

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ БАКТЕРІОЛОГІЧНИХ ЗМІН У ВОДОНОСНИХ ГОРИЗОНТАХ В УМОВАХ ПІДВИЩЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

Отримано 25 лист. 2024 р.; рекомендовано до публікації 27 лист. 2024 р.
Доступно онлайн 11 груд. 2024 р.

**Барило А. А.¹, Морозов Ю. П.²,
Бачеріков О. В.³, Лобанова І. В.⁴**

Автор для кореспонденції: Барило Анастасія,
e-mail: geotherm@ukr.net

¹ наук. співроб.
<https://orcid.org/0000-0001-7981-6464>

² д-р техн. наук
<https://orcid.org/0000-0003-1632-9735>

³ канд. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0003-0939-8804>

⁴ провідний інженер
<http://orcid.org/0009-0007-0625-8052>

^{1, 2, 3, 4} Інститут відновлюваної енергетики
НАН України, м. Київ, Україна

Акумулявання надлишкової та технологічної теплоти у верхніх водонасних горизонтах призводить до теплового та бактеріального забруднення горизонтів. У статті наведено результати експериментальних досліджень щодо бактеріологічних змін у водонасних горизонтах в результаті підвищення їх температури. Дослідження проведено на основі аналізу проб підземних вод полтавського водонасного горизонту з експлуатаційних свердловин, що розташовані на експериментальному полігоні ІВЕ НАНУ. Було визначено хімічний та бактеріологічний склад вод та рівень їх природної забрудненості. Підземні води належать до групи слабомінералізованих гідрокарбонатних кальцієво-магнієвих вод із середньою мінералізацією 495,86 мг/дм³ і мають незначне забруднення мезофільними бактеріями. В лабораторії Центру превентивної медицини Державного управління справами було проведено аналізи, які дозволяють змодельовати поведінку бактерій залежно від підвищення температури підземної води в горизонті. Встановлено, що підвищення температури води у водонасному горизонті в інтервалі температур 20–40 °С призводить до росту кількості бактерій в 30–40 разів. Отримані результати вказують на необхідність передбачення використання методів бактеріологічного очищення під час створення систем підземного акумуляування тепла.

Ключові слова: водонасний горизонт, теплове забруднення, бактеріальне забруднення, загальне мікробне число, температурний режим, системи підземного акумуляування.

RESULTS OF THE RESEARCH OF BACTERIOLOGICAL CHANGES IN WATER-BEARING HORIZONS WHEN THE TEMPERATURE IS INCREASED

Received Nov. 25, 2024; accepted Nov. 27, 2024
Available online Dec. 11, 2024

**Barylo A. A.¹, Morozov Yu. P.²,
Bacherikov O. V.³, Lobanova I. V.⁴**

Author for correspondence: Barylo Anastasia,
e-mail: geotherm@ukr.net

¹ Researcher
<https://orcid.org/0000-0001-7981-6464>

² Dr of Tech. Science
<https://orcid.org/0000-0003-1632-9735>

³ Cand. of Tech. Science
<https://orcid.org/0000-0003-0939-8804>

⁴ Lead Engineer
<http://orcid.org/0009-0007-0625-8052>

^{1, 2, 3, 4} Institute of Renewable Energy of the
National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine

The accumulation of excess and technological heat in the upper aquifers leads to thermal and bacterial contamination of the horizons. The article presents the results of experimental research on bacteriological changes in aquifers as a result of an increase in their temperature. The research was carried out on the basis of the analysis of groundwater samples of the Poltava aquifer from production wells located at the experimental training ground of the National Academy of Sciences of the National Academy of Sciences. The chemical and bacteriological composition of waters and the degree of their natural pollution were determined. Groundwater belongs to the group of poorly mineralized hydrocarbonate

calcium-magnesium waters with an average mineralization of 495.86 mg/dm³ and is slightly contaminated with mesophilic bacteria. In the laboratory of the Center for Preventive Medicine of the State Administration of Affairs, analyzes were carried out that allow simulating the behavior of bacteria depending on the increase in the temperature of underground water in the horizon. It was established that an increase in the temperature of water in the aquifer in the temperature range of 20-40 °C leads to an increase in the number of bacteria by 30-40 times. The obtained results indicate the need to anticipate the use of bacteriological cleaning methods in the creation of underground heat storage systems.

