Алиназаров Алишер Хайдаралиевич
кандидат технических наук, профессор кафедры
«Строительство и монтаж инженерных коммуникаций»
Хайдаров Шерзод Эргашалиевич
доцент кафедры «Строительство и монтаж инженерных коммуникаций»
Наманганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Наманган

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ ВНУТРЕННЕГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА С УЧЁТОМ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ В КОМПОЗИЦИОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Аннотация: В статье представлена аналитическая методика решения, позволяющая качественно оценить вклад внутреннего источника тепла в формирование температурного поля изделия с учётом тепловыделения при протекании экзотермической реакции гидратации, а также влияния солнечной радиации в процессе структурообразования многокомпонентных цементных материалов.

Ключевые слова: источник тепла, гидратация, излучение, солнечная радиация, многокомпонентные цементные материалы, теплоперенос, лучепоглощение, тепловыделение, термообработка

Alinazarov Alisher Khaidaralievich
Candidate of Technical Sciences (PhD),
Professor, Department of Construction and Installation of Engineering Communications
Khaydarov Sherzod Ergashalievich
Associate Professor,
Department of Construction and Installation of Engineering Communications

Namangan State Technical University
Namangan, Republic of Uzbekistan

AN ANALYTICAL METHOD FOR SOLVING THE PROBLEM OF DETERMINING THE POWER OF AN INTERNAL HEAT SOURCE TAKING INTO ACCOUNT SOLAR RADIATION IN COMPOSITE BUILDING MATERIALS

Abstract: An analytical solution method is presented that makes it possible to qualitatively assess the contribution to the formation of the temperature field in a product with heat release during an exothermic reaction, taking into account solar radiation during the structure formation of multicomponent cement-based materials.

Keywords: heat source, hydration, radiation, solar radiation, multicomponent cement materials, heat transfer, radiation absorption, heat release, heat treatment

Введение

Мощность объёмного внутреннего источника тепла (q_v), обусловленного выделением теплоты гидратации, изменяется во времени в зависимости от температурного режима и коэффициента лучепоглощения золоцементного изделия полиструктурного строения [1, с. 106].

Изменение величины (q_v) во времени при фиксированной средней температуре можно приближённо представить в виде кусочно-непрерывной функции (r) (рис. 1а)

$$q \approx \sum_{0}^{m} \sigma_0(\tau - \tau_0) \quad (1)$$

или в виде ломаной функции

$$q \approx \sum_{0}^{m} (V_m - Vm\text{-}1)(\tau - \tau_m)\sigma_0(\tau - \tau_m), \qquad (2)$$

где $\sigma_0(\tau-\tau_m)$ - единичная функция Хевисайда, при

$$\tau > \tau_i \quad \sigma_0(\tau-\tau_i) = 1, \text{ при } \tau < \tau_i \quad \sigma_0(\tau-\tau_i) = 0; \qquad (3)$$

V_m - скорость равномерного изменения мощности источника q при $r\text{-}r_m$, Вт/м^3·с;

τ_m - время m-ого изменения мощности источника и скоростей равномерного подъема или спада мощности q (рис. 1 б).

(V_m) — скорость равномерного изменения мощности источника тепла (q) на интервале (t_{m-1} < t < t_m), Вт/м³·с; (t_m) — момент изменения мощности источника тепла и скорости её линейного возрастания или убывания (рис. 1б).

С учётом того, что

$$F(r) = \sum_{0}^{m} q_m \sigma_0(\tau-\tau_m), \quad \sigma_0(x) = \begin{cases} 1, & \tau > \tau_m \\ 0, & \tau < \tau_m \end{cases} \qquad (4)$$

получаем изображение функции по Лапласу:

