

*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

ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В

**МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ С УЧЁТОМ
СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ**

Аннотация: В статье показана доля экзотермии в общих энергетических затратах при оценке эффективности различных режимов гелиотеплохимического воздействия на многокомпонентные цементные материалы. Проведены оценочные расчёты влияния режимов тепловыделения в многокомпонентных цементных материалах с учётом коэффициента лучепоглощения материала.

Ключевые слова: тепломассоперенос, 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*

EXOTHERMIC PROCESSES IN MULTICOMPONENT BUILDING MATERIALS WITH CONSIDERATION OF SOLAR RADIATION

Abstract: The article presents the contribution of exothermic reactions to the total energy consumption when evaluating the effectiveness of various heliothermal-chemical treatment regimes for multicomponent cement materials. Estimation calculations are carried out to assess the influence of heat-release regimes in multicomponent cement materials, taking into account the material's radiation absorption coefficient.

Keywords: heat and mass transfer, solar radiation, multicomponent cement materials, heat transfer, radiation absorption, heat release, heat treatment.

Введение: При разработке оптимальных режимов тепломассопереноса с учётом солнечной радиации, направленных на интенсификацию процесса твердения многокомпонентных цементных материалов, наряду с задачей обеспечения высокого качества изделий, важное значение приобретает прогнозирование энергетически обоснованных условий технологического процесса при экономически оптимальном расходе энергетических ресурсов [1, с. 10].

Процесс теплопереноса в нагреваемом и твердеющем изделии из многокомпонентных цементных материалов с учётом коэффициента лучепоглощения описывается следующей системой уравнений.

$$c\rho \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} + q_v(t, \tau) + q_I; \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (1)$$

$$t(x, 0) = t_h; \quad t(0, \tau) = t_{cp} \tau; \quad (2)$$

$$t(x, 0) = t_h; \quad t_{cp} \tau = t(0, \tau); \quad (3)$$

$$\frac{\partial t(r+0, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial t(r-0, \tau)}{\partial x}; \quad \frac{\partial t(l, \tau)}{\partial x}; \quad (4)$$

где $q_m(l, \tau) = m_m q_\vartheta(t, \tau)$ - объемный источник теплоты от гидратации цемента, Вт/м³;

$\lambda = 0,28-0,32$ вт/м⁰К- коэффициент теплопроводности;

c - удельная теплоемкость золоцементного материала, 830-870 Вт/м³К;

ρ - плотность бетона, 1316-1530 кг/м³;

m_v – масса цемента в 1 м³ бетона, 180-295 кг/м³;

l – толщина золоцементного изделия, 0,1; 0,2; 0,3 м;

q_ϑ - интенсивность внутреннего источника теплоты, Вт/кг;

t_h - температура греющей поверхности, причем при $0 \leq \tau \leq 7200c$

$$t_{cp}(\tau) = (t_{\max} - t_h) \frac{\tau}{7200 + t_h}; \quad t_{cp}(\tau) = t_{\max};$$

при этом $t_h = 20^0\text{C}$, $t_{\max} = 80^0\text{C}$.

Зависимости интенсивности тепловыделения от температуры и времени моделировались по методу равных тепловыделений [2, с. 95] на основе экспериментально полученного набора кривых для изотермических условий [3, с. 87], которые при численной реализации аппроксимировались сплайнами первого порядка.

Для численной реализации модели (1)-(4) использовалась явная конечно-разностная схема [4-6], позволяющая в общей динамике температур выделить составляющую, обусловленную действием внутреннего источника тепла.

$$t_i^j = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} (t_{i-1}^{j-1} - 2t_i^{j-1} - t_{i+1}^{j-1}) + t_i^{j-1} + \frac{m_v - \Delta \tau}{c \rho} q_{\vartheta i}^{j*}; \quad (5)$$

где $I = 0, N; N = 5; j = 0, k; k = 600; j^*$ - индекс момента времени, определяемый по методике равных тепловыделений, i .