Key words: *aquifer, thermal pollution, bacterial pollution, total microbial count, temperature regime, underground storage systems.*

Перелік використаних позначень та скорочень

ЗМЧ – загальне мікробне число

КУО – колонієутворювальні одиниці мікроорганізмів

Вступ

Одною з проблем, що виникає під час акумулювання теплової енергії у водоносних горизонтах є їх теплове забруднення, яке проявляється у підвищенні температури підземних вод порівняно з природною фоновією температурою. Зміна температури підземних вод спричиняє зміну їх хімічного складу, вмісту газів, особливо кисню, перетворення фізичних властивостей, бактеріологічного складу і смакових якостей. Зростання температури води призводить до збільшення розчинювальної здатності води, що може стати причиною карстово-суфозійних процесів і призвести до осідання ґрунту [1]. Тому для уникнення шкідливого впливу на довкілля необхідно визначити межі температури підземної води, яку можливо закачувати у водоносний горизонт для безпечного акумулювання теплової енергії.

У світі на законодавчому рівні існують різні підходи до вирішення проблеми теплового забруднення водоносних горизонтів [2,3]. Деякі країни обмежують мінімальну та максимальну температуру вод, що закачуються у водоносний горизонт. Наприклад, в Австрії цей діапазон становить 5–20 °C, у Данії – 2–25 °C, у Нідерландах – 5–25 °C. Інші країни унормовують максимальну можливу зміну температури ґрунтових вод. У Швейцарії цей показник найменший і становить 3 °C, а у Франції – найбільший, тобто 11 °C. В Україні встановлені граничні норми підвищення температури води у поверхневих водоймищах і річках внаслідок скидання теплих вод. Відповідно до водного законодавства скидання теплих вод не повинно призводити до підвищення температури води водного об'єкта більш ніж на 3 °C, порівняно з її природною температурою в літній період [4]. Вимоги щодо можливого підвищення температури у верхніх водоносних горизонтах в нашій країні не унормовані.

Постановка завдання

Акумулювання теплоти переважно здійснюється у верхніх водоносних горизонтах, що характеризуються невисокими величинами мінералізації та вмістом газів. Тому з усіх вищенаведених наслідків зростання температури у верхніх водоносних горизонтах найбільше впливає на

ріст патогенних бактерій у водоносному горизонті. Зазвичай бактеріальному забрудненню підземних вод перешкоджають процеси самоочищення води в породах зони аерації. Під час дослідів встановлено, що шар дрібнозернистих пісків завтовшки 3–5 м повністю очищає воду від анаеробних бактерій (зокрема патогенних) [5]. Однак якщо живі патогенні бактерії все ж таки потрапляють у водоносний горизонт, то тут вони, пересуваючись разом з підземним потоком, залежно від терміну виживання можуть існувати від 30 до 300 діб [1, 6]. Більші терміни виживання бактерій характерні для тріщинуватих порід, крупнозернистих пісків, валунових і гравійно-галечникових відкладів, які мають щодо мікроорганізмів невисоку адсорбційну здатність. Час виживання бактерій залежить від різних чинників: насамперед від їх кількісного вмісту у воді, швидкості фільтрації, геохімічної обстановки, температури, наявності у воді інших забруднювальних речовин. **Мета цієї роботи:** експериментально дослідити та проаналізувати вплив підвищення температури води у водоносному горизонті, який виникає внаслідок підземного акумулювання теплової енергії, на бактеріологічний склад підземних вод і надати рекомендації щодо безпечного створення систем підземного акумулювання.

