



УДК 622.245.42

**В. М. Орловський** канд. техн. наук, доцент (Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова), e-mail: [svaroh13@ukr.net](mailto:svaroh13@ukr.net),  
ORCID-0009 0009 5961 7164

**В. С. Білецький** д-р техн. наук, професор (Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”), e-mail: [biletsk@i.ua](mailto:biletsk@i.ua), <https://orcid.org/0000-0003-2936-9680>

## ТЕРМОСТІЙКІ ТАМПОНАЖНІ МАТЕРІАЛИ, ЩО РОЗШИРЮЮТЬСЯ ПРИ ТУЖАВІННІ

UDC 622.245.42

### THERMO-RESISTANT CEMENT FOR WELLS THAT EXPAND WHEN SOLIDATED

**V. M. Orlovskyy** Candidate of Technical Sci., Associate professor (Kharkiv National University of Municipal Economy named after A. M. Beketov, Kharkiv, Ukraine), e-mail: [svaroh13@ukr.net](mailto:svaroh13@ukr.net), ORCID-0009 0009 5961 7164

**V.S. Biletskyi** Dr. Sci. (Engin.), Professor (National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”), [ukcdb@i.ua](mailto:ukcdb@i.ua), <https://orcid.org/0000-0003-2936-9680>

#### ABSTRACT

**Objective.** The purpose of this work is to study the kinetics of expansion of cement material during hardening, as well as to study the technological properties of heat-resistant cement materials that expand during hardening, and the regularities of their hardening process. To achieve this goal, the following research tasks have been set:

- study the kinetics of expansion of cement material during hardening, analysis of expansion curves from the point of view of the influence of physicochemical factors on the rate of hardening process;
- study the technological properties of heat-resistant cement materials – mixtures that hardened for long periods at high temperatures;
- establish the dependence of the technological properties of stone based on heat-resistant cement materials that expand during hardening on physicochemical factors, in particular, the composition of the cement mixture, temperature, pressure and duration of hardening.

**Methodology.** Theoretical and experimental methods were used in the research. The experiments were conducted on laboratory equipment that simulates reservoir conditions. Measurement of technological properties of cement mortar and formed stone was carried out using standard laboratory equipment. In particular, the density of cement mortars was determined using a pycnometer, the water-mixture ratio of solutions was selected using a KR-1 flow cone, the water separation of solutions was determined using the standard method according to DSTU BV.2.7-86-99, the thickening time of solutions was determined on a KC-3 consistometer, the determination of the strength limits of stone during bending was carried out according to DSTU BV.2.7-86-99 on a device for testing beam specimens for tension during bending, and for compression - on a PSU-10 press.

*The number of experiments conducted is sufficient to obtain results with a confidence probability of 0.95.*

**Results.** *The kinetics of expansion of cement material during hardening was investigated. The technological properties of heat-resistant cement materials that expand during hardening and the regularities of their hardening process were studied.*

**Scientific novelty.** *In the process of researching new heat-resistant cement materials that expand upon hardening, the optimal formulations of the developed compositions were selected, the kinetics of their expansion upon hardening was studied. The dependence of the strength characteristics, as well as the permeability of the stone on the ratio of components in the cement mixture was studied.*

**Practical significance.** *The results of the work have practical application in cementing deep wells in difficult mining and geological conditions in geological exploration areas and industrial deposits. New cement materials that expand upon hardening have been successfully implemented at the drilling enterprises of the Ukrburgaz drilling unit of Ukgazvydobuvannya PJSC in cementing gas and gas condensate wells.*

**Keywords:** *cement material, cement stone expansion, heat resistance, density.*

## **1. ВСТУП (introduction)**

У статті проаналізовано проблему підвищення якості розмежування гірських порід і нафтогазоносних горизонтів. Викладено результати теоретичних та експериментальних досліджень тампонажних матеріалів, що розширюються при тужавінні, на основі золотих сумішей.

Розроблено і досліджено безклінкерні термостійкі тампонажні матеріали автоклавного твердіння, що розширюються при тужавінні, з високими експлуатаційними властивостями на основі побічних техногенних продуктів промисловості.

Проведено підбір оптимальних рецептур нових термостійких тампонажних матеріалів автоклавного твердіння, що розширюються при тужавінні.

Результати роботи мають практичне застосування при цементуванні нафтових і газових свердловин в складних гірничо-геологічних умовах на геологорозвідувальних площах та промислових родовищах вуглеводневої сировини.

## **2. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Виникнення заколонних перетоків у процесі освоєння та експлуатації нафтових і газових свердловин, унаслідок неякісного цементування експлуатаційних обсадних колон, є однією з найгостріших проблем, яка спричиняє значні втрати вуглеводневої сировини, забруднення надр, погіршення екологічної обстановки, загрозу пожеж.

Збільшення кількості свердловин із заколонними перетоками [1] є свідченням недостатньої ефективності технологій їх кріплення (недосконалість технічних засобів і рецептур тампонажних матеріалів), які не запобігають виникненню каналів у цементному камені і на контакті його з обсадною колоною і породою, руйнуванню цементного кільця від дії різних навантажень.

Статистичний аналіз якості кріплення нафтових і газових свердловин за попередні й останні роки стандартними тампонажними матеріалами свідчить про недостатню якість зчеплення цементного каменю з обсадною колоною [2] (таблиця 1). Міжпластові перетоки на нафтових і газових родовищах в Україні за останні двадцять років спостерігаються майже у 30 % свердловин [3].

Спираючись на дослідження ряду авторів [2, 4] встановлено, що при цементуванні нафтових і газових свердловин звичайними тампонажними цементами якісний контакт цементного каменю з обсадною колоною і стінками свердловини утворюється в інтервалах залягання проникних порід, де можлива фільтрація надлишкової води

замішування у пласт та доступ води із зовні. В інтервалах залягання непроникних порід, які є покрівлею продуктивних горизонтів або роз'єднувальною переділкою між проникними пластами, а також в інтервалах міжколонного простору утворюється камінь з усадковою деформацією і високою газопроникністю, де контакт цементного каменю з обсадною колоною і породою поганий. Як правило, це явище є головною причиною неякісного цементування та формування каналів міжпластових перетоків.