Порядок аппроксимации разностной схемы (5) зависит не только от порядка аппроксимации уравнения, но и краевых условий. Начальные и граничные условия 1- го рода при $x = 0$ аппроксимируются точно, а на

границе $x = 1$ с точностью $O(\Delta x)$ [17]. Для повышения порядка аппроксимации краевых условий (4) при $x = 1$ раскладывали производную в ряд Тейлора в окрестности точки $x = 1$:

$$t(l, \tau) = \frac{\partial t(l, x)}{\partial x} = t(l, \tau) - \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{\partial^2 t(l, \tau)}{\partial x^2} + O(\Delta x^2).$$

Отсюда

$$\frac{\partial t(j, \tau)}{\partial x} = t(l, \tau) - \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{\partial^2 t(l, \tau)}{\partial x^2} + O(\Delta x).$$

Выразив вторую производную из уравнения (4.1)

$$\frac{\partial^2 t(j, \tau)}{\partial x^2} = c \cdot \rho / \lambda \frac{\partial t(l, \tau)}{\partial \tau} - \frac{m_v}{c \cdot \rho} q_{\vartheta}(t, \tau) \quad (6)$$

и учитывая, что на этой границе $\Delta t / \Delta x = 0$, получим

$$t(l, \tau) - \frac{\Delta x}{2\lambda} \cdot c \cdot \rho \left[\lambda \frac{\partial t(l, \tau)}{\partial \tau} - m_v \cdot q_{\vartheta}(t, \tau) \right] = 0;$$

$$t_N^j = \frac{\Delta \tau}{0,5 \cdot c \cdot \rho \cdot \Delta x^2} \left[t_N^{j-1} - t_{N-1}^{j-1} \right] + \frac{m_v \cdot q_{\vartheta}^j}{c \cdot \rho} + t_N^{j-1} + O(\Delta x^2). \quad (7)$$

Таким образом, разностные аналоги уравнения и краевых условий имеют одинаковый порядок аппроксимации $O(\tau + \Delta x^2)$. В (5) подъём температуры в расчётной точке за счёт внутреннего тепловыделения

$$\Delta t_{q_i}^{j-1} = \frac{m_v \cdot \Delta \tau}{c \cdot \rho} q_{\vartheta i}^{j*} + K_A \cdot q_i^j. \quad (4.8)$$

Общий рост температуры за весь период термообработки изделия

$$\sum_{j=1}^k \Delta t \cdot q_i = \sum_{j=1}^k \frac{m_v \cdot \Delta \tau}{c \cdot \rho} \cdot q_{\vartheta i}^{j*} + q_l. \quad (9)$$

Средняя по объему тела интенсивность тепловыделения

$$q_{\vartheta}^{-j} = \frac{1}{V} \int_V t \cdot q_{\vartheta} dV + \frac{1}{K_A S} \int_S q_l^i \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t \cdot q_{\vartheta i}^{j*} + \frac{1}{K_A} \sum_{i=1}^S q_l^i, \quad (10)$$

где - V - объем изделия, приходящейся на 1 м^2 обогреваемой поверхности.

Количество теплоты, выделяющейся в объеме изделия за время $\Delta \tau$

$$Q_{\vartheta}^i = m_v \cdot \Delta \tau \int_V q_{\vartheta}^i \cdot dV + \frac{1}{K_A} \int_S Q_l^i \approx m_v \cdot \Delta \tau \cdot \Delta x \sum_{j=1}^k Q_{\vartheta i}^j + \frac{1}{K_A} \sum_{i=1}^S Q_l^i. \quad (11)$$

$$Q_{\vartheta} = \int_0^{\tau} Q_{\vartheta} \cdot d\tau \approx \sum_{j=1}^k Q_{\vartheta i}^j + \sum_{i=1}^S Q_l^i. \quad (12)$$