Методи дослідження

Дослідження проводилось на основі аналізу проб підземних вод полтавського водоносного горизонту з експлуатаційних свердловин, що розташовані на експериментальному полігоні ІВЕ НАНУ (прибудинкова ділянка корпусу № 2). Перед початком відбору проб свердловини промивалися протягом 20–30 хв. Проби води відбирались у спеціально призначені стерильні флакони місткістю 500 см³ зі щільно закритими пробками з дотриманням методичних вказівок щодо «Санітарно-мікробіологічного контролю якості питної води» [7]. Доставка проб у лабораторію здійснювалась не пізніше ніж через 2 год після її відбору. Аналізи виконувала лабораторія Центру превентивної медицини Державного управління справами. В лабораторії для проб води в природних умовах (без нагріву) вимірювались такі показники: ЗМЧ, загальні коліформи, *E. coli*, ентерококи,

синьогнійна паличка. Потім за допомогою інкубаторів і термостатів зразки води доводилися до необхідної температури та витримувалися при постійній температурі задану кількість годин. Під час дослідження температури проб води змінювались в інтервалі 20, 30, 40 і 60 °С. Витримка проб води за вибраної температури становила 2, 4, 20 і 40 год. Після витримки визначались основні показники бактеріальної забрудненості для кожної температури.

Виклад основного матеріалу

Хімічний та бактеріологічний склад підземних вод верхніх водоносних горизонтів

Хімічні та бактеріологічні аналізи підземних вод верхніх водоносних горизонтів на ділянці дослідження проводились лабораторією ТОВ «УкрХімАналіз» у період з 2019 до 2024 року [8]. Метою дослідження було встановлення закономірностей у зміні загальної мінералізації води, що пов'язана з режимом та умовами живлення водоносних горизонтів; перевірка відповідності підземних вод верхніх водоносних горизонтів вимогам, що висуваються для питних вод [7]; виявлення джерел можливого забруднення. Аналізи проб води виконувались із трьох свердловин: св. № 7 (Бучакський горизонт, інтервал глибин 107–116 м), св. № 8 (Полтавський горизонт, інтервал глибин 40,5–49,5 м) та св. № 11 (Бучакський горизонт, інтервал глибин 50,0–53,0 м). Результати хімічних та бактеріологічних аналізів наведено у таблиці.

Згідно з проведеними аналізами води обох горизонтів належать до групи слабомінералізованих гідрокарбонатних кальцієво-магнієвих вод із середньою мінералізацією 495,86 мг/дм³. На формування хімічного складу підземних вод впливає наявність розчинених солей у зоні аерації. Під час фільтрації атмосферних опадів у ґрунті відбуваються складні процеси взаємодії води та породи, внаслідок яких мінералізація збільшується та змінюється хімічний склад підземних вод.

Максимальні значення мінералізації вод спостерігаються у періоди з недостатньою кількістю атмосферних опадів із затримкою у 1-2 місяці. Знижені показники розчиненого кисню в пробах вод (від 2,24 до 4,54 мгО₂/дм³) порівняно з фоновими значеннями (8,0 мгО₂/дм³) корелюються з наявністю у всіх зразках мезофільних анаеробних та факультативно анаеробних мікроорганізмів. Загалом води характеризуються незадовільною якістю, незначні перевищення допустимих норм встановлені щодо загальної жорсткості, загальної лужності, вмісту заліза та кальцію. У св. 11 (26.07.24) спостерігається збільшений вміст нітратів, що вірогідно пов'язано з давнім органічним забрудненням. Окремі проби води характеризуються підвищеною каламутністю, що може бути причиною підвищення показників хімічного споживання кисню дихроматного. В усіх пробах встановлена наявність бактеріального забруднення мезофільними анаеробними та факультативно анаеробними мікроорганізмами у кількості від 2 до 4 КУО/см³.

