

тури процесу і коливань температури в цій зоні. Стосовно до умов, коли температурна залежність теплоємності матеріалу пластини є лінійною, отримано аналітичний вираз для знаходження зміни температури в часі в області теплопідводу.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, багатошарові пластини, явище локалізації, заміщення умов однозначності, процеси теплопровідності.

Prokopov V.G. Analysis of Opportunities of Dimensional Changes of Laminated Plates in the Mathematical Modeling of Heat Transfer Processes

The processes of heat conduction in multilayer plates in the presence of pulsed sources of heat were studied on the base of mathematical modeling. The regularities of localization geometric characteristics of the plate in the given physical situation were exposed. Shown that the keeping of this phenomenon can greatly simplify finding the proper solutions in the area of the heat, namely the determination of the maximum process temperature and temperature fluctuations in this zone. An analytical expression for finding the temperature changes over time in the area of the heat was received relation to the conditions when the temperature dependence of the specific heat of the plate material is linear.

Key words: computer modeling, multi-plate, localization phenomenon, substitution uniqueness conditions, heat conductivity processes.

УДК 536.531:006.354

Доц. В.О. Фединець, д-р техн. наук;
здобув. О.М. Кулик – НУ "Львівська політехніка"

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ТЕПЛООБМІНУ ПЕРВИННОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТЕМПЕРАТУРИ, СУМІЩЕНОГО З ТРУБКОЮ ПОВНОГО ТИСКУ В ТЕПЛОВОМУ ЛІЧИЛЬНИКУ

Досліджено умов теплообміну первинного перетворювача температури, суміщеного з трубою повного тиску в тепловому лічильнику. Запропоновано варіанти можливого конструктивного виконання вузла вимірювання температури. Наведено структуру пограничного шару і розподіл коефіцієнта теплопередачі при обтіканні перетворювача температури потоком теплоносія. Показано, що пограничний шар містить ламінарний пограничний підшар, перехідну зону і турбулентний пограничний підшар. Подано рекомендації з вибору місця встановлення вузла вимірювання температури на тілі трубки повного тиску для зменшення похибки вимірювання температури.

Ключові слова: первинний перетворювач температури, трубка повного тиску, коефіцієнт теплопередачі, ламінарний і перехідний підшар.

Вступ. Системи обліку тепла стають необхідними як споживачам тепла, так і його постачальникам. Важливим критерієм якості систем тепlopостачання є відсутність температурного дискомфорту в приміщенні та постійна наявність гарячої води з певною температурою в необхідному об'ємі. Визначення кількості тепла здійснюється лічильником, що включає в себе блок вимірювання витрати, блок вимірювання температури й обчислювач кількості тепла.

Аналіз публікацій. В останні роки виникла тенденція до створення комбінованих конструкцій для одночасного вимірювання декількох параметрів теплоносія. Так, у роботі [1] автори запропонували лічильник кількості тепла на базі гідродинамічного вимірювача витрати з використанням методу Піто. У такому витратомірі трубка статичного тиску виконана у вигляді кільцевої камери по внутрішній стінці трубопроводу подачі теплоносія, а трубка повного тиску суміщена із первинним перетворювачем температури теплоносія та розміщена в центрі трубопроводу і напрямлена назустріч потоку по його осі.

Дослідження функції перетворення лічильника тепла можна провести тільки після дослідження функції перетворення вимірювача витрати і первинного перетворювача температури. Дослідження функції перетворення витратоміра проведені в [2].

Мета роботи. Дослідити умови теплообміну первинного перетворювача температури (ППТ), суміщеного з трубою Піто, і на основі цих досліджень вибрати оптимальне місце його встановлення.

Виклад основного матеріалу. Суміщене виконання первинних перетворювачів швидкості потоку та його температури дає змогу забезпечити підвищення точності вимірювання температури теплоносія і цим самим – точність визначення кількості тепла, що передається споживачеві, та підвищити достовірність процесу вимірювання [3]. Варіанти можливого конструктивного виконання вузла вимірювання температури наведено на рис. 1.