Для расчета теплового потока, поддерживающего заданный температурный режим, решалась псевдообратная задача теплопроводности [7], в которой по значению температур на обогреваемой поверхности с учетом солнечной радиации и в прилегающем слое рассчитывалась плотность теплового потока q_F , генерируемая в гелиоустановке [8], из

$$\text{выражения } q_{\vartheta} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x}$$

с учётом условия (4.6), т.е.

$$q_F = -\lambda t'(0, \tau) - 0,5 \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial^2 t(0, \tau)}{\partial x^2} + O(\Delta x^2), \quad (13)$$

или

$$q_F = -\lambda \left[\frac{\tau'(0, \tau) - 0,5 \cdot \Delta x}{c \cdot \rho \frac{\partial^2 \tau(0, \tau)}{\partial x^2} - m_v q_\infty} \right]. \quad (14)$$

Выражение (4.14) можно переписать в более удобном для расчёта на ЭВМ виде

$$\begin{aligned} q_F = & -\frac{\lambda}{\Delta x} (\tau_r^j - 1 - \tau_1^j - 1) + \Delta x \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho \cdot (\tau_1^j - \tau^j - 1) \cdot \\ & 0,5 + E_K \cdot C_0 \cdot (\tau_1^4 - \tau_0^4) \cdot q_l^i \cdot \Delta x \cdot K_i \end{aligned} \quad (15)$$

Количество теплоты, необходимое для обогрева изделия за время гелиотепловой обработки

$$Q_F^j = q_\infty^j \cdot \Delta \tau + q_l^i \cdot \Delta r, \quad (16)$$

а за промежуток τ

$$Q_r = \int_0^\tau Q_F \cdot d\tau \approx \sum_{j=1}^k Q_F^j + \sum_{i=1}^K Q_l^i. \quad (17)$$

Коэффициент эффективности

$$K_\infty = \frac{Q_r}{Q_F} \cdot 100\%. \quad (18)$$

Однако полученные величины носят идеализированный характер, как и величины, получаемые при решении оптимизационных задач, так как практически не могут учесть все потери теплоты в реальных условиях. [1. стр. 11.]

Результаты решения поставленной задачи для $l_1 < l_2 < l_3$. Послойное тепловыделение и соответствующий подъем температуры анализировались в трех сечениях, которые соответствовали точкам N_2 , N_3 и N_4 (точка N_3 – середина изделия; N_2 , N_4 – крайние поверхности, в то же время эти точки не подвергаются деформирующему влиянию температур на границах).

Таблица 1

Границные показатели гелиотеплохимически обработанного изделия из многокомпонентных цементных материалов на прослойках

Границные точки	Толщина изделия, м								
	$l = 0,1 \pm 0,001$			$l = 0,2 \pm 0,001$			$l = 0,4 \pm 0,001$		
	Δt^1 , 0_C	t^1 , 0_C	$Q^1_{\text{Э}}$, $MДж$	Δt^{11} , 0_C	t^{11} , 0_C	$Q^{11}_{\text{Э}}$, $MДж$	Δt^{111} , 0_C	t^{111} , 0_C	$Q^{111}_{\text{Э}}$, $MДж$
N_2	16,2	79,10	1,44	18,9	77,91	3,32	18,97	71,32	4,92
N_3	14,6	80,45	1,31	18,1	76,21	3,11	14,17	60,62	3,41
N_4	13,9	80,67	1,31	17,2	73,20	2,93	9,07	51,07	2,32

Проанализируем результаты математического моделирования процесса гелиотепловой обработки изделия.

a) $l = 0,1$ м. Кривые, характеризующие расчетные послойные интенсивности тепловыделения, имеют максимумы, близко расположенные друг к другу. Это можно объяснить быстрым прогревом изделия на всю толщину, обусловленное её малой величиной. В точках N_2 и N_3 пики более высокие и острые, чем в точке N_4 , хотя этот слой прогревается значительно быстрее. Из-за немонотонности изотермических кривых величина $q_{\text{Э}}$ определяется не только температурой, но и временем достижения данной температуры. В то же время действие экзотермии в точке 1 дало самое большое тепловыделение, соответственно прирост температуры, что объясняется влиянием радиации солнечного излучения (табл. 1). Через 5 ч. температура в изделии под действием экзотермии превысила температуру греющей стенки, а тепловыделение было практически одинаковое по всей толщине изделия, поскольку температура в различных точках почти одинакова.