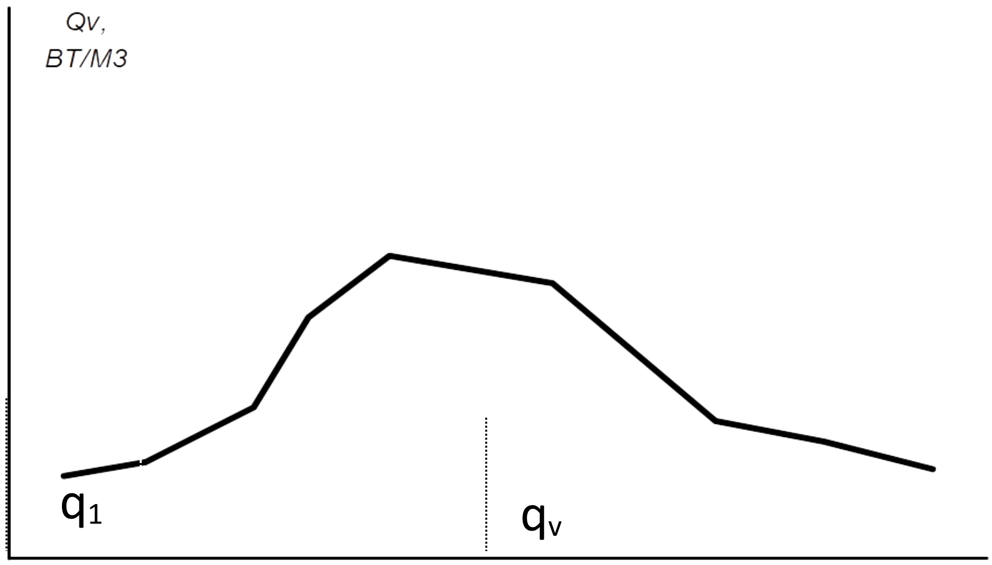
$$F(S) = \sum_{0}^{m} q_m \cdot EXP(-s\tau m)/S + \sum_{0}^{K} q_l \cdot K_n \qquad (5)$$

$$F(r) = \sum_{0}^{m} (V_m - V_m - 1)(\tau-\tau_m) \cdot \sigma_0(\tau-\tau_m);$$

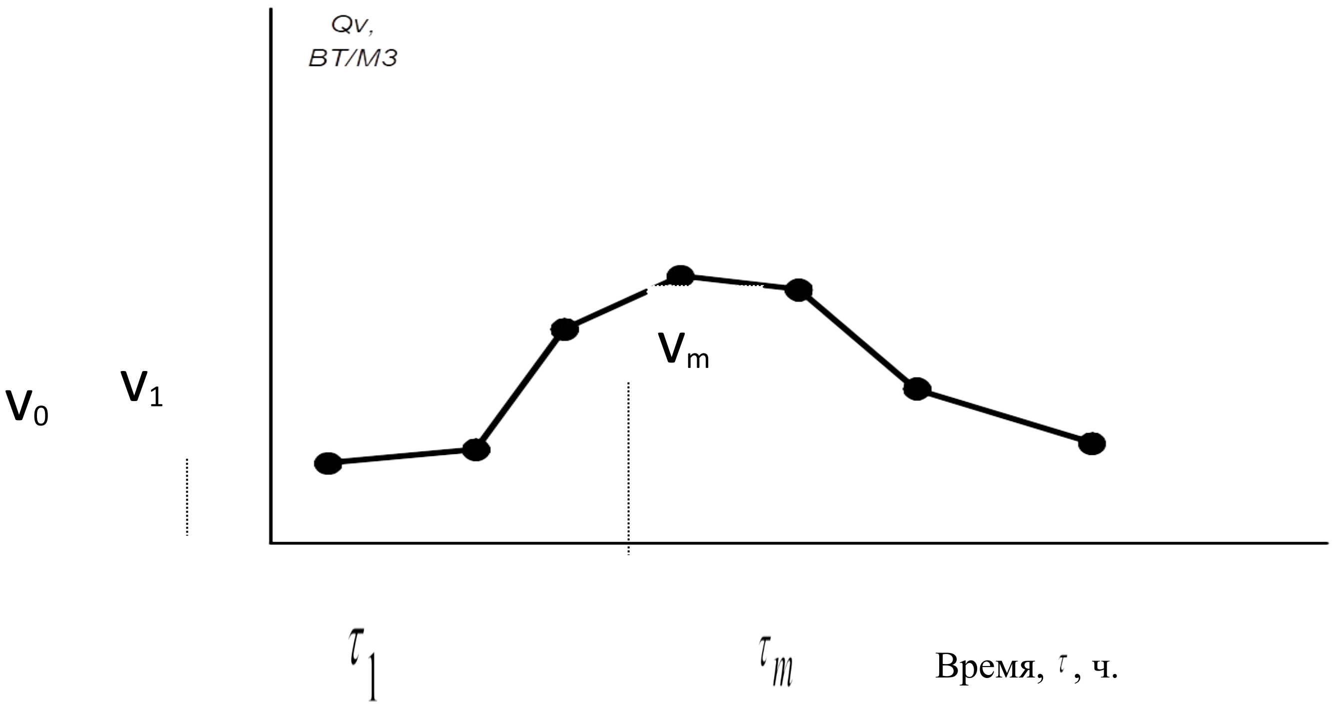
$$F_S = \sum_{0}^{m} (V_m - V_{m-1}) \cdot EXP(-s\tau m)/S + \sum_{0}^{K} q_l \cdot K.$$

(6)

а)



б)



Аппроксимация реальной кривой изменения мощности внутреннего источника тепла (q): а — кусочно-непрерывной функцией; б — ломаной функцией.