Таблиця. Зміни хімічного та бактеріологічного складу підземних вод у свердловинах

Table. Changes in the chemical and bacteriological composition of groundwater in wells

Найменування показника, одиниці виміру	Результати хімічного аналізу										Нормативне значення*	Методика виконання досліджень
	Свердловина 7				Свердловина 8				Свердловина 11			
	05.04.19	16.12.20	9.02.24	26.07.24	05.04.19	16.12.20	30.01.24	9.02.24	9.02.24	26.07.24		
Каламутність, мг/дм ³	0,4	0,04	0,02	0,63	2,1*	0,1	1,5*	0,24	0,19	5,3	≤1,0	ГОСТ 3351-74. ДСТУ ISO 7027-2003
Забарвленість, градуси	0	0,83	0	0	0,4	1,05	0	0	1,55	0,74	≤20	ГОСТ 3351-74. ДСТУ ISO 7887-2003
рН – водневий показник	7,39	7,05	6,8	7,2	7,29	6,98	6,6	7,3	7,3	6,8	6,5–8,5	ДСТУ 4077-2001
Карбонатна жорсткість, ммоль/дм ³	6,7	5,6	0,6	6,7	6,7	7,1	7	5,7	5,9	7,6	Не нормується	ГОСТ 26449.1-85
Загальна жорсткість, ммоль/дм ³	6,0	8,5*	0,13	3,35	10,0*	12,65*	5,75	0,05	3,05	5,30	≤7,0	ДСТУ ISO 6059:2003
Залізо загальне, мг/дм ³	0,009	0,25*	0,02	0,03	0,004	0,23*	0,08	0,03	0,3*	0,18	≤0,2	ДСТУ ISO 6332:2003
Загальний вміст солей мг/дм ³	301	396	430	452	392	635,6	741	418	421	772	≤1000	ГОСТ 26449.1-85

Найменування показника, одиниці виміру	Результати хімічного аналізу										Нормативне значення*	Методика виконання досліджень
	Свердловина 7				Свердловина 8				Свердловина 11			
	05.04.19	16.12.20	9.02.24	26.07.24	05.04.19	16.12.20	30.01.24	9.02.24	9.02.24	26.07.24		
Хімічне споживання кисню дихроматне, мгO ² /дм3	6,81	6,59	5,04	5,76	6,55	6,71	5,72	5,22	5,66	9,34	Не нормується	ДСТУ ISO 6060:2003
Розчинений кисень, мгO ² /дм3	4,54	2,24	3,62	3,44	3,82	2,24	3,32	3,34	3,2	2,65	Не нормується	ДСТУ ISO 5813:2004
Загальна лужність, ммоль/дм ³	7,0*	5,6	0,60	6,70*	7,0*	7,1*	7,00*	5,70	5,90	7,60*	≤6,5	ДСТУ ISO 9963-1:2007
Нітрати, мг/дм ³	0,84	5,4	0,115	3,93	1,21	4	15,4	0,359	0,435	60,6*	≤50	ДСТУ 4078-2001
Амоній, мг/дм ³	0,031	0,21	0,03	0,23	0,049	0,08	0,2	0,33	0,37	0,26	≤0,5	ГОСТ 4192-82
Хлориди, мг/дм ³	1,28	19,85	2,84	22,69	1,41	61,68	77,99	10,64	10,64	80,12	≤250	ДСТУ ISO 9297:2007
Натрій, мг/дм ³	10,76	7,6	10	14,7	12,35	14	38,4	150	0,435	25,9	≤200	ГОСТ 23268.6
Сульфати, мг/дм ³	4,7	4	1	2	5,4	73	184	32	36	49	≤250	ГОСТ 4389-72. п.3
Окисно-відновний потенціал, мВ	+256,2	+292	+134	+162	+252,8	+280	+132	+121	+133	+169	Не нормується	ГОСТ 22018-84
Кремній, мг/дм ³	0,021	0,58	0,93	6,27	0,029	0,87	8,16	4,82	4,87	8,47	≤10	ГОСТ 26449.1-85
Марганець, мг/дм ³	0,022	0,05	-	-	0,026	0,04	0,009	-	0,028	0,02	≤0,05	ГОСТ 4974-72. п.3
Загальний вміст фенолів, мг/дм ³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	≤0,0005	РД 52.24.34-86
Сухий залишок, мг/дм ³	381	362	410	432	476	629	720	387	403	749	≤1000	ГОСТ 18164-72
Йод, мкг/дм ³	-	-		7,6	-	-	9,1	7,2	7,1	8,9	≤50	ДСТУ 4816:2007,
Мідь, мг/дм ³	0,002	-	-	-	0,003	-	-	-	-	-	≤1,0	5.4-М-05 (внутрішня)
Калій, мг/дм ³	3,76	5,1	0,5	2,5	4,42	2	2,5	2,1	6,5	2,3	2–20	ГОСТ 23268.7
Кальцій, мг/дм ³	100,0	95,19	5,01	89,17	170,0*	165,32*	184,36*	2,00	90,18	118,23	≤130	ДСТУ ISO 6058:2003
Магній, мг/дм ³	12,0	45,57	-	27,34	18,0	53,47	27,95	-	19,44	57,12	≤80	ДСТУ ISO 6059:2003
Загальна кількість мезофільних анаеробних та факультативно анаеробних мікроорганізмів (ЗМЧ), КУО/см ³	42	32	-	2	26	18	5	-	-	3	≤50	ДСанПіН 2.2.4.-171-10