б) $l_2 = 0,2$ м. При данной толщине изделия температура в исследуемых слоях не выравнивается до конца обогрева. Поэтому пики интенсивностей тепловыделения плавно следуют друг за другом, постепенно уменьшаясь по величине. Такая динамика хорошо согласуется с ходом изотермических кривых для соответствующих температур.

Временные показатели гелиотеплохимически обработанного золоцементного мелкозернистого композиционного изделия на прослойках представлены в табл. 2.

Таблица 2

Временные показатели тепловыделения многокомпонентных цементных материалов при гелиотеплохимической обработке

Сроки определения тепловыделения, ч.	Превышение температуры, ($^{\circ}$ С), при содержании золы, мас. %				
	0	20	40	60	80
5	18	9	7	5	4
10	38	28	21	12	8
15	29	25	23	29	16
20	17	18	16	19	16
25	13	12	10	9	8
30	8	7	6	6	6
35	6	5	5	4	4

Полученные данные хорошо коррелируют с кинетикой тепловыделения золоцементных систем. Наполнение золой на 20, 40, 60 и 80% снижает тепловыделение, соответственно, на 17, 40, 50, и 57%. Введение модифицированных добавок ПАВ снижает тепловыделение на 5; 6,4; 8% в следующем порядке МПД-1 > МПД-3 > МПД-2, что объясняется

избирательной адсорбцией модифицированных пластифицирующих добавок на активных центрах поверхности частиц золы и цемента.

в) При $l_3 = 0,3$ прогрев внутренних слоев изделия значительно отстает от прогрева внешних, поэтому величины максимумов и время их появления в исследуемых точках изделия значительно отличаются между собой. Это объясняется тем, что при переходе от одной изотермической зависимости q_3 к другой в процессе прогрева соответствующие значения тепловыделений попадают с нисходящей ветви q_3 на восходящую. Интегральные показатели гелиотеплохимически обработанного изделия из многокомпонентных цементных материалов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Интегральные показатели гелиотеплохимически обработанного изделия из многокомпонентных цементных материалов

$l, \text{м}$	$q_3, \text{kBt/m}^3$	$r_{\max}, \text{ч}$	$Q_3, \text{МД/m}^3$	$Q^*_{\mathcal{E}}, \text{МД/m}^3$
$0,1 \pm 0,001 \text{м}$	4,86	5	4,31	42,10
$0,2 \pm 0,001 \text{м}$	4,11	6	8,20	39,81
$0,3 \pm 0,001 \text{м}$	2,07	8	15,31	38,21

$l, \text{м}$	$t, {}^\circ\text{C}$	$\Delta t, {}^\circ\text{C}$	$Q_f^*, \text{МДж/m}^3$	$t, \text{ч}$	$Q^*_{\mathcal{E}}/Q_f^*, \%$	$Q^*_{\mathcal{E}}/Q_{\text{треб.}}^*, \%$
$0,1 \pm 0,001 \text{м}$	80,45	14,42	13,21	5	31,87	16,84
$0,2 \pm 0,001 \text{м}$	77,92	16,94	11,84	11	38,39	15,92
$0,3 \pm 0,001 \text{м}$	60,14	13,63	10,37	13	36,85	15,28

Анализируя результаты расчётов для мелкозернистых изделий различной толщины, можно отметить следующее. Толщина изделия влияет не только на количественные характеристики тепловыделения, но изменяет и качественную картину их кинетики. [8. стр. 369.]

