J. Stone, I. Veldhuis, and R. N. Richardson, "An Investigation into Large-Scale Hydrogen Storage in the UK" in *Proc. International Hydrogen Energy Congress and Exhibition*, IHEC. Istanbul, Turkey, 2005.
4. O. Bacherikov, Yu. Khaetsky, and R. Vecherik, "Restoration of the filtration properties of the near-surface zone of production and injection wells of the PSG" (in Ukrainian), *Science Bulletin of the National Technical University of Oil and Gas*, No. 2 (8), pp. 178–180, 2004.
5. S. Kudrya et al., *Fundamental aspects of renewable water energy and fuel and cell technologies. Monograph*. (in Ukrainian). M. Solonin, Ed. Kyiv, Ukraine: KIM, 2018.
6. Yu. Morozov, *Extraction of geothermal resources and accumulation of heat in underground horizons. Monograph (in Russian)*. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka. 2017.
7. O. Bacherikov, Yu. Khaetsky, and R. Vecherik, "Updating the filtration capacity of the near-wellbore zone of production and injection wells of the PSG" (in Ukrainian), *Science Bulletin of the National Technical University of Oil and Gas*, No. 2 (8), pp. 178–180, 2004.
8. O. Bacherikov et al., Utility model patent No. 27046. Ukraine, IPC E21B 43/27. Method of treating wells of underground gas reserves. (In Ukrainian). Appl. 06.21.2007. Publ. 10.10.2007. Bul. No. 8.