Таблиця 1 – Статистичний аналіз якості кріплення нафтових і газових свердловин по геологічних підприємствах ДП Полтаванафтогазгеологія і ДП Чернігівнафтогазгеологія

Підприємство	Тампонажний матеріал	Якість контакту цементного каменю з обсадною колоною, за даними АКЦ, %		
		щільний контакт	ослаблений контакт	слабкий контакт
ДП Полтаванафтогазгеологія	ШПЦС-120	19,6	12,4	68,0
	ЦЗкС	44,2	48,6	7,2
ДП Чернігівнафтогазгеологія	ШПЦС-120	20,1	13,7	66,2
	ЦЗлС	36,4	53,3	10,3

Проведеними дослідженнями [2] встановлено, що в нормальних умовах твердіння бетонів з портландцементу відбувається деформація їх усадки внаслідок випаровування води і карбонізації цементу, лінійна величина якої становить 0,05 – 0,1%.

В праці [5] також відзначається, що деформація усадки спостерігається не лише у стандартних портландцементів, але й у шлакових та цементо-зольних тампонажних матеріалів.

Перспективним шляхом розв'язання проблеми одержання стійкого герметичного і довговічного контакту цементного каменю з обсадною колоною й стінками свердловини та достатнього ступеня ущільнення фільтраційної кірки на пористих гірських породах для запобігання виникненню заколонних міжпластових перетоків, є створення безусадкових тампонажних матеріалів та композицій, що розширюються при твердінні [6].

Вирішення задачі створення безусадкового (розширювального) складу в умовах високих тисків і температур є складним завданням. Тому більш детально зупинимось на загальних закономірностях процесу розширення в'язучих матеріалів, що використовуються при будівництві різних споруд.

Сьогодні відомі три основні способи розширення цементного каменю:

1. До складу цементу входять речовини, які при хімічній реакції утворюють газоподібні продукти. Пухирці газу, збільшуючись в об'ємі, викликають розширення цементного складу.

2. Утворення комплексних солей типу гідросульфоалюмінату кальцію трисульфатної форми (етрінгіту)  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 31\text{H}_2\text{O}$ .

3. Гідратація вільних оксидів кальцію [7, 8] або магнію [9] з одержанням  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  або  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , які за об'ємом приблизно у 2 рази перевищують початкові оксиди [10, 11].

Перший спосіб не підходить для створення тампонажних матеріалів, що використовуються в умовах високих тисків, які протидіють розширенню пухирців газу.

Другий спосіб – ефект розширення з утворенням етрінгіту може спостерігатись в двох системах:

1. При взаємодії розчиненого у воді гіпсу з кристалами гідроалюмінатів кальцію. В цьому випадку крупні кристали сульфоалюмінату кальцію не поміщаються в об'ємі, який займали гідроалюмінати кальцію і викликають розширення каменю.

2. При утворенні сульфоалюмінату кальцію кристалізацією з розчину, але в такий період тужавіння цементного каменю, коли кристалізаційний каркас має достатню жорсткість [12].

Якщо швидкість росту кристалів сульфоалюмінату кальцію досягає максимуму в період, коли структура цементного каменю має достатню жорсткість, то розширення буде значне. Якщо ж кристали сульфоалюмінату кальцію завершують ріст у ще слабко структурованому розчині, то вони лише стискають гелеподібну масу і розширення системи практично не відбувається. Зміна швидкості і характеру кристалізації еtringіту<sup>2</sup> досягається регулюванням ступеню пересичення водного розчину в твердіючому камені CaO, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Реакцію синтезу еtringіту регулювати дуже складно оскільки існує небезпека пізнього розширення, і як наслідок, руйнування каменю. Крім того, цементи з високим вмістом еtringіту переважно швидко тужавіють і є нетерmostійкими. До таких цементів належать глиноземистий цемент з домішками гіпсу, суміш портландцементу, високоглиноземного шлаку, гіпсу й активної мінеральної домішки [12], в'язуче на основі біліто-сульфоалюмінатного клінкеру [13].

Даними [14, 15] підтверджується ефективність застосування при низьких температурах (-5 ÷ 20 °C) композицій, що розширюються при тужавінні за рахунок утворення гідросульфоалюмінату кальцію.

Для широкого спектру тампонажних матеріалів більше підходять домішки на основі вільних оксидів кальцію і магнію, що розширюються при тужавінні. Швидкість гідратації CaO і MgO залежить від температури обпалювання сировини (карбонатів, доломітів тощо), а також від тонкості подрібнення готового продукту. Цементні композиції обпалені при 858 ÷ 1200 °C, які вміщують вільне вапно, при порівняно великій величині розширення утворюють камінь, який не руйнується, а композиції з вапном, обпаленим при 1400 °C внаслідок нерівномірного розширення, що відбувається після утворення "жорсткої структури", схильні до тріщиноутворення та втрати міцності.

Тампонажний цемент, що розширюється, одержують шляхом введення домішок меленого негашеного вапна, вміст якого може змінюватись від 5 до 20 % залежно від конкретних задач.

Підвищення температури до 80 °C і вище пришвидшує процес гідратації. При цьому перехід CaO в гідроксид кальцію проходить до формування структури і розширення практично не відбувається. Тому для одержання розширення структури цементу перспективним є використання в якості домішки, що розширюється, матеріалів у яких зерна вільного вапна зовні захищені оболонкою. Це можна спостерігати в деяких видів шлаків і паливних зол.

Підвищити терmostійкість, зберігаючи ефект розширення, можна шляхом створення складної композиції, до складу якої входить шлакопідпаний цемент, пилевидна зола горючих сланців, нітрлотриметилфосфорова кислота, ферохромлігносульфонат, бентонітовий глино порошок і залізний купорос [16].

Застосування хроматного шламу, відходів виробництва хромових солей [17, 18] знайшло застосування для створення тампонажних матеріалів, що розширюються при твердінні, так як у них міститься значна кількість вільного оксиду кальцію. У якості в'язучого в таких матеріалах використовувались портландцемент, шлакові цементи тощо.

У свердловинах з вибійними температурами більшими 120 °C як розширювальна домішка може використовуватись менш активний за CaO оксид магнію.

Випалений при 1200 – 1300 °C оксид магнію може використовуватись як розширювальна домішка для цементу, що тужавіє при температурах 120 – 160 °C. При температурах вищих 160 °C як розширювальна домішка може застосовуватись MgO, обпалений при більш високій температурі. Мертвообпалений периклаз може застосовуватись як розширювальна домішка для температур 180 °C.