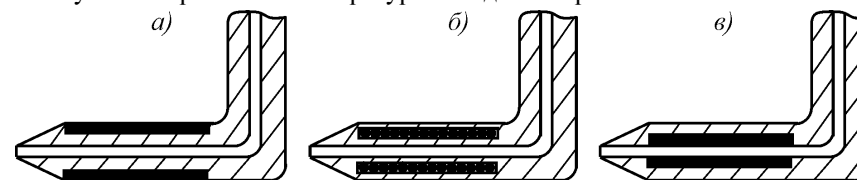


Рис. 1. Варіанти можливого конструктивного виконання вузла вимірювання температури: а) поверхневий ППТ, розташований на зовнішній поверхні трубки повного тиску; б) ППТ, виконаний у вигляді біфілярної обмотки та розташований в тілі трубки повного тиску; в) ППТ, розташований всередині каналу трубки повного тиску

Розглянуто умови теплообміну досліджуваного потоку теплоносія з ППТ. Пропонується схематичне зображення процесу теплопередачі від теплоносія до ППТ, яке зображено на рис. 2.

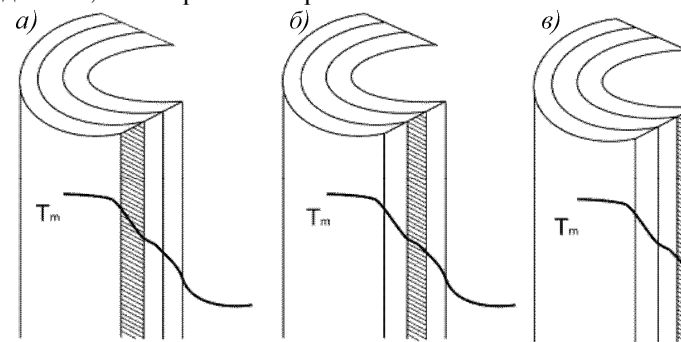


Рис. 2. Схематичне зображення процесу передачі тепла від теплоносія до чутливого елемента ППТ (T_m – температура теплоносія)

На рис. 2 а ППТ розміщений на зовнішній поверхні трубки повного тиску, на рис. 2 б – втоплений в тіло трубки повного тиску і на рис. 2 в – розташований на внутрішній поверхні трубки. У першому наближенні конструкцію ППТ пропонується замінити циліндричною багатошаровою стінкою (рис. 2).

Передача тепла від теплоносія до поверхні ППТ описується рівнянням, яке враховує теплопередачу за рахунок конвективного теплообміну та теплопе-

редачу шляхом теплопровідності. За законом Фур'є [4], тепловий потік для кожного шару можна записати у вигляді

$$Q = \frac{\lambda_i (T_{S_i} - T_{S_{i+1}})}{\int_{n_i}^{n_{i+1}} \frac{dn}{S(n)}}, i = 1, 2, \dots, m-1, \int_{n_1}^{n_{m+1}} \frac{dn}{S(n)} = N^{n_{m+1}} = F_i, \quad (1)$$

звідси
$$Q = (T_{c_1} - T_{c_2}) / \left(\frac{1}{\alpha_1 S_1} + \sum_{i=1}^m \frac{F_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2 S_{m+1}} \right), \quad (2)$$

де: $\left(\frac{1}{\alpha_1 S_1} + \sum_{i=1}^m \frac{F_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2 S_{m+1}} \right)^{-1}$ – повний коефіцієнт теплопередачі багат шарової стінки; S_n – площа поперечного перерізу n -го шару; F_i – тепловий потік i -го шару. Еквівалентна теплопровідність багат шарової стінки [5]:

$$\lambda_{екв} = \frac{\sum_{i=1}^m F_i}{\sum_{i=1}^m \frac{F_i}{\lambda_i}} = \frac{\int_{n_1}^{n_{m+1}} \frac{dn}{S(n)}}{\sum_{i=1}^m \frac{F_i}{\lambda_i}}. \quad (3)$$

Для циліндричної багат шарової стінки:

$$F_i = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}, S_i = 2\pi r_i l, \quad (4)$$

$$q_l = \frac{Q}{l} = \frac{\pi}{R_l} (T_{c_1} - T_{c_2}), \quad (5)$$

де
$$R_l = K_l^{-1} = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^m \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{m+1}}.$$

Температури на границях шарів:

$$T_{S_{i+1}} = T_{c_1} - \frac{q_l}{\pi} \left(\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{k=1}^i \frac{1}{2\lambda_k} \ln \frac{d_{k+1}}{d_k} \right) = T_{c_1} - \frac{q_l}{\pi} \left(\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_{екв}} \ln \frac{d_{m+1}}{d_1} \right), \quad (6)$$

де: $\lambda_{екв} = \ln \frac{d_{m+1}}{d_1} / \sum_{i=1}^m \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}$ – еквівалентна теплопровідність циліндричної стінки, q – густина потоку тепла; α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія до зовнішньої поверхні багат шарової стінки; α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої поверхні стінки до середовища; θ_m – температура теплоносія; θ_c – температура стінки; λ_i – коефіцієнт теплопровідності відповідного шару; d_i – товщина відповідного шару.

