

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ТЕПЛОВИДІЛЕННЯ ЦЕМЕНТУ ПРИ ЙОГО ГІДРАТАЦІЇ В ПОВІТРЯНИХ УМОВАХ ТА В ТЕПЛОІЗОЛЬОВАНИХ ЗРАЗКАХ

Наведено методи визначення кінетики тепловиділення цементу при його гідратації в повітряних умовах та в теплоізольованих зразках.

Ключові слова: екзотермія цементу, метод.

Постановка проблеми. Теплота, яка виділяється під час гідратації цементу, може бути єдиним джерелом теплової обробки бетонних та залізобетонних виробів. Для дослідження умов, за яких використання зазначеного способу теплової обробки цих виробів є ефективним, необхідно розвивати методологію експериментальних досліджень інтенсивності тепловиділення різних видів цементу при їх взаємодії з водою.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У стандарті [1] наведено «метод визначення питомого тепловиділення цементу в бетоні, що твердне в адіабатичних умовах... Метод слід застосовувати при зведенні масивних споруд, які вимагають вживання в конкретних умовах спеціальних заходів щодо регулювання температурних напружень, що виникають внаслідок тепловиділення бетону при твердненні». У статті [3] «обговорюються проблеми, пов'язані з багатокомпонентністю бетонів. Показані основні можливості напівадіабатичної калориметрії для вирішення даних проблем». У статті [4] викладено експериментальні дані стосовно кінетики тепловиділення системи «цемент-вода», отримані за допомогою диференціального мікрокалориметра («маса навески цементу 1 г, маса води 0,3 г»). У джерелі [5] наведена методика «количественной оценки продолжительности предварительной выдержки бетона, основанная на оценке кинетики тепловыделения цемента». У статті [6] «обоснована термокинетическая оценка эффективности цементов и добавок». У джерелі [2] підкреслюється, що «для разработки неизотермических экспериментальных методов с адекватными аппаратами анализа результатов нами привлекается физико-химический аппарат решения обратных кинетических задач и восстановления математическими методами неизотермических зависимостей по экспериментальным данным изотермической калориметрии».

Отже, дослідження кінетики тепловиділення при гідратації цементу широко використовуються для розв'язання задач, пов'язаних з виробництвом бетонних та залізобетонних виробів.

Виділення не розв'язаних раніше частин проблеми. Методи для визначення інтенсивності тепловиділення цементу при його гідратації в повітряних умовах та в теплоізольованих зразках спрямовані на аналіз особливостей процесів твердіння бетону (цементно-піщаного розчину, цементу) при нестационарному тепловому режимі.

Формулювання цілей статті. Метою статті є викладення основних положень запропонованих методів, призначених для визначення кінетики тепловиділення при гідратації цементу в повітряних умовах та в теплоізольованих зразках.

Виклад основного матеріалу. Розробляються кілька методів для визначення інтенсивності виділення теплоти при гідратації цементу.

Спільними для всіх методів є такі положення:

– зразки виготовляються або з бетонної суміші, або із цементно-піщаного розчину, або з цементного тіста;

- початкова температура матеріалів, форм та обладнання, які використовуються при дослідженнях, повинна бути однаковою;
- процес твердіння бетону (чи цементно-піщаного розчину, чи цементного тіста) ділиться на певні проміжки часу; для цих проміжків часу складаються теплові баланси систем (кожна система включає зразок, форму, теплоізоляційний матеріал, гідроізоляційний матеріал (якщо останній використовується) та засоби контролю температури); за допомогою теплових балансів визначається тепловиділення цементу, Дж, і питомі тепловиділення цементу, Дж/кг, при його гідратації за вибрані проміжки часу;
- наприкінці досліду визначається міцність зразків.