Згадані відходи виробництва хромових солей і хроматний шлам крім вільного оксиду кальцію вміщують 36 % периклазу. Ці відходи застосовують для створення

---

<sup>2</sup> Важкорозчинний гідросульфоалюмінат кальцію

цементу, що розширюється, розширення й самоупругнення якого значні і дають змогу одержати рівномірний контакт в системі свердловина–цементний камінь–обсадна колона [19, 20].

Разом з тим, особливості кінетики розширення термостійких тампонажних матеріалів автоклавного твердіння (наприклад, зольних сумішей), а також їх технологічні властивості вивчені недостатньо.

**Метою** даної роботи є дослідження кінетики розширення тампонажного матеріалу у процесі тужавіння, а також вивчення технологічних властивостей термостійких тампонажних матеріалів, що розширюються при тужавінні, та закономірностей процесу їх тужавіння. Для досягнення цієї мети поставлені такі **завдання** досліджень:

- дослідження кінетики розширення тампонажного матеріалу у процесі тужавіння, аналіз кривих розширення з точки зору впливу на темп процесу тужавіння фізико-хімічних факторів;

- вивчення технологічних властивостей термостійких тампонажних матеріалів – сумішей, що тужавіли тривалі терміни при високих температурах;

- встановлення залежності технологічних властивостей каменю на основі термостійких тампонажних матеріалів, що розширюються при тужавінні, від фізико-хімічних факторів, зокрема, складу тампонажної суміші, температури, тиску і тривалості тужавіння.

### 3. МЕТОДИ ТА МАТЕРІАЛИ

Приготування (замішування) тампонажних розчинів в лабораторних умовах здійснювалось стандартним способом із замішуванням на водопровідній воді за допомогою змішувача лопатевого при швидкості обертання валу  $1500 \pm 100 \text{ хв}^{-1}$ . Кількість води брали відповідно з визначеним водосумішевим відношенням (В/С).

Водосумішеве відношення визначалось виходячи з розтічності тампонажних розчинів за допомогою конусу розтічності, яка повинна бути в межах 0,18 – 0,22 м розпливу на крузі.

Властивості тампонажних розчинів оцінювались седиментаційною стійкістю та швидкістю водовідділення, які визначались за стандартною методикою.

Густина тампонажних розчинів визначалась за допомогою відкаліброваного пікнометра місткістю  $100 \text{ см}^3$  з попередньо визначеною (у чистому і сухому вигляді) масою  $m_1$  у грамах.

Водовідділення визначалось за стандартною методикою. Згідно з вимогами стандартів, для тампонажних портландцементів величина водовідділення повинна становити не більше ніж  $7,5 \div 10 \text{ мл}$ .

Час прокачування тампонажних розчинів досліджували на консистометрі КЦ-3.

Визначення об'ємних деформації розширення тампонажного матеріалу при тужавінні проводилися за допомогою приставки до консистометра КЦ-3, котра дає можливість одержати криву розширення тампонажного матеріалу при високих температурах і тисках [2].

Зберігання взірців тампонажного каменю проводилось в автоклавній установці АУ-1-71-ИЭ, яка складається з автоклавів, електричної та гідравлічної обв'язки, вимірювальних і реєструючих приладів для контролю температури і тиску в автоклавах. Установка розрахована на температуру до 523 К і тиск до 100 МПа, а контроль за названими параметрами здійснюється в автоматичному режимі[2].

Взірці виготовлялись у формі циліндрів діаметром 0,03 м і висотою 0,03 м та балочок розміром  $0,04 \times 0,04 \times 0,16 \text{ м}$ . Форми із взірцями цементу збирали у батареї, відповідно до робочого об'єму автоклавів, і поміщали в попередньо підігріте середовище.

Визначення механічної міцності при вигині і стисненні проводилось за типовими методиками.

Незважаючи на те, що механічна міцність утвореного в лабораторії каменю не може повною мірою відтворити всі технологічні властивості тампонажних матеріалів, на сьогодні вона є однією з основних його оціночних характеристик. Визначення границь міцності цементного каменю проводилося за типовими методиками: при вигині на приладі для випробування взірців-балочок на розтягування при вигині, при стискуванні – на пресі ПСУ–10 [2].

Визначення газопроникності взірців тампонажного каменю здійснювалось на установці ГК-5 за методикою, яка описана в роботі [2].

#### 4. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І РЕЗУЛЬТАТИ

Для забезпечення геологічної галузі України якісними термостійкими тампонажними цементами, які розширюються при тужавінні, та покриття дефіциту в цих матеріалах групою дослідників на лабораторній базі Полтавського відділення Українського державного геологорозвідувального інституту (УкрДГРІ) розроблено рецептури безклінкерних розширювальних термостійких тампонажних матеріалів з високими технологічними властивостями.

Основою для створення розширювальних термостійких тампонажних матеріалів стала висококальцієва зола-винос (ЗВ), що утворюється при спалюванні горючих сланців на Прибалтійській ТЕС, яка вміщує активний гідроксид кальцію.

Висококальцієва зола Прибалтійських (Естонських) сланців являє собою порошок світло-жовтого кольору густиною 2800 – 2950 кг/м<sup>3</sup>. Існує два типи золи: циклонна і електрофільтрова. Питома поверхня циклонної складає 80 – 110 м<sup>2</sup>/кг, електрофільтрової – приблизно в чотири рази більша.

Хімічний склад циклонної золи: CaO – 40 – 45 % (з них вільного CaO – 12 – 20 %); SiO<sub>2</sub> – 26 – 28 %; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 6 – 8 %; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 4,5 – 5,0 %; MgO – 4 – 5 %.

Хімічний склад електрофільтрової золи: CaO – 30 – 33 % (з них вільного CaO – 6,5 – 7,0 %); SiO<sub>2</sub> – 30 – 32 %; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 7 – 8 %; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 4,0 – 4,5 %; MgO – 4 – 4,5 %. Як правило поставляється суміш золи циклонної і електрофільтрової, тому можливе деяке коливання її властивостей.