*Примітка. Напівжирним шрифтом виділено показники, що перевищують граничні норми

Дослідження бактеріологічних змін у зразках підземних вод в умовах підвищення температури

Після того як було встановлено, що води верхніх горизонтів мають бактеріологічне забруднення, постала задача з'ясувати вплив підвищення температури води у водоносному горизонті на ріст кількості бактерій. Для цього в лабораторних умовах були змодельовані різні варіанти теплового режиму природного теплоносія, а саме: температура підземних вод підіймалась до 20, 30, 40 і 60 °С, а час витримки проб води за вибраної температури становив 2, 4, 20 і 40 год. У зразках вод вимірювалось ЗМЧ, тобто кількість колонієутворювальних одиниць мікроорганізмів у 1 см³ води. Цей показник характеризує загальний вміст мікроорганізмів без їх якісної характеристики [9]. Потім визначалась кількість окремих груп бактерій (коліформи, *E. коли*, ентерококи, синьогнійна паличка). Всього було проведено 31 аналіз проб. На рис. 1 показано приклад дослідження зразків води при різних температурах за допомогою тестових наборів COLILERT-18, ENTEROLERT, PSEUDALERT.

Матеріали дослідження

На рис. 2 показана гістограма розподілу ЗМЧ у зразках води при початкових умовах без нагріву. Як видно на рисунку, всі проби мали різний ступінь забрудненості бактеріями. Чітко прослідковується залежність кількості бактерій від тривалості відстоювання свердловини. Що більше свердловина перебувала в стані «спокою», то

більшу кількість бактерій було виявлено у початкових зразках. Це свідчить про те, що тривалість промивання свердловини перед відбором проб має відповідати періоду відсутності експлуатації. Тобто 20–30-хвилинного промивання свердловини не завжди достатньо для змивання бактерій, що наявні у водопідіймальному обладнанні.



Рис. 1. Дослідження води при різних температурах за допомогою тестових наборів COLILERT-18, ENTEROLERT, PSEUDALERT

Fig. 1. Research of water at different temperatures using test kits COLILERT-18, ENTEROLERT, PSEUDALERT