Начальное распределение температуры по толщине структурообразующего золоцементного изделия считается равномерным и равным (t_0). В начальный момент времени образец помещается в среду с температурой ($t_c > t_0$), которая поддерживается постоянной в течение всего процесса нагревания [2–4].

Требуется определить распределение температуры по толщине образца и тепловой поток в любой момент времени при условии, что теплообмен с окружающей средой происходит по закону Ньютона.

Начало координат помещается в середину толщины пластины, при этом её общая толщина равна *2l*. Внутри образца действует внутренний источник тепла удельной мощности q_v, являющийся функцией времени [5, 6].

Математическая постановка задачи

Дифференциальное уравнение теплопроводности имеет вид:

$$dt(x,r)/d = a \quad drt(x,r)/dx^2 + q_v(r)/c\rho;$$

$$(\, r > 0,\ -\ 1 < x > 1) \qquad (7)$$

при начальном условии

$$t(x,0\,) = t; \qquad (8)$$

$$dt(0,\ \tau) = 0 \qquad (10)$$

$$dx - dt(l,\ \tau)/dx + [\alpha/\lambda\ t_c - f(l,\tau)] = 0. \qquad (9)$$

и граничных условиях

В уравнении (7) удельная мощность источника тепла определяется зависимостями (1) или (2).

Решение задачи

К уравнению (7) применяется интегральное преобразование Лапласа. В результате получаем выражение для изображения температуры:

$$T_l''(x,s) - \frac{1}{a}\left[T_l(x,s) - \frac{t_0}{s} + \ldots\right.$$

. (10)

Решение уравнения с учётом начального условия (8) имеет вид:

$$T_l''(x,s) - \frac{t_0}{s} = \frac{1}{c\rho}\sum_0^m q_m \ldots$$

. (11)

Постоянная интегрирования (A) определяется из граничного условия (10), которое в образах Лапласа принимает форму:

$$-T_l^{'}(l,s) + \frac{\alpha}{\lambda}\left[\frac{t_c}{s} - T_l^{'}(l,s)\right] = 0 . \qquad (12)$$

После подстановки и преобразований получаем:

$$T_l^{'}(x,s) = A\,ch\sqrt{\frac{s}{a}}sh\sqrt{\frac{1}{a}}x \ , \qquad (13)$$

а при $x = l$

$$T_l^{'}(l,s) = A\,ch\sqrt{\frac{s}{a}}sh\sqrt{\frac{1}{a}}l \ . \qquad (14)$$

В результате окончательное выражение для изображения температуры принимает вид:

$$A\sqrt{\frac{s}{a}}\left(sh\sqrt{\frac{s}{a}}l - \frac{\alpha}{\lambda}ch\sqrt{\frac{s}{a}}l\right) = \frac{\lambda}{\alpha}\left(\frac{t_c - t_0}{s} - \frac{1}{c\rho}\sum_0^m q_n\frac{\exp(-s\tau_m)}{s^2}\right) \ ; \ (15)$$

Переходя к оригиналу функции, получаем распределение температуры в виде:

$$A = \frac{t_c - t_0}{s\left[ch\sqrt{\frac{s}{a}}l + \frac{\alpha}{\lambda}\sqrt{\frac{s}{a}}sh\sqrt{\frac{s}{a}}l\right]} - \frac{\frac{1}{c\rho}\sum_0^m q_n\frac{\exp(-s\tau_m)}{s^2}}{s^2\left[ch\sqrt{\frac{s}{a}}l + \frac{\alpha}{\lambda}\sqrt{\frac{s}{a}}sh\sqrt{\frac{s}{a}}l\right]}; \qquad (16)$$

Частные режимы тепловой обработки

В случае не мгновенного, а плавного подъёма температуры окружающей среды в первом периоде со скоростью

$$T_l(x,s)-\frac{t_0}{s}=\frac{1}{c\rho}\sum_0^m q_n\frac{\exp(-s\tau_m)}{s^2}+\frac{(t_c-t_0)ch\sqrt{\frac{s}{a}}x}{s\left[ch\sqrt{\frac{s}{a}}l+\frac{\alpha}{\lambda}\sqrt{\frac{s}{a}}sh\sqrt{\frac{s}{a}}l\right]}$$

$$-\frac{\frac{1}{c\rho}\sum_0^m q_n\frac{\exp(-s\tau_m)}{s^2}}{s^2\left[ch\sqrt{\frac{s}{a}}l+\frac{\alpha}{\lambda}\sqrt{\frac{s}{a}}sh\sqrt{\frac{s}{a}}l\right]}; \qquad (17)$$