Для одержання термостійких тампонажних складів з регульованою густиною до Прибалтійської золи потрібно додавати активну мінеральну домішку з високим вмістом кремнезему, наприклад, кислу золу, що утворюються при спалюванні кам'яного вугілля Донецького або Волинського басейнів. Кисла зола-виносу теплових електростанцій застосовується в якості активної мінеральної (пуцоланової) домішки.

В даній праці досліджувались суміші золи естонських сланців із золою Ладизинської і Курахівської ТЕС. Обидві ці кислі золи відрізняються високим вмістом SiO<sub>2</sub> (більше 50 %), частка інших оксидів в них також приблизно однакова. Головна відмінність золи Курахівської ТЕС від золи Ладизинської ТЕС в густині і питомій поверхні. Зола Курахівської ТЕС має меншу густину і більшу питому поверхню. Тому її рекомендується застосовувати для створення полегшених тампонажних сумішей.

Зола кисла Кураховської ТЕС (ЗК<sub>к</sub>) являє собою порошок темно-сірого кольору, густиною 1980 – 2000 кг/м<sup>3</sup>, питомою зовнішньою поверхнею 350 – 420 м<sup>2</sup>/кг. Її насипна маса 1100 – 1150 кг/м<sup>3</sup>. Хімічний склад золи: SiO<sub>2</sub> – 52 – 54 %; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 15 – 24 %; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 17 – 22 %; CaO – 2,2 – 6,0 %.

Зола кисла Ладизинської ТЕС (ЗК<sub>л</sub>) являє собою порошок зеленувато-сірого кольору, густиною 2400 – 2500 кг/м<sup>3</sup>, питомою зовнішньою поверхнею 210 – 220 м<sup>2</sup>/кг. Її насипна маса 1500 – 1600 кг/м<sup>3</sup>. Хімічний склад золи: SiO<sub>2</sub> – 57 %; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 23 %; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 11 %; CaO – 2,0 %; MgO – 2,0 %.

Співвідношення висококальцієвої і кислої зол в сумішах змінювалось в межах від 30 : 70 до 70 : 30 % Встановлено, що розчини з таких рецептур золових сумішей (ЗС) мають оптимальні технологічні властивості (таблиця 2).

Густина тампонажних розчинів змінюється в широких межах. З'являється можливість одержувати склади з нормальною густиною при введенні в суміш золи Ладижинської ТЕС і полегшені при використанні золи Курахівської ТЕС.

Таблиця 2 – Технологічні властивості тампонажних розчинів із золувих сумішей

Склад тампонажної суміші, мас. часток %			В/С	Рухливість, м	Густина, кг/м <sup>3</sup>	Водовідділення, мл
ЗВ	Зола кисла					
	ЗК <sub>к</sub>	ЗК <sub>л</sub>				
30	–	70	0,40	0,19	1790	10,0
50	–	50	0,50	0,21	1720	15,0
70	–	30	0,45	0,19	1740	10,0
30	70	–	0,55	0,19	1540	6,0
50	50	–	0,55	0,22	1570	12,0
70	30	–	0,55	0,20	1620	10,5

Таблиця 3 – Прокачуваність золувих сумішей

Склад суміші, мас. долей %			В/С	Прокачуваність, хвилини				
				Температура, °С; тиск, МПа; домішка НТФК, %				
ЗВ	ЗК <sub>л</sub>	ЗК <sub>к</sub>		t=75 P=30 c=0	t=75 P=30 c=0,05	t=100 P=40 c=0	t=100 P=40 c=0,05	t=100 P=40 c=0,10
50	50	–	0,50	2–40	4–10	1–00	3–00	3–30
70	30	–	0,45	1–50	2–30	0–30	1–40	2–30
30	70	–	0,40	3–20	4–30	1–20	3–30	4–30
50	–	50	0,55	3–30	4–00	1–10	3–30	4–10
70	–	30	0,55	2–30	2–50	1–00	2–40	3–20
30	–	70	0,55	4–00	4–40	1–20	3–50	4–30

Тампонажні суміші із золою естонських сланців не мають високої стабільності, особливо це стосується сумішей ЗВ : ЗК<sub>л</sub>. Це можна пояснити наступним чином. В якості золи естонських сланців використовується продукт, що вміщує як електрофільтрові так і циклонну золу, а циклонна зола має дуже малу питому поверхню (в 3 – 4 рази нижчу, ніж у портландцементу), що негативно позначається на стабільності. У сумішах із золою кислою, за рахунок її високої дисперсності, вдається дещо підвищити седиментаційну стійкість. В якості стабілізатора, при необхідності, можна рекомендувати стандартні реагенти ОЕЦ в кількості до 0,15 % від маси сухої речовини.

Результати дослідження прокачуваності, проведені на консистометрі КЦ-3 (таблиця 3), дозволяють рекомендувати як сповільнювач загущення нітрлотриметилфосфонову кислоту (НТФК).

При температурах 75 °С і нижчих практично усі склади мають прокачуваність більшу двох годин, а рецептури, які вміщують 50 – 70 % золи кислої – більше трьох годин, тобто існує можливість застосування золувих сумішей без сповільнювача для цементування неглибоких свердловин.

Розширення золувих сумішей відбувається за рахунок переходу вільних оксидів СаО і MgO у відповідні гідроксиди [2]. Деякий вклад у збільшення об'єму може вносити також утворення еtringіту. Важливо, щоб процес розширення відбувався до утворення жорсткої

кристалізаційної структури, тобто в той період, коли система здатна до пластичної деформації без руйнування.

Золові суміші розширюються після закачування і продавлювання тампонажного матеріалу на протязі 2 – 5 годин (рисунок 1, 2). При підвищених температурах (більше 75 °С) практично закінчується утворення  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  і еtringіту і процес розширення, переважно, завершується. Таким чином, виключається можливість руйнування тампонажного каменю в пізні терміни тужавіння. Відносна величина розширення змінюється від 0,4 до 3 %, причому у сумішей ЗВ : ЗК<sub>к</sub> ці показники значно вищі, ніж у сумішей ЗВ : ЗК<sub>л</sub>.