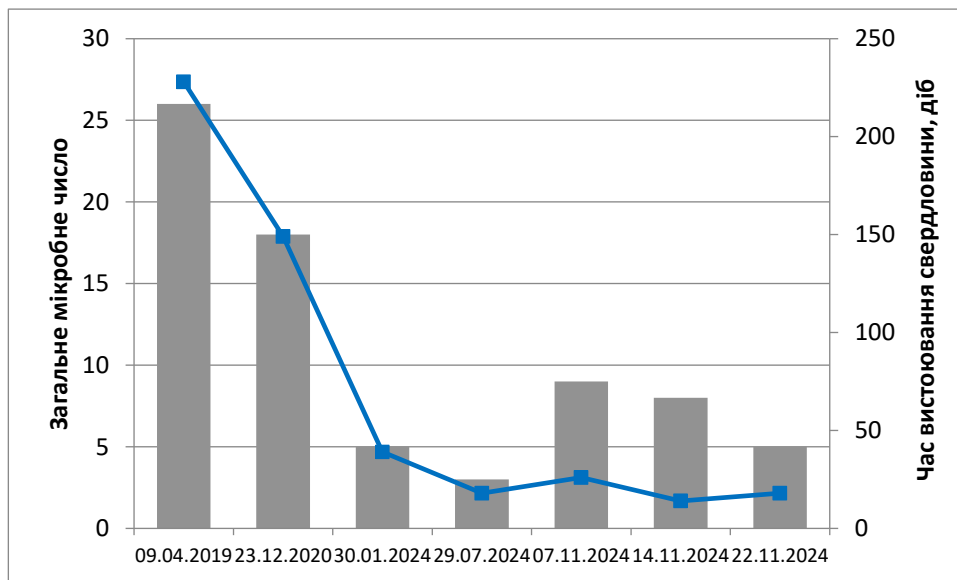


Рис. 2. Гістограма розподілу ЗМЧ у початкових пробах води (без нагріву)

Fig. 2. Histogram of the total microbial number distribution in the initial water samples (without heating)

Для всіх зразків були побудовані графіки залежності ЗМЧ від температури нагріву за час витримки проб: 2, 4, 20 і 40 год. На рис. 3. і рис. 4 зображено порівняння

експериментальних даних, отриманих під час дослідження, з теоретичними розрахунками, наведеними в роботі [10].

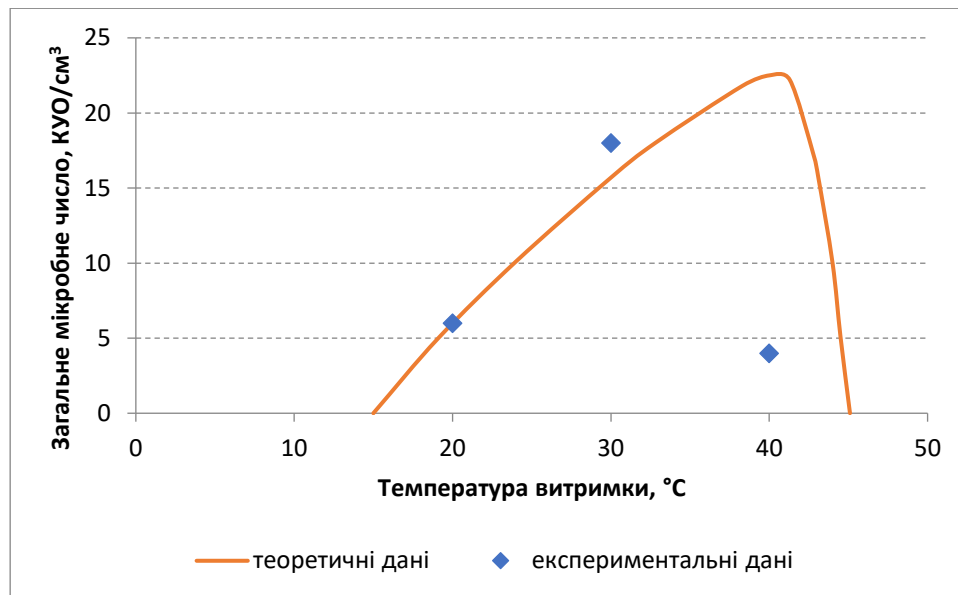


Рис. 3. Залежність ЗМЧ від температури нагріву в разі витримки протягом 4 год

Fig. 3. Dependence of the total microbial number on the heating temperature during exposure for 4 hours

Дослідження показали, що оптимальна температура для росту груп патогенних бактерій, які становлять найбільшу загрозу для людського організму та можуть викликати епідемії, становить від 20 до 40 °C, за вищих температур їх ріст істотно припиняється, а за температури 50 °C вони гинуть.