Аналіз конструктивного виконання ППТ, суміщеного із трубкою повного тиску, суто на емпіричному рівні показує, що із зазначених трьох варіантів виконання (рис. 1) один із них, а саме показаний на рис. 1 в уже варто відкинути, адже він розташований всередині каналу відбору повного тиску, є непроточним. Тобто похибка вимірювання температури цим ППТ буде більшою, порівняно з іншими варіантами виконання.

Із залишених двох варіантів перевагу потрібно надати варіанту із зовнішнім розташуванням ППТ, оскільки тільки в цьому випадку відбувається лише конвективний теплообмін між контрольованим середовищем та ППТ. В іншому варіанті відбувається як конвективний теплообмін, так і теплопередача за

рахунок теплопровідності матеріалу трубки повного тиску певної його товщини. Крім цього, у роботі [6] показано, що в разі виконання конструкції ППТ у вигляді багат шарової циліндричної стінки, температури в товщині стінки змінюються нелінійно і, внаслідок скінченного теплового опору при заданій температурі, наприклад, на зовнішній частині циліндра (ППТ) температура в його середині є іншою, тобто виникає статична похибка вимірювання температури.

Досліджено вплив зміни швидкості потоку теплоносія на значення коефіцієнта конвективної тепловіддачі. Трубка повного тиску суміщена із ППТ, яка розміщується в потоці контрольованого середовища, представляє собою стандартну ситуацію теплообміну при зовнішньому обтіканні тіл різноманітної форми, зокрема тіл циліндричної форми, зокрема трубок Піто-Прандтля.

Для цього випадку систему диференціальних рівнянь конвективного перенесення тепла в межовому (пограничному) шарі з точністю можна розв'язати аналітично. Для випадку тепловіддачі під час повздовжнього обтікання трубки повного тиску потоком теплоносія [4, 5] виникає залежність

$$Nu = f(Re, Pr, Gr, \bar{x}), \quad (7)$$

де: $Nu = \frac{q l_0}{\lambda(\theta_c - \theta_m)}$ – число Нуссельта, $Re = \frac{u D}{\nu}$ – число Рейнольдса, $Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda}$ –

число Прандтля, $Gr = \frac{g \beta (\theta_c - \theta_m) l_0^3}{\nu^2}$ – число Грасгофа; u – швидкість потоку; D –

діаметр трубки повного тиску; ν, λ – відповідно коефіцієнти кінематичної в'язкості й теплопровідності теплоносія; \bar{x} – безрозмірна координата локального простору пограничного шару в напрямку руху потоку $\bar{x} = x / L$ (де L – довжина трубки повного тиску в напрямку руху потоку).

З певним наближенням [4] рівняння подібності (7) для локального коефіцієнта тепловіддачі на відстані \bar{x} за ламінарної течії потоку рідинного або газового теплоносія в пограничному шарі і температури потоку, як визначальної, набуває вигляду

$$Nu = 0.33 Re^{0.5} Pr^{0.33} (\bar{x})^{-0.5} \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}. \quad (8)$$

Межі зміни критеріїв у формулі (8) становлять: $Re < Re_{кр}, Re_{кр} = 5 \cdot 10^5$;

$0.6 \leq Pr \leq 1.5$ [4]. Відносна величина $\left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}$ враховує напрямок теплового по-

току і є близькою до одиниці, коли температури рідини (газу) і стінки трубки відрізняються незначно. Під час обчислення критерію Pr_{cm} значення фізичних констант рідини (газу) необхідно брати за температурою стінки θ_{cm} (температурою поверхні ППТ, яка контактує з потоком).

Структура пограничного шару і розподіл коефіцієнта конвективної тепловіддачі під час обтікання ППТ потоком теплоносія зображено на рис. 3.