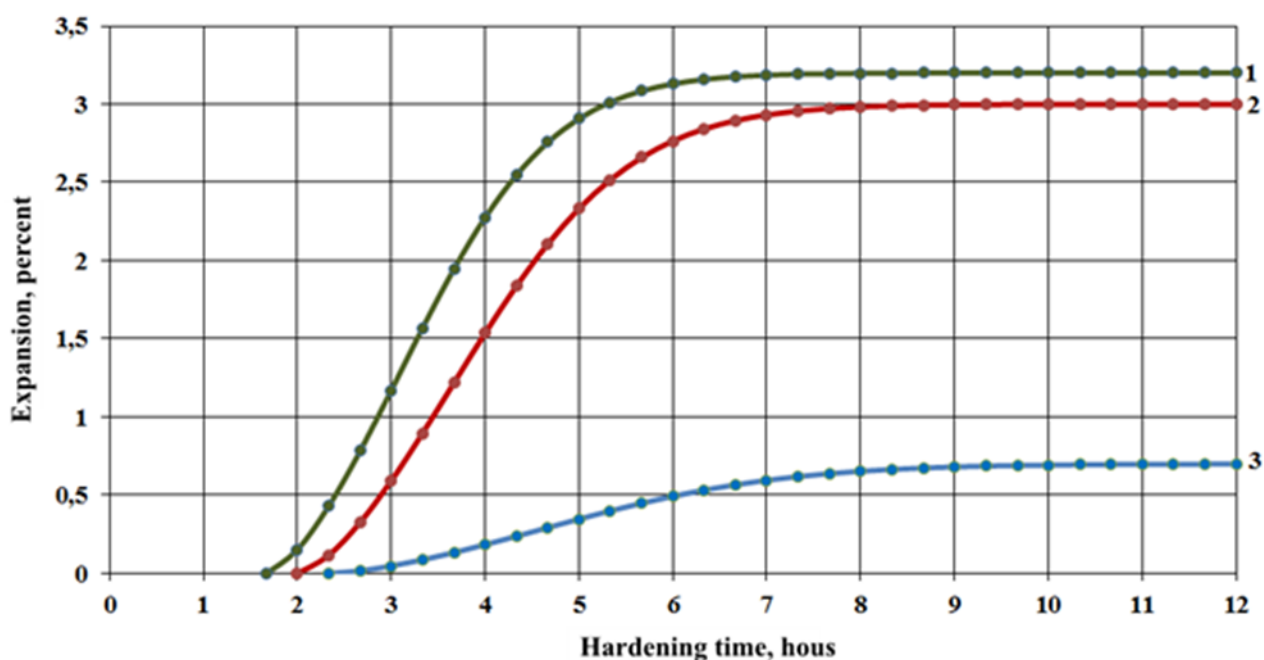


Рисунок 1 – Залежність величини розширення від співвідношення компонентів у суміші

Умови тужавіння: температура 348 К, тиск 30 МПа; 1, 2, 3 – ЗВ : ЗК<sub>к</sub> відповідно 70 : 30, 50 : 50, 30 : 70, В/С – 0,55

Існують різні думки про зв'язок міцності тампонажного каменю і якості ізоляції затрубного простору свердловини. Деякі фахівці вважають завищеними існуючі вимоги до міцності каменю. У праці [2] обґрунтовується мінімально допустима величина міцності при стисненні, яка становить 0,9 – 3,5 МПа. Приведені в таблиці 4 дані свідчать про високі фізико-механічні показники золоних сумішей. Золоні суміші мають високу термостійкість. Міцність зростає з часом при високих температурах у рецептур, які вміщують 30 – 50 % золи висококальцієвої. При температурах до 100 °С оптимальні результати одержані для сумішей, де доля золи висококальцієвої складає 50 – 70 %.

Порівняльний аналіз показує, що міцність досліджуваних сумішей значно вища, ніж у стандартних полегшених цементів типу ОЩ і ОЦГ. До 28 діб це перевищення досягає 2 – 3 рази.

В разі необхідності застосування золоних сумішей при температурах нижчих 35 °С для прискорення їх схоплення і набору міцності в ранні терміни тужавіння можна додавати стандартні прискорювачі схоплення, наприклад  $\text{CaCl}_2$  в кількості 2 – 3 %.

Основною властивістю тампонажного каменю, особливо з точки зору його придатності для цементування експлуатаційних колон, є проникність.

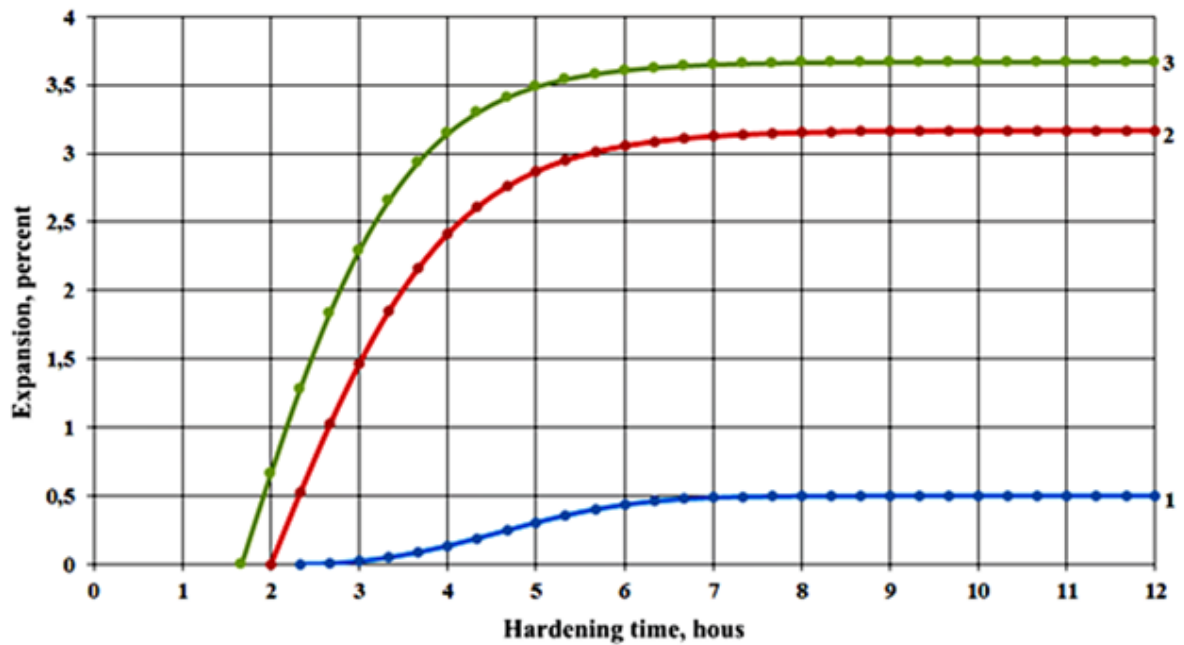


Рисунок 2 – Залежність величини розширення від тиску і температури  
 Умови тужавіння: 1 – температура 323 К, тиск 20 МПа; 2 – температура 373 К, тиск 40 МПа; 3 – температура 433 К, тиск 60 МПа; 1, 2, 3 – ЗВ : ЗК<sub>к</sub> – 50 : 50, В/С – 0,55