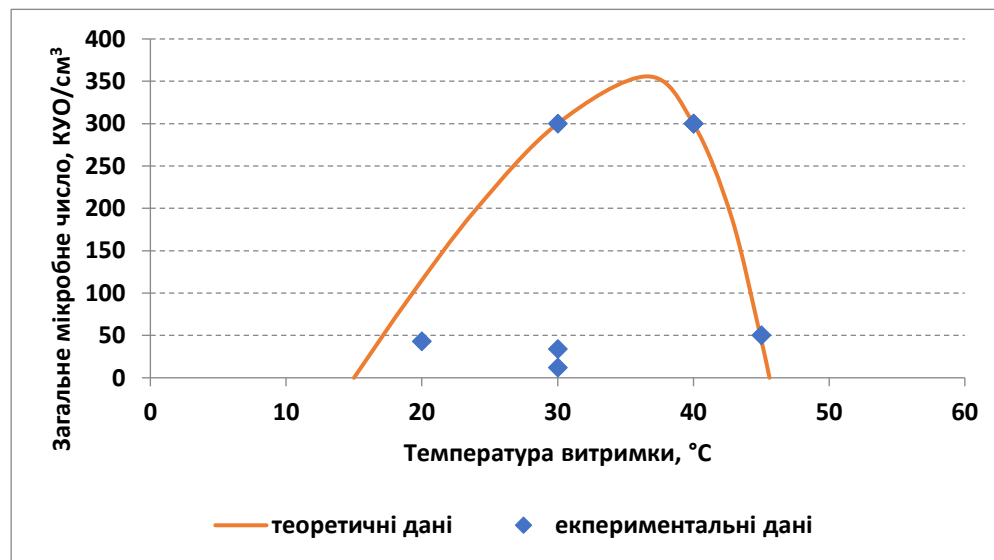


Рис. 4. Залежність ЗМЧ від температури нагріву в разі витримки протягом 20 год

Fig. 4. Dependence of the total microbial number on the heating temperature during exposure for 20 hours

Висновки

Однією з проблем, яку необхідно вирішувати під час проектування систем підземного акумулювання тепла у водоносних горизонтах, є бактеріальне забруднення горизонту внаслідок підвищення його температури. Експериментальні дослідження показали, що підвищення температури води у водоносному горизонті до 20–40 °C призводить до росту кількості бактерій в 30–40 разів. З огляду на термін виживання бактерій у водоносних горизонтах зараження може поширюватись фільтраційними потоками по площині пласта, а також з водою на етапі відбору теплоти в процесі акумулювання. При

розробці технології акумулювання теплоти у верхніх водоносних горизонтах необхідно передбачити дотримання рекомендацій щодо знезараження води. Одним із рішень цієї проблеми може бути застосування реактивного методу знезараження води [11].

ПОСИЛАННЯ

1. Лобода Н. С., Отченаш Н. Д. Підземні води, їх забруднення та вплив на навколишнє середовище: навч. посібник. Одеса: Одеський державний екологічний університет. 2017.