У перехідній зоні (рис. 3) інтенсивність тепловіддачі не стабільна, і точно визначити коефіцієнт α практично неможливо, тому умовно можна вважати,

що перехід від ламінарної течії в межовому (пограничному шарі) до турбулентної відбувається відразу при $Re_{кр} = 5 \cdot 10^5$.

Якщо $Re > Re_{кр}$, то формула (8) характеризує тепловіддачу тільки на ділянці ламінарного підшару потоку довжиною $x_{лам} = \frac{Re_{кр}}{Re}$. За межами $x_{лам}$ тепловіддача характеризується критеріальною залежністю

$$Nu = 0,03 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot (\bar{x})^{-0,2} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}}\right)^{0,25}, \quad (9)$$

яка справедлива за умов $Re_{кр} < Re < 1 \cdot 10^7$ і $0,7 \leq Pr \leq 200$.

Від'ємні степені при \bar{x} вказують на зменшення коефіцієнта тепловіддачі по довжині трубки повного тиску. Формули для розрахунку середніх по поверхні трубки повного тиску чисел $Nu_{сер}$ можна отримати інтегруванням по \bar{x} рівнянь (8) і (9). Наприклад, якщо по всій довжині трубки режим течії в пограничному шарі ламінарний ($Re < 5 \cdot 10^5$), то

$$Nu_{сер} = 0,66 Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}}\right)^{0,25}. \quad (10)$$

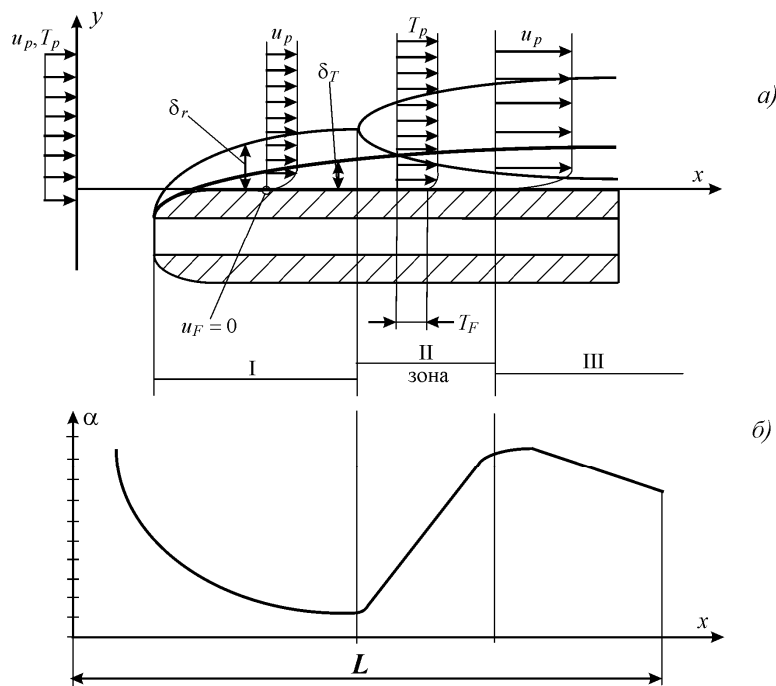


Рис. 3. Структура пограничного шару (а) і розподіл коефіцієнта теплопередачі (б) під час обтікання рідинним чи газовим потоком трубки повного тиску з вбудованим ППТ: I – ламінарний пограничний підшар; II – перехідна зона; III – турбулентний пограничний підшар

Якщо ж $Re > 5 \cdot 10^5$, тобто по всій довжині трубки режим течії рідини в пограничному шарі турбулентний, то

$$Nu_{сер} = 0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}}\right)^{0,25}. \quad (11)$$

Визначальні параметри в наведених вище формулах: середня температура рідини (газу) в межовому пограничному шарі $\theta_{сер} = 0,5 \cdot (\theta_p + \theta_{нов})$; визначальний розмір – довжина трубки в напрямку її обтікання. Отож, у роботі розподіл коефіцієнта α наведено тільки в якісному вигляді. Конкретні числові значення будуть встановлені за результатами подальших експериментальних досліджень.