За даними досліджень, проникність портландцементного каменю з В/Ц 0,5 складає від 1,5 до  $5,0 \times 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup> через 2 доби тужавіння в температурному інтервалі 20 – 130 °С. Не зважаючи на вміст води в золувих сумішах, значення газопроникності каменю на їх основі нижче, приблизно, на порядок і знаходиться в межах  $0,09 \div 0,90 \times 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup> (таблиця 5).

Таблиця 4 – Фізико-механічні властивості тампонажного каменю

Склад суміші, мас. %			Міцність при вигині / стисненні, МПа							
ЗВ	ЗК <sub>л</sub>	ЗК <sub>к</sub>	t = 75 °С, P = 30 МПа				t = 120 °С, P = 50 МПа			
			2 діб	7 діб	28 діб	6 міс	2 діби	7 діб	28 діб	6 міс
30	70	–	5,2/11,0	7,2/12,1	7,6/15,8	8,5/18,0	3,9/12,5	4,7/12,9	6,2/14,4	6,5/14,0
50	50	–	6,2/13,1	7,2/16,2	8,0/16,8	9,0/18,8	4,1/12,8	4,9/14,8	5,5/15,2	5,8/14,2
70	30	–	6,8/16,5	7,0/16,0	7,1/19,6	8,0/19,8	5,9/18,5	6,7/20,5	7,7/20,9	6,0/13,8
30	–	70	3,9/10,1	4,2/11,1	5,1/13,2	7,1/16,6	3,4 / 6,8	3,8 / 9,1	5,1/13,9	5,5/13,5
50	–	50	5,1/10,5	5,5/10,9	8,5/11,5	9,5/17,5	3,9/12,2	5,4/13,5	6,3/15,3	6,6/15,6
70	–	30	6,5/13,9	7,1/15,1	9,1/16,8	8,9/18,5	6,2/13,7	7,4/18,7	7,9/21,0	6,3/15,5

Таблиця 5 – Газопроникність тампонажного каменю

Склад суміші, мас. %			Газопроникність, мкм <sup>2</sup> × 10 <sup>-3</sup>					
ЗВ	ЗК <sub>л</sub>	ЗК <sub>к</sub>	t=75 °С, P=30МПа			t=120 °С, P=50МПа		
			2 доби	7 діб	6 міс.	2 доби	7 діб	6 міс.
30	70	–	0,70	0,52	0,09	0,16	0,15	0,10
50	50	–	0,51	0,48	0,11	0,15	0,18	0,09
70	30	–	0,35	0,88	0,08	0,43	0,43	0,16
30	–	70	0,62	0,48	0,10	0,52	0,43	0,21
50	–	50	0,58	0,55	0,09	0,18	0,12	0,15
70	–	30	0,45	0,51	0,12	0,06	0,08	0,09

Низькі значення величини газопроникності, очевидно, зв'язані з ущільненням структури каменю на основі зольних сумішей, які відбуваються внаслідок заповнення пор дрібнокристалічними продуктами гідратації, зокрема, низькоосновними гідросилікатами кальцію.

Отже, камінь із золених сумішей має високі експлуатаційні властивості: має високу міцність і низьку проникність в температурному інтервалі 35 – 120 °С. Крім того, дані суміші відрізняються високою корозійною стійкістю в різних агресивних середовищах. Все це дозволяє зробити висновок про природність золених сумішей для цементування продуктивних горизонтів у складних гірничо-геологічних умовах.

## 5. ВИСНОВКИ (Conclusions)

5.1. Аналіз отриманих у роботі кінетичних кривих розширення тампонажного матеріалу у процесі тужавіння показує, що, по-перше, процес розширення практично завершується через 2 – 5 години; по-друге, величина розширення максимальна при високих температурах (373 – 433 К) і нижча при 323 К; по третє збільшення вмісту ЗВ в зольній суміші суттєво впливає на величину розширення.

5.2. Вивчення технологічних властивостей термостійких тампонажних матеріалів – сумішей, що тужавили тривалі терміни при високих температурах дозволили встановити такі характерні особливості:

– 6-ти місячна міцність тампонажного каменю перевершує 2-добову;

– найвищу міцність мають зольні суміші, що тужавили при  $t = 100$  °С; газопроникність тампонажного каменю, отриманого на основі зольних сумішей знаходиться в межах  $(0,08-0,88) \times 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>, що достатньо для якісної ізоляції свердловин.

5.3. Вивчення залежності технологічних властивостей тампонажного каменю на основі термостійких тампонажних матеріалів, що розширюються при тужавінні, від фізико-хімічних чинників, зокрема, складу тампонажної суміші, температури, тиску і тривалості тужавіння дозволило встановити такі характерні особливості: – на величину міцності тампонажного каменю, отриманого на основі зольних сумішей, впливає тривалість тужавіння, із збільшенням терміну тужавіння міцність зростає; – на величину газопроникності тампонажного каменю, отриманого на основі зольних сумішей, впливає тривалість тужавіння, із збільшенням терміну тужавіння газопроникність зменшується.