Визначення інтенсивності виділення теплоти цементом при його гідратації в теплоізолюваних зразках

Особливості цього методу:

- зразки після їх виготовлення теплоізолюються; за необхідності біля «відкритої» поверхні зразка розташовується спочатку шар гідроізоляції, а потім – шар теплоізоляції;
- якщо температура зовнішньої поверхні шару теплоізоляції більша, ніж температура повітря приміщення, то впродовж досліду визначаються такі температури:
 - а) температура в середині кожного зразка; для цього в центрі зразка розташовується металева капсула, заповнена технічним маслом, в якій розміщується термопара;
 - б) температура зовнішньої поверхні шару теплоізоляції кожного зразка та температура поверхні форм;
- якщо температура зовнішньої поверхні шару теплоізоляції дорівнює температурі повітря приміщення, то *додатково* визначається ступінь прогрівання шару теплоізоляції.

Якщо температура зовнішньої поверхні шару теплоізоляції більша, ніж температура повітря приміщення, то кількість теплоти $Q_{ЕК}$, Дж, що виділяється при взаємодії цементу з водою за вибраний проміжок часу, дорівнює

$$Q_{ЕК} = Q_{ЗР} + Q_{Ф} + Q_{Т} + Q_{К} + Q_{М} + Q_{ТП} + Q_{НС}, \quad (1)$$

де $Q_{ЗР}$ – кількість теплоти, яка витрачається на нагрівання зразка за вибраний інтервал часу, Дж; $Q_{Ф}$ – кількість теплоти, яка витрачається на нагрівання форми за вибраний інтервал часу, Дж; $Q_{Т}$ – кількість теплоти, котра витрачається на нагрівання теплоізоляційного матеріалу за вибраний інтервал часу, Дж; $Q_{К}$ – кількість теплоти, яка витрачається на нагрівання металевієї капсули за вибраний інтервал часу, Дж; $Q_{М}$ – кількість теплоти, що витрачається на нагрівання технічного масла за вибраний інтервал часу, Дж; $Q_{ТП}$ – кількість теплоти, яка витрачається за вибраний інтервал часу на нагрівання частини термопари, яка розміщується в капсулі з маслом, Дж (цією величиною в розрахунках нехтуємо); $Q_{НС}$ – втрати теплоти зразком у навколишнє середовище за вибраний інтервал часу, Дж; величина $Q_{НС}$ розраховуються за допомогою формул, наведених, зокрема, в довіднику [8].

Над «відкритою» поверхнею зразка може розташовуватися спочатку шар гідроізоляційного матеріалу, потім – шар теплоізоляційного матеріалу, а ззовні шару теплоізоляції може розташовуватися захисний шар. Наявність цих шарів необхідно враховувати при складанні теплових балансів.

Якщо температура зовнішньої поверхні шару теплоізоляції дорівнює температурі повітря приміщення, то кількість теплоти $Q_{ЕК}$, Дж, яка виділяється при взаємодії цементу з водою за вибраний проміжок часу, обчислюється за залежністю

$$Q_{ЕК} = Q_{ЗР} + Q_{Ф} + Q_{ЧТ} + Q_{К} + Q_{М}, \quad (2)$$

де $Q_{ЧТ}$ – кількість теплоти, що витрачається на нагрівання частини теплоізоляційного матеріалу за вибраний інтервал часу, Дж; пояснення до інших складових цієї залежності наведено вище.

Кількість теплоти, Дж, що витрачається за певний проміжок часу на нагрівання кожного компонента досліджуваної системи, обчислюється за загальною формулою

$$Q_i = c_i \cdot m_i \cdot (t_{Ki} - t_{Pi}), \quad (3)$$

де c_i – питома масова теплоємність матеріалу i -го компонента досліджуваної системи, Дж/(кг·°C); m_i – маса i -го компонента досліджуваної системи, кг; t_{Pi} , t_{Ki} – відповідно початкова та кінцева для вибраного проміжку часу температура i -го компонента системи, °C.

Визначення інтенсивності виділення теплоти цементом при його гідратації в зразках, які не теплоізолюються

Особливості цього методу:

- над «відкритою» поверхнею зразка розташовується шар гідроізоляційного матеріалу; товщина цього шару та відстань між «відкритою» поверхнею зразка й гідроізоляційним шаром повинна бути мінімально можливою;
- впродовж досліду визначаються такі температури:
 - а) температура всередині кожного зразка;
 - б) температура поверхонь форм та гідроізоляції.