- http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/3406/1/Loboda_Otthenash_Pidzemni_vodi_2017.pdf
2. Haehnlein S., Bayer P., Blum Ph. International legal status of the use of shallow geothermal energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 14. Issue 9. 2010. P. 2611–2625. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032110002492?via%3Dihub>
 3. Bregnard D., Leins A., Cailleau G. et al. Unveiling microbial diversity in deep geothermal fluids, from current knowledge and analogous environments. *Geotherm Energy*. 11, 28 (2023). <https://doi.org/10.1186/s40517-023-00269-z>
 4. Про затвердження Правил охорони підземних вод: Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 11.05.2023. № 325. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1093-23#Text>
 5. Оцінка запасів підземних вод: підручник / Дробноход М. І. К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет». 2008. 384 с.
 6. Савицький В. М., Хільчевський В. К., Чунарьов О. В., Яцюк М. В. Відходи виробництва і споживання та їх вплив на ґрунти і природні води: навч. посібник. Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет». 2007. 152 с. https://geo.knu.ua/wp-content/uploads/2021/06/vidhody_virob.pdf
 7. Наказ Міністерства охорони здоров'я України «Про затвердження Державних санітарних норм та правил "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною"» №400 від 12.05.2010 р. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text>
 8. Zurian O. V. Barylo A. A. Impact of the natural temperature regime of the upper layers of Earth on efficiency of a hydrothermal heat pump system. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2022. Vol. 31. No. 3. P. 575–584.
 9. Наказ Міністерства охорони здоров'я України «Про затвердження методичних рекомендацій "Визначення найбільш вірогідного числа мікроорганізмів у воді з використанням тестів діагностичних Quanti-Disc та SimPlate"» № 138 від 14.03.2008 р. <https://ips.ligazakon.net/document/MOZ8090>
 10. Open Library. Temperature and Microbial Growth. <https://ecampusontario.pressbooks.pub/microbio/chapter/temperature-and-microbial-growth/>
 11. Говоров П. П. Энергоефективная система обеззараживания воды на основе светодиодных джерел світла / П. П. Говоров, О. В. Король, Т. І. Романова. *Оптическое-електронні інформаційно-енергетичні технології*. Т. 30. № 2 (2015). С. 61–65. <https://oeipt.vntu.edu.ua/index.php/oeipt/article/download/425/423/430>

REFERENCES

1. Loboda N. S., Otchenash N. D. Groundwater, its pollution and impact on the environment: a textbook. Odesa: Odessa State Ecological University. 2017. http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/3406/1/Loboda_Otthenash_Pidzemni_vodi_2017.pdf
2. Haehnlein S., Bayer P., Blum Ph. International legal status of the use of shallow geothermal energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 14. Issue 9. 2010. P. 2611–2625. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032110002492?via%3Dihub>
3. Bregnard D., Leins A., Cailleau G. et al. Unveiling microbial diversity in deep geothermal fluids, from current knowledge and analogous environments. *Geotherm Energy*. 11, 28 (2023). <https://doi.org/10.1186/s40517-023-00269-z>
4. On approval of the Rules for the protection of groundwater: Order of the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine dated 11.05.2023. No. 325. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1093-23#Text>
5. Assessment of groundwater reserves: textbook / Drobnohod M. I. K.: Publishing and printing center "Kyiv University". 2008. 384 p.
6. Savytskyi V. M., Khilchevskiy V. K., Chunaroyov O. V., Yatsyuk M. V. Production and consumption waste and their impact on soils and natural waters: a textbook. Publishing and printing center "Kyiv University". 2007. 152 p. https://geo.knu.ua/wp-content/uploads/2021/06/vidhody_virob.pdf
7. Order of the Ministry of Health of Ukraine "On approval of State sanitary norms and rules "Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption"" No. 400 dated 05/12/2010 <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text>
8. Zurian O. V. Barylo A. A. Impact of the natural temperature regime of the upper layers of Earth on efficiency of a hydrothermal heat pump system. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2022. Vol. 31. No. 3. P. 575–584.
9. Order of the Ministry of Health of Ukraine "On approval of methodological recommendations "Determination of the most probable number of microorganisms in water using diagnostic tests Quanti-Disc and SimPlate" No. 138 dated 03/14/2008. <https://ips.ligazakon.net/document/MOZ8090>
10. Open Library. Temperature and Microbial Growth. <https://ecampusontario.pressbooks.pub/microbio/chapter/temperature-and-microbial-growth/>
11. Govorov P. P. Energy-efficient water disinfection system based on LED light sources / P. P. Govorov, O. V. Korol, T. I. Romanova. *Optoelectronic information and energy technologies*. Vol. 30. No. 2 (2015). pp. 61–65. <https://oeipt.vntu.edu.ua/index.php/oeipt/article/download/425/423/430>