Важливим моментом у плані зменшення похибок за температурних вимірювань є місце розташування ППТ на тілі трубки повного тиску, оскільки зустріч потоку контрольованого середовища із торчком трубки призводить до відповідного збурення та порушує стаціонарність процесу теплопередачі від вимірювального середовища до ППТ.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили, що довжина ламінарного і перехідного підшарів лежить в межах $5d$. У межах турбулентного підшару потоку масо- і теплообмінні процеси з ядром рідинного потоку стабілізовані, а тому ППТ повинен розміщуватись на поверхні трубки повного тиску в цій зоні. Оскільки коефіцієнт локальної тепловіддачі залежить від температури ППТ, бажано, щоб його теплотехнічні та фізичні характеристики незначно відрізнялись від аналогічних характеристик матеріалу трубки повного тиску, або, в кращому випадку, збігалися.

Бажано також, щоб поверхня ППТ (його верхній край) ідеально збігалася з поверхнею трубки повного тиску, аби не збурювати пограничний шар потоку в цьому (локальному) місці.

Висновки. Отже, завдяки розташуванню ППТ на зовнішній поверхні трубки повного тиску найбільш точно вимірюється температура теплоносія, оскільки він омивається тим потоком теплоносія, швидкість якого вимірюється. Крім цього, в цьому випадку на ППТ не осідають тверді включення, а ті включення, які спочатку налипають на поверхні, омиваються і змиваються потоком теплоносія. Оскільки такі дослідження тільки починають проводитися, то кількісні оцінки підвищення точності вимірювання температури і відповідно кількості тепла можливі після подальших експериментальних досліджень.

Література

1. Жуковський С.С. Пристрій для вимірювання кількості тепла / С.С. Жуковський, О.М. Кулик, М.П. Кулик // Патент України № 71051. – Бюл. № 11. – 2004.
2. Кулик О.М. Експериментальна перевірка перетворювачів витрати гідродинамічного типу для лічильника кількості тепла на повітряному теплоносії / О.М. Кулик // Методи та прилади контролю якості : сб. науч. тр. – 2006. – № 16. – С. 55-57.
3. Декуша Л.В. Теоретические основы метрологии теплоточных измерений / Л.В. Декуша, Т.Г. Грищенко, Т.В. Менделеева // Промышленная теплотехника : сб. науч. тр. – 2001. – № 4. – С. 120-127.
4. Исаченко В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М. : Изд-во "Энергоиздат", 1981. – 416 с.

5. Лыков А.В. Теория теплопроводности / Алексей Васильевич Лыков. – М. : Изд-во "Высш. шк.", 1967. – 600 с.

6. Ярышев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарных температур / Николай Алексеевич Ярышев. – Л. : Изд-во "Энергоатомиздат", 1990. – 254 с.

Фединец В.А., Кулик Е.М. Исследование условий теплообмена первичного преобразователя температуры, совмещенного с трубкой полного давления в тепловом счетчике

Исследованы условия теплообмена первичного преобразователя температуры, совмещенного с трубкой полного давления в тепловом счетчике. Предложены варианты возможного конструктивного исполнения узла измерения температуры. Приведена структура пограничного слоя и распределение коэффициента теплопередачи при обтекании преобразователя температуры потоком теплоносителя. Показано, что пограничный слой содержит ламинарный пограничный подслой, переходную зону и турбулентный пограничный подслой. Даны рекомендации по выбору места установки узла измерения температуры на теле трубки полного давления для уменьшения погрешности измерения температуры.

Ключевые слова: первичный преобразователь температуры, трубка полного давления, коэффициент теплопередачи, ламинарный и переходный подслой.

Fedynets V.O., Kulyk E.M. Studies of Heat Transfer Primary Transformer Temperature, Combined with a Tube Full of Pressure in the Heat Meter

The conditions of heat exchange initial transformer temperature, combined with a tube full pressure in the heat meter. The variants of a possible embodiment of the measuring junction temperature. The structure of the boundary layer and the distribution coefficient of heat flow around the transducer with temperature of the coolant flow. It is shown that the boundary layer laminar boundary sublayer includes, transition zone and turbulent boundary sublayer. Recommendations for choosing the place of installation site temperature measurement on the body tube full pressure to reduce the error of measuring temperature.

Key words: primary transducer temperature, total pressure tube, the heat transfer coefficient, laminar and transitional sublayer.