Кількість теплоти $Q_{ЕК}$, Дж, що виділяється при взаємодії цементу з водою за вибраний проміжок часу (для випадку, який розглядається) дорівнює

$$Q_{ЕК} = Q_{ЗР} + Q_{Ф} + Q_{Г} + Q_{К} + Q_{М} + Q_{ТП} + Q_{НС}, \quad (4)$$

де $Q_{Г}$ – кількість теплоти, що витрачається на нагрівання шару гідроізоляції за вибраний інтервал часу, Дж; пояснення до інших складових цієї залежності наведено вище.

Кількість теплоти, що витрачається за певний проміжок часу на нагрівання кожного компонента досліджуваної системи, обчислюється за формулою (3).

«Метод пластини» для орієнтовного визначення інтенсивності виділення теплоти цементом при його гідратації в повітряних умовах

Особливості методу:

- зразок має форму пластини;
- для створення одновимірного температурного поля теплоізолюються грані зразка (крім двох його бокових граней, які мають більшу площу поверхні); температура на зовнішній поверхні теплоізоляції повинна дорівнювати температурі навколишнього середовища;
- «відкрита» поверхня зразка (яка не стикається зі стінкою форми) може бути попередньо гідроізолюваною;
- впродовж досліду визначаються температури поверхонь кожного зразка та ступінь прогрівання шару теплоізоляції.

Диференціальне рівняння теплопровідності для цього випадку має вигляд

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{q_v}{c\rho}, \quad (5)$$

де q_v – об'ємна густина теплового потоку, обумовлена наявністю внутрішнього джерела теплоти (екзотермії цементу), Вт/м³; a – коефіцієнт температуропровідності матеріалу зразка, м²/с, який дорівнює

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}, \quad (6)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу зразка, Вт/(м·°C); c – питома масова теплоємність матеріалу зразка, Дж/(кг·°C); ρ – густина матеріалу зразка, кг/м³.

Згідно з положеннями теорії теплопровідності (представленими, зокрема, в джерелі [9]), температура поверхні пластини незначно відрізняється від температури в її центрі, якщо критерій $Bi \rightarrow 0$ (практично критерій $Bi < 0,1$) (рисунок 1).

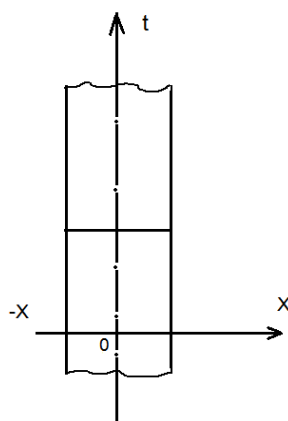


Рисунок 1 – Розподіл температури в зразку-пластині в i -й момент часу

Критерій Біо обчислюється за співвідношенням

$$Bi = \frac{\alpha \delta}{\lambda}, \quad (7)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні теплообміну до навколишнього середовища, Вт/(м²·°C); δ – напівтовщина зразка-пластини, м; λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу зразка, Вт/(м·°C).

Використовуються такі спрощуючі передумови:

- впродовж кожного проміжку часу величини λ та α не змінюються;
- у вибрані інтервали часу коефіцієнт α є незмінним та однаковим для всіх точок нетеплоізолюваних поверхонь зразка-пластини;
- оскільки коефіцієнт теплопровідності металу має порівняно велике значення, то приймаємо, що температура нетеплоізолюваних поверхонь зразка дорівнює температурі відповідних металевих стінок форми.

Тепловий баланс системи, яка досліджується, для певного проміжку часу має вигляд

$$Q_{ЕК} = Q_{ЗР} + Q_{Ф} + Q_{ЧТ} + Q_{НС}, \quad (8)$$

де $Q_{ЕК}$ – виділення теплоти внаслідок гідратації цементу, Дж; $Q_{ЗР}$, $Q_{Ф}$, $Q_{ЧТ}$ – витрати теплоти на нагрівання відповідно зразка, форми та на часткове нагрівання теплоізоляційного матеріалу за вибраний проміжок часу, Дж; $Q_{НС}$ – втрати теплоти в навколишнє середовище через дві нетеплоізолювані грані зразка за вибраний проміжок часу, Дж.