## СИМВОЛИ (Symbols)

АУ-1-71-ИЭ – автоклавна установка конструкції Полтавського відділення УкрДГРІ;

АКЦ – акустичний цементомір;

ШПЦС-120 – шлакопортландцемент для високих температур;

ОЦГ, ОШЦ – полегшені тампонажні цементи;

ЦЗкС – цементно-зольна суміш із застосуванням золи-виносу Курахівської ТЕС;

ЦЗлС – цементно-зольна суміш із застосуванням золи-виносу Ладиженської ТЕС;

ЗВ – зола висококальцієва;

ЗК – зола кисла (джерело кремнезему);

ЗК<sub>Л</sub> – зола кисла Ладижинської ТЕС;

ЗК<sub>К</sub> – зола кисла Курахівської ТЕС;

В/С – водо-сумішеве відношення;

В/Ц – водо-цементне відношення;

ОЕЦ – оксиетилцелюлоза;

НТФК – нітрилотриметилфосфонова кислота;

$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$  – етрінгіт (гідросульфоалюмінат кальцію трисульфатної форми);

$\text{Ca}(\text{OH})_2$  – оксид кальцію;

Mg(OH)<sub>2</sub> – оксид магнезії;  
ДСТУ БВ.2.7–86–99 – Державний стандарт України: Цементи тампонажні. Методи випробувань;  
ТЕС – теплова електростанція;  
ПВ УкрДГРІ – Полтавське відділення Українського державного геологорозвідувального інституту;  
БУ “Укрбургаз” – бурове управління Укрбургаз;  
ПАТ “Укргазвидобування” – публічне акціонерне товариство Укргазвидобування.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Впровадження розширювального тампонажного матеріалу під час кріплення свердловин у складних гірничо-геологічних умовах / С. В. Тріфонов, С. В. Чеканов, А. Б. Сочелаяс [та ін.] // Нафтова і газова промисловість. – 2003. – № 3. – С. 30 – 32.
2. Орловський В. М. Тампонажні матеріали, що розширюються при твердінні: Монографія / В. М. Орловський. – Полтава, 2015. – 129 с.
3. Аналіз причин неякісного розмежування пластів в умовах Дніпровсько-Донецької западини / Р. В. Бандур, О. В. Лужаниця, С. Г. Михайленко [та ін.] // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. – № 3. – С. 127 – 130.
4. Гамзатов С. И. Применение вяжущих веществ в нефтяных и газовых скважинах / С. И. Гамзатов. – М.: Недра, 1985. – 148 с.
5. Керцман А. З. Бесклинкерный тампонажный материал на основе доломитового производства: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.11 / Керцман Альфред Зейдович. – Полтава, 1984. – 170 с.
6. Moncef, L. N. Rheological properties of oil well cement slurries [Text] / L. N. Moncef, S. Anjuman // Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Construction Materials. – 2012. – Vol. 165, Issue 1. – P. 25–44. doi: 10.1680/coma.2012.165.1.25
7. Liwu, M. MgO expansive cement and concrete in China: past, present and future [Text] / M. Liwu, D. Min, T. Mingshu, A. T. Abir // Cement and Concrete Research, 2014. – Vol. 57. – P. 1–12. doi: 10.1016/j.cemconres.2013.12.007
8. Parashchuk, L. The use of granulated modified lime for expansive cement with high-energy self-tension [Text] / L. Parashchuk, V. Kochubei, Ya. Yakymchko // Chemistry and chemical technology. – 2011. – Vol. 3, Issue 5. – P. 341–345.
9. Jafariesfad, N. Nano-Sized MgO with Engineered Expansive Property for Oil Well Cement Systems [Text] / N. Jafariesfad, Y. Gong, M. Geiker, P. Skalle // SPE Bergen One Day Seminar. – 2016. doi: 10.2118/180038-ms
10. Тампонажні матеріали для помірних і підвищених температур, що розширюються при твердінні / В. М. Орловський // Науково-технічний журнал Нафтогазова інженерія. – Число 2. – Полтава: ПолтНТУ, 2017. – с. 64 – 69.
11. Вплив оксидів кальцію і магнезії на властивості розширливих цементів та тампонажних розчинів / П. С. Мазурок, Т. Ш. Тургунов, В. А. Свідерський, В. В. Токарчук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2017. – № 4/6 ( 88 ). – С. 47 – 52. doi: 10.15587/1729-4061.2017.108377
12. Бутт Ю. М. Химическая технология вяжущих материалов / Ю. М. Бутт, М. М. Сычов, В. В. Тимашев. – М.: Высшая школа, 1980. – 472 с.
13. А. с. №1411313 СССР, МКИ Е 21 В/138. Способ получения утяжеленного тампонажного вяжущего / С. М. Баш (СССР). – Био и ТЗ № 15, 1988.
14. А. с. №1348501 СССР, МКИ Е 21 В/138. Тампонажный раствор / А. А. Ключов, М. М. Шаленин, Г. С. Давлетбаева и др. (СССР). – Био и ТЗ № 40, 1987.
15. А. с. №1201490 СССР, МКИ Е 21 В/138. Тампонажный раствор / В. И. Корнеев, Н. Н. Шестопалова, И. А. Одинцова и др. (СССР). – Био и ТЗ № 48, 1985.

16. А. с. 1571220 СССР, МКИ Е 21 В/138. Расширяющийся тампонажный раствор / В. Г. Тихонов, В. П. Банатов, Б. В. Крих (СССР). – Био и ТЗ № 22, 1990.
17. А. с. 352855 СССР, МКИ Е 21 В/138. Вяжущее / В. С. Данюшевский, В. И. Дейнежко, Э. А. Липсен и др. (СССР). – Био и ТЗ № 29, 1972.
18. А. с. 1513124 СССР, МКИ Е 21 В/138. Расширяющийся тампонажный состав / Н. Х. Каримов, Л. С. Запорожец, Н. А. Охотникова (СССР). – Био и ТЗ № 37, 1989.
19. А. с. 1033711 СССР, МКИ Е 21 В/138. Расширяющийся цемент / Н. Х. Каримов, Л. С. Запорожец, В. И. Петерс и др. (СССР). – Био и ТЗ № 29, 1983.
20. А. с. 1033711 СССР, МКИ Е 21 В/138. Расширяющийся тампонажный материал / Н. Х. Каримов, В. И. Петерс, Л. С. Запорожец (СССР). – Био и ТЗ № 2, 1985.