УДК 666.942 **Аспір. Т.А. Мазурак¹; доц. У.Д. Марущак¹, канд. техн. наук; ст. наук. співроб. І.С. Івасів², канд. техн. наук, директор**

ШВИДКОТВЕРДНУЧІ БЕТОНІ НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНИХ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТІВ

Проаналізовано методи одержання швидкотверднучих бетонів. Показано, що завдяки модифікуванню портландцементних композицій органо-мінеральною добавкою забезпечується одержання бетонів з швидким наростанням міцності, які характеризуються високою питомою ($R_{cm}^2/R_{cm}^{28}=0,63$) і нормативною ($R_{cm}^{28}=68,1$ МПа) міцністю, дрібнопористою структурою, підвищеною корозійною стійкістю ($K_{zr}=1,21$ та $K_{cm}=1,19$), що визначає їх довговічність та широкі області застосування як в монолітному будівництві, так і технологіях збірного залізобетону.

Ключові слова: швидкотверднучий бетон, модифікований портландцемент, рання міцність, комплексний модифікатор, порова структура.

¹ НУ "Львівська політехніка";

² Львівський державний НП "ЛьвівбудНДПроект" Державної корпорації "Укрбудматеріали"

Постановка проблеми. Розвиток будівельної галузі спрямований на застосування сучасних технологій виготовлення якісних конкурентоспроможних бетонів, які забезпечують швидкі темпи будівництва, зменшення споживання енергії та сировинних ресурсів, високу продуктивність виконання будівельних робіт і тривалий термін служби будівель і споруд. При цьому актуальним з теоретичної і практичної точки зору є одержання швидкотверднучих бетонів, що забезпечують можливість раннього навантаження конструкцій, скорочення виробничого циклу, перехід до мало- та безпрогрівних технологій збірного залізобетону, збільшення оборотності опалубки та прискорення зведення будівель і споруд при монолітному бетонуванні, а також дають змогу підвищити ефективність будівництва в різних температурних умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно з ДСТУ Б В.2.7-176:2008 бетони зі швидким наростанням міцності характеризуються значенням питомої міцності $R_{cm}^2/R_{cm}^{28}>0,50$. Прискорення набору міцності бетону зазвичай базується на традиційних методах, зокрема теплової обробки (ТВО), використанні жорстких бетонних сумішей з низьким водоцементним відношенням, застосуванні добавок-прискорювачів тверднення, комплексних хімічних добавок, глиноземного цементу, механоактивації цементу [1-3].

Недоліком ТВО є її висока енергоємність, що істотно впливає на собівартість виробів. Нерівномірності розподілу температури за об'ємом виробу у процесі нагрівання можуть спричинити температурні напруження і деформації, що призводить до погіршення його основних фізико-механічних властивостей (міцності, довговічності, морозостійкості) [1].

Традиційні добавки-прискорювачі можуть негативно впливати як на бетони, так і на арматуру, що знижує їх експлуатаційні та будівельно-технічні властивості [2, 3]. Тому з метою економії часу та ефективнішого використання енергії прискорення тверднення бетону вимагає нового підходу до створення цементної матриці, основою якого є регулювання процесу структуроутворення, а також якнайповніше використання властивостей в'язучих [4]. Перспективним для забезпечення високої ранньої міцності бетонів є розроблення портландцементних композицій, до складу яких входять ультрадисперсні добавки, які були б центрами кристалізації новоутворень, та суперпластифікатори, що дасть змогу направлено керувати технологічними властивостями і кінетикою структуроутворення, інтенсифікувати початкові стадії тверднення та створити особливо щільну структуру бетону [4, 5].

Інноваційним підходом на шляху створення сучасних бетонів є нанотехнології, які створюють можливість регулювання структури гідратних фаз і процесів гідратації для формування цементуючої матриці з покращеними властивостями в контексті стратегії сталого розвитку. Введення рідкої добавки X-SE-ED 100 (BASF), що містить синтетичні кристалогідрати силікату кальцію як затравочних нанокристалів (Crystal Speed Hardening), які ініціюють ріст кристалів не тільки на поверхні цементних зерен, але й між ними (в перенасиченому розчині) [5]. Добавка може компенсувати початкову міцність бетонів на основі цементу з низьким клінкерним фондом або підвищувати клас бетонів на основі бездобавочних портландцементів.