Якщо над поверхнею зразка, яка не стикається зі стінкою форми, прокладається спочатку шар гідроізоляційного матеріалу, а потім – шар теплоізоляційного матеріалу, то це необхідно враховувати при складанні теплових балансів. Витрати теплоти для нагрівання кожного компонента системи, що досліджується, за певний проміжок часу обчислюються за формулою (3).

Висновки. Запропоновані методи, які призначені для визначення інтенсивності виділення теплоти цементом при його гідратації в повітряних умовах та в теплоізолюваних зразках. Ці методи є складовими розрахунково-експериментальних досліджень.

Загальна мета розрахунково-експериментальних досліджень:

- аналіз умов, за яких є доцільним упровадження у виробництво теплової обробки бетонних й залізобетонних виробів без використання зовнішніх джерел теплоти (за рахунок виділення теплоти під час взаємодії цементу з водою);
- економія енергоресурсів та зниження собівартості продукції при зазначеному виробництві.

Література

1. ДСТУ Б В. 2.7-225:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Метод визначення тепловиділення при твердненні. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 12 с.
2. Тепловыделение при твердении цементов в программируемых неизотермических условиях // Калориметрия цемента и бетона: избранные труды / А.В. Ушеров-Маршак. – Х.: Факт, 2002. – С. 24 – 26.
3. Температурный мониторинг твердения цементных систем / А.В. Кабусь, Н.Н. Исаенко, Е.А. Мороз, Е.В. Иващенко, Е.Б. Воропаева // Науковий вісник будівництва. – № 65. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2011. – С. 256 – 265.
4. Лотов, В.А. Тепловыделение в системе цемент-вода при гидратации и твердении / В.А. Лотов, Е.А. Сударев, Ю.А. Иванов // Строительные материалы. – 2011. – № 11. – С. 35 – 37.
5. Бабицкий, В. Длительность предварительной выдержки бетона с химическими добавками [Электронный ресурс] / В. Бабицкий, М. Голиани, М. Бирик // Наука, техника и технологии. – 2011. – № 4 (37). – Режим доступа: <http://www.bsc.by/story/dlitelnost-predvaritelnoy-vyderzhki-betona-s-himicheskimi-dobavkami>.
6. Циак, М. Термокинетический подход к прогнозированию эффективности модификаторов бетона [Электронный ресурс] / М. Циак. – Режим доступа: http://www.nbuv.gov.ua/portal/Natural/vodaba/2009_35/index.files/St56_35.htm.
7. Бойко, В.В. Тепловая обработка в производстве сборного железобетона / В.В. Бойко, Е.В. Тихомиров. – К.: Будівельник, 1987. – 144 с.
8. Аметистов, Е.В. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справочник / Е.В. Аметистов [и др]: под общ. ред. В.А. Григорьева и Б.М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.
9. Исаченко, В.П. Теплопередача: учебник для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
10. Марьямов, Н.Б. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона / Н.Б. Марьямов. – М.: Стройиздат, 1970. – 272 с.

Надійшла до редакції 23.10.12

© Т.С. Кугаєвська, В.В. Шульгін

Т.С. Кугаевская, к.т.н., доцент, В.В. Шульгин, к.т.н., доцент

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ ЦЕМЕНТА ПРИ ЕГО ГИДРАТАЦИИ В ВОЗДУШНЫХ УСЛОВИЯХ И В ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННЫХ ОБРАЗЦАХ

Представлены методы определения кинетики тепловыделения цемента при его гидратации в воздушных условиях и в теплоизолированных образцах.

Ключевые слова: экзотермия цемента, метод.

T.S. Kugaevskaya, Ph.D., associate professor, V.V. Shulgin, Ph.D., associate professor

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

DEVELOPMENT OF DETERMINATION METHODS OF CEMENT HEAT EVOLUTION UNDER ITS HYDRATION IN AIR CONDITIONS AND HEAT-INSULATED SAMPLES

This paper presents methods of determination of kinetics of cement heat evolution in air conditions and in heat-insulated samples.

Keywords: cement heat generation, method.