При этом чем толще изделие, тем больше выделяется теплоты в абсолютных единицах и тем большую долю она составляет в общих затратах

тепла на прогрев, так как при увеличении толщины композиционного изделия в расчёте на 1 м² обогреваемой поверхности увеличивается объем изделия, и, соответственно, количество цемента. В расчёте на 1 м³ изделия такой прямой зависимости уже не наблюдается. Таким образом, толщина изделия определяет глубину прогрева. При малой толщине (порядка 0,1-0,15 м, например, мелкозернистые золоцементные изделия, кирпич и др.), изделие прогревается быстро и уже к 4-му часу экзотермии дает резкий всплеск q_e (кВт/м³), а затем быстро убывает по всему объему. При средней толщине 1 = 0,2 м создаётся наиболее благоприятный режим для тепловыделения по всей толщине, т.е. достигается достаточно большой экстремум (max) q_e (МДж/м³), и тепловыделение действует продолжительное время (до 18 часов). При больших толщинах золоцементных мелкозернистых изделий с модифицированными пластифицирующими добавками ($l \approx 0,3$ или $0,4$ м), температура удалённых слоёв не поднимается соответственно выше $t'_{cp} \approx 40-45$ и $t''_{cp} \approx 38-41^{\circ}\text{C}$, а поэтому тепловыделение в этих слоях значительно отстаёт от более прогретых. Этим и объясняется небольшие относительные величины тепловыделения.

Таким образом, зная основные закономерности действия экзотермии в твердеющем (структурообразующем) золоцементном изделии полиструктурного строения и долю, которую она может составлять в общих затратах, можно оценивать эффективность того или иного режима гелиотеплохимической обработки данного класса многокомпонентных цементных материалов и изделий мелкозернистого строения.

Список использованной литературы.

1. А.Х.Алиназаров., М.Мамаджонов., Ш.Э.Хайдаров «Влияние солнечной радиации при интенсификации твердение золоцементных строительных материалов» Международный научный журнал научное периодическое издание «Cognitio Rerum» Россия, 2017 стр. 10-12.

2. А.Х.Алиназаров. «Энергоэффективная теплотехнология получения золоцементных композиционных материалов» Монография, Москва: Русайнс, 2019.-166 стр.
3. А.Х.Алиназаров. «Энерго- и ресурсосбергающая технология получения строительных материалов и изделий методом гелиотеплохимической обработки» Монография, Москва: Русайнс, 2017.-118с.
4. Alinazarov. A.Kh. Mukhiddinov D.N. Solar Thermochemical Treatment of Ash-Cement Compositions. Applied Solar Energy. Vol. 35, No. 4. Allerton Press, Inc. /New York. 1999. pp. 13-19.
5. Alinazarov A.Kh. Mazhidov N.N. Mathematical Modeling of Thermal Processes in the Helio-thermochemical Treatment of Fine- Applied Solar Energy. Vol. 37, No. 2. Allerton Press, Ins. New York. 2001. p. 18-20.
6. Алиназаров А., Мамаджонов М., Хайдаров Ш Методика расчёта нестационарных полей температуры с учётом лучепоглощения в изделиях из композиционных строительных материалов. Общество Науки и Творчества, Россия, 2017 16-18.
7. Алиназаров А., Мажидов Н, Жўраев Х. Методика расчёта нестационарных полей температуры с учётом лучепоглощения в изделиях из композиционных строительных материалов. Академическая Публицистика, Россия, 2017 №5 стр. 8-14
8. А.Х.Алиназаров., Ш.Э.Хайдаров., Д.М.Хатамова., «Технологические особенности использования угольной золы как эффективное решение экологической проблемы» «Молодой учёный» ежемесячный научный журнал 2014 часть IV. стр. 366-370.