#### **ABSTRACT (IN UKRAINIAN)**

**Мета.** Метою даної роботи є дослідження кінетики розширення тампонажного матеріалу у процесі тужавіння, а також вивчення технологічних властивостей термостійких тампонажних матеріалів, що розширюються при тужавінні, та закономірностей процесу їх тужавіння. Для досягнення цієї мети поставлені такі завдання досліджень:

- дослідження кінетики розширення тампонажного матеріалу у процесі тужавіння, аналіз кривих розширення з точки зору впливу на темп процесу тужавіння фізико-хімічних факторів;
- вивчення технологічних властивостей термостійких тампонажних матеріалів – сумішей, що тужавіли тривалі терміни при високих температурах;
- встановлення залежності технологічних властивостей каменю на основі термостійких тампонажних матеріалів, що розширюються при тужавінні, від фізико-хімічних чинників, зокрема, складу тампонажної суміші, температури, тиску і тривалості тужавіння.

**Методика.** При проведенні досліджень використано теоретичні й експериментальні методи. Експерименти проведено на лабораторному обладнанні, яке моделює пластові умови. Вимірювання технологічних властивостей тампонажного розчину та утвореного каменю проводилось з використанням стандартного лабораторного обладнання. Зокрема густина тампонажних розчинів визначалась з допомогою пікнометра, водосумішеве відношення розчинів підбиралось за допомогою конусу розтічності КР-1, водовідділення розчинів визначалось за стандартною методикою згідно ДСТУ БВ.2.7-86-99, час загуснення розчинів визначався на консистометрі КЦ-3, визначення границь міцності каменю при вигині проводилось згідно ДСТУ БВ.2.7-86-99 на приладі для випробування зразків-балочок на розтягування при вигині, при стискуванні – на пресі ПСУ-10.

Кількість проведених експериментів достатня для одержання результатів з довірчою вірогідністю 0,95.

**Результати.** Досліджено кінетику розширення тампонажного матеріалу у процесі тужавіння. Вивчено технологічні властивості термостійких тампонажних матеріалів, що розширюються при тужавінні, та закономірності процесу їх тужавіння.

**Наукова новизна.** У процесі дослідження нових термостійких тампонажних матеріалів, що розширюються при тужавінні проведено підбір оптимальних рецептур розроблених композицій, вивчено кінетику їх розширення при тужавінні. Вивчено залежність міцнісних характеристик, а також проникності каменю від співвідношення компонентів у тампонажній суміші.

**Практична значимість.** Результати роботи мають практичне застосування при кріпленні глибоких свердловин в складних гірничо-геологічних умовах на геологорозвідувальних площах і промислових родовищах. Нові тампонажні матеріали, що розширюються при тужавінні, успішно впроваджені на бурових підприємствах БУ “Укрбургаз” ПАТ “Укргазвидобування” при цементуванні газових і газоконденсатних свердловин.

**Ключові слова:** тампонажний матеріал, розширення цементного каменю, термостійкість, густина

#### **ABSTRACT (POLISH)**

**Objective.** Celem niniejszej pracy jest zbadanie kinetyki ekspansji materiału cementowego podczas twardnienia, a także zbadanie właściwości technologicznych żaroodpornych materiałów

cementowych, które ekspandują podczas twardnienia, oraz prawidłowości procesu ich twardnienia. Aby osiągnąć ten cel, postawiono następujące zadania badawcze:

– badanie kinetyki ekspansji materiału cementowego podczas twardnienia, analiza krzywych ekspansji z punktu widzenia wpływu czynników fizykochemicznych na szybkość procesu twardnienia;

– badanie właściwości technologicznych żaroodpornych materiałów cementowych – mieszanek, które twardniały przez długi czas w wysokich temperaturach;

– określenie zależności właściwości technologicznych kamienia na bazie żaroodpornych materiałów cementowych, które ekspandują podczas twardnienia, od czynników fizykochemicznych, w szczególności składu mieszanki cementowej, temperatury, ciśnienia i czasu twardnienia.

**Metodyka.** W badaniach wykorzystano metody teoretyczne i eksperymentalne. Eksperymenty przeprowadzono na sprzęcie laboratoryjnym symulującym warunki złożowe. Pomiar właściwości technologicznych zaprawy cementowej i kamienia formowanego przeprowadzono przy użyciu standardowego sprzętu laboratoryjnego. W szczególności, gęstość zapraw cementowych określono za pomocą piknometru, stosunek wody do mieszaniny roztworów dobierano za pomocą stożka przepływowego KR-1, rozdział wody w roztworach określono metodą standardową zgodnie z DSTU BV.2.7-86-99, czas gęstnienia roztworów określono na konsystometrze KC-3, a granicę wytrzymałości kamienia na zginanie przeprowadzono zgodnie z DSTU BV.2.7-86-99 na urządzeniu do badania próbek belkowych na rozciąganie przy zginaniu oraz na prasie PSU-10 na ściskanie.

Liczba przeprowadzonych eksperymentów jest wystarczająca, aby uzyskać wyniki z prawdopodobieństwem ufności 0,95.

**Wyniki.** Zbadano kinetykę rozszerzalności cieplnej cementu podczas twardnienia. Zbadano właściwości technologiczne żaroodpornych materiałów cementowych rozszerzających się podczas twardnienia oraz prawidłowości procesu ich twardnienia.

**Nowość naukowa.** W procesie badań nad nowymi żaroodpornymi materiałami cementowymi, które ekspandują podczas twardnienia, wybrano optymalne receptury opracowanych składów, zbadano kinetykę ich ekspandowania podczas twardnienia. Zbadano zależność charakterystyki wytrzymałościowej oraz przepuszczalności kamienia od proporcji składników w mieszance cementowej.

**Znaczenie praktyczne.** Wyniki pracy znajdują praktyczne zastosowanie w cementowaniu głębokich odwiertów w trudnych warunkach górniczo-geologicznych na obszarach poszukiwań geologicznych i w złożach przemysłowych. Nowe materiały cementowe, które zwiększają swoją objętość podczas twardnienia, zostały z powodzeniem wdrożone w przedsiębiorstwach wiertniczych jednostki wiertniczej Ukrburgaz należącej do Ukgazwydobuвання PJSC, w cementowaniu odwiertów gazowych i gazowo-kondensatowych.

**Słowa kluczowe:** materiał cementowy, rozszerzalność cieplna kamienia cementowego, odporność na ciepło, gęstość.

## ABOUT AUTHORS

**В. М. Орловський** канд. техн. наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, e-mail: svaroh13@ukr.net

**В. С. Білецький** д-р техн. наук, професор, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, e-mail: biletisk@i.ua