

---

---

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

---

---

УДК 681.3

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ИК-ОБЛУЧЕНИИ

*Филин Виктор Андреевич, доктор технических наук, профессор, Астраханский государственный университет, 414056, Россия, Астрахань, Татищева, 20 а, e-mail: tach44@mail.ru.*

*Дербасова Евгения Михайловна, аспирант, Астраханский инженерно-строительный институт, 414056 г. Астрахань, ул. Татищева, 18, e-mail: chertella@rambler.ru.*

*Муканов Руслан Владимирович, старший преподаватель, Астраханский инженерно-строительный институт, 414056 г. Астрахань, ул. Татищева, 18, e-mail: rvmtukanov@mail.ru.*

*Использование железобетонных изделий в качестве строительных материалов при возведении зданий и сооружений до сих пор является наиболее востребованным. Это обусловлено высокой степенью надежности и несущей способностью данных изделий, достаточно налаженной системой контроля за производством.*

*Тепловлажностная обработка бетонных и железобетонных конструкций является неотъемлемой и ответственной частью технологического процесса производства ЖБИ строительного комплекса России. Энергетические затраты на выполнение этой технологической операции составляют более 50 % от всех энергозатрат предприятия.*

*Применение инфракрасного излучения вызывает определенные особенности в моделировании процесса распространения тепла и, как следствие, прогрев бетонных изделий по толщине.*

*В статье рассматривается моделирование процесса распространения тепла и расчета температуры и времени прогрева внутри бетонного изделия с использованием ИК-излучения применительно к камере инфракрасного нагрева. Это позволит научно обоснованно проводить работы по оптимизации конструктивных характеристик ИК-установки, выбора ИК-излучателей, их расположения в камере. Представлена физическая модель экспериментальной установки набора температуры исследуемого образца при различных способах передачи тепла. При решении задачи нестационарной теплопроводности был выполнен расчет времени прогрева бетонного изделия в камере тепловлажностной обработки. На основании полученных данных определили основные задачи экспериментов. Они должны включать в себя выявление температурного поля внутри исследуемого образца с различными источниками ИК-излучения, влияние длины волны и длительности процесса тепловлажностной обработки на прочностные характеристики получаемых изделий.*

**Ключевые слова:** бетон, инфракрасное излучение, теплообмен, математическая модель, ускоренное твердение, нестационарная теплопроводность, эксперимент, камера инфракрасного нагрева, объект термообработки, температурное поле.

### MATHEMATICAL MODEL OF CALCULATION OF TEMPERATURE OF CONCRETE PRODUCTS AT THE IK-RADIATION

*Filin Viktor A., Dr. Sc. in Technology, Full Professor, Astrakhan State University, 20a Tatishchev str., Astrakhan, 414056, Russia, e-mail: tach44@mail.ru.*

*Derbasova Evgeniya M., Post-graduate student, Astrakhan Construction Institute, 18 Tatishchev str., Astrakhan, 414056, Russia, e-mail: chertella@rambler.ru.*

*Mukanov Ruslan V., Senior Lecturer, Astrakhan Construction Institute, 18 Tatishchev str., Astrakhan, 414056, Russia, e-mail: rvmukanov@mail.ru.*

*Use of ferro-concrete products as building materials at erection of buildings and construction is most demanded till present moment. It is caused by high degree of reliability and bearing ability of the given products which have been enough adjusted by the monitoring system behind manufacture.*

*Thermomoist processing of concrete and ferro-concrete designs is an integral and responsible part of technological process of manufacture of a building complex of Russia. Power expenses for performance of this technological operation make more than 50 % from all power inputs of the enterprise.*

*Application of infra-red radiation causes certain features in modeling of process of distribution of heat and, as consequence, warming up of concrete products in thickness.*

*In the article modeling of process of distribution of heat and calculation of temperature and time of warming up in a concrete product with Ik-radiation use with reference to the chamber of infra-red heating is considered. It will allow to conduct scientific works on optimization of constructive characteristics of Ik-installation, choice of Ik-radiators and their arrangements in the chamber. The physical model of experimental installation of a set of temperature of the investigated sample is presented at various ways of transfer of heat. During solvation of the problem of non-stationary heat conductivity the calculation of time of warming up of a concrete product in the chamber of thermomoist processings has been executed. On the basis of the received data the primary goals of experiments have been defined. They should include revealing of temperature field in the investigated sample with various sources of Ik-radiation, influence of length of a wave and duration of process of thermomoist processings on strength characteristics of received products.*

**Key words:** *concrete, infra-red radiation, heat exchange, mathematical model, accelerated hardening, non-stationary heat conductivity, experiment, chamber of infra-red heating, object of heat treatment, temperature field.*

В строительном производстве все шире используются источники ИК-излучения для ускоренного твердения бетонных и железобетонных строительных конструкций. В настоящее время отмечено его применение в двух вариантах:

- возведение зданий по технологии монолитного домостроения (особенно в зимних условиях);
- изготовление строительных конструкций в заводской технологии.

В первом варианте ИК-излучение применяется для периферийного обогрева бетона. При этом в качестве источников ИК-излучения используются металлические, трубчатые (ТЭНы) и стержневые карборундовые излучатели. При использовании второго варианта существующие установки тепловлажностной обработки на предприятиях стройиндустрии переоборудуются в установки с ИК-излучателями.

Применение инфракрасного излучения вызывает определенные особенности в моделировании процесса распространения тепла и, как следствие, прогрев бетонных изделий по толщине.

В связи с этим ставится задача о необходимости разработки математической модели теплообмена в системе «ИК-излучатель – бетонное изделие», а также участвующих в этом процессе конструктивных элементов установки. Это позволит научно обоснованно проводить работы по оптимизации конструктивных характеристик ИК-установки, выбора ИК-излучателей, их расположения в камере и др.

---

---

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

---

---

В качестве математической модели описания процесса теплообмена в системе «ИК-излучатель – объект термообработки» рекомендуется использовать дифференциальное уравнение энергетического баланса:

$$\eta \cdot A_{\lambda} \cdot P_{обл} \cdot d\tau = Cd\theta + P_k d\tau + P_u d\tau + P_{исп} d\tau \quad (1)$$

где  $A_{\lambda}$  – коэффициент поглощения энергии ИК-излучения облучаемым объектом;  $\eta$  – КПД ИК-облучателя;  $P_{обл}$  – мощность ИК-облучателя, Вт;  $C$  – теплоемкость материала объекта облучения, Дж/к;  $\theta$  – температура бетонного изделия, К;  $P_k$  – тепловые потери, возникающие в результате конвективного теплообмена, Вт;  $\tau$  – время процесса, сек;  