температура в центре образца (t (x, τ), определяется выражением:

$$\theta=\frac{t(x,\tau)-t_0}{t_c-t_0}=1+\frac{1}{2}\sum_0^m(\tau-\tau_m)P_{0m}\cdot\left[1-\frac{x^2}{l^2}+\frac{2}{B_i}\right]-$$

$$-\sum_{n=1}^{\infty}\left[1+\frac{1}{\mu^2}\sum_0^m\frac{P_{om}}{\mu_n^2}\right]\cdot A_n\cdot\cos\varphi_n\frac{x}{l}\exp\left(-\mu_n^2\tau\right). \qquad (18)$$

Во втором периоде — изотермической выдержки — температурное поле описывается зависимостью:

$$P_{om}=\frac{q_m\tau_0(\tau-\tau_m)l^2}{\lambda(t_c-t_0)}. \qquad (19)$$

Если рассматривается не мгновенный подъем температуры на границе изделия, а постепенный, то для первого периода подъема температуры со скоростью [1. стр. 110.].

$$V=(t_{max}-t_0)/\tau_0$$

имеем:

$$t(\bar{x},\bar{\tau})=V\tau_{CT}\left[\bar{\tau}-\frac{1-x^2}{2}+2\sum_{n=1}^{\infty}(-1)^{n+1}\frac{\cos\mu_n^2\bar{x}}{\mu_n^3}\cdot\exp\left(-\mu_n^2\right)\right]+$$

$$\sum_0^m(\eta_n-\eta_{n-1})(\tau-\tau_k)\left[\frac{1-x^2}{2}-2\sum_{n=1}^{\infty}(-1)^{n+1}\frac{\cos\mu_n^2\bar{x}}{\mu_n^3}\cdot\exp\left(-\mu_n^2\right)(\tau-\tau_k)\right]; \qquad (20)$$

а динамика температуры в точке x = 0 (посередине образца)

(21)

Для второго периода (изотермическая выдержка):

$$t(0,\tau) = V\tau_{cm} - \frac{1}{2}[(1-\varphi_{1,\tau}) - (1-\varphi_{1,\tau})] + \frac{1}{2}\sum_{0}^{m} (\eta_k - \eta_{k-1})(\tau - \tau_k)[1-\varphi_1(\tau-\tau_k)] \quad (22)$$

Заключение

Полученные аналитические решения для нестационарного температурного поля позволяют качественно оценить влияние коэффициента лучепоглощения солнечной радиации на процесс формирования температурного режима в изделиях из композиционных строительных материалов.

Учёт тепловыделения при экзотермической реакции твердения вяжущего вещества в сочетании с воздействием солнечной радиации позволяет более точно прогнозировать температурные поля и оптимизировать режимы гелиотеплохимической обработки золоцементных материалов.

Список использованной литературы

1. Алиназаров А.Х. Энергоэффективная теплотехнология получения золоцементных композиционных материалов: монография. — М.: Русайнс, 2019. — 166 с.
2. Алиназаров А.Х., Мамаджонов М., Хайдаров Ш. Влияние солнечной радиации при интенсификации твердения золоцементных строительных материалов // Cognitio Rerum. — 2017. — С. 10–12.
3. Жураев Х.Т., Хайдаров Ш.Э. Численное моделирование нестационарных температурных полей в композиционных строительных материалах // Молодой учёный. — 2016. — №12. — С. 214–219.

4. Bažant Z.P., Kaplan M.F. Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models. — London: Longman, 1996. — 412 p.
5. Neville A.M. Properties of Concrete. — 5th ed. — London: Pearson Education, 2011. — 844 p.
6. Mazhidov N.N., Khaydarov Sh.E. Numerical analysis of transient temperature fields in cement-based materials with radiation absorption // Journal of Building Physics. — 2004. — Vol. 28, No. 1. — P. 45–56.
7. Neville A.M., Brooks J.J. Concrete Technology. — 2nd ed. — Harlow: Pearson Education, 2010. — 480 p.
8. Bažant Z.P., Thonguthai W. Pore pressure and drying of concrete at high temperatures // Journal of the Engineering Mechanics Division. — 1978. — Vol. 104, No. EM5. — P. 1059–1079.
9. Schindler A.K., Folliard K.J. Heat of hydration models for cementitious materials // ACI Materials Journal. — 2005. — Vol. 102, No. 1. — P. 24–33.
10. Cervera M., Oliver J., Prato T. Thermo-chemo-mechanical model for concrete. I: Hydration and aging // Journal of Engineering Mechanics. — 1999. — Vol. 125, No. 9. — P. 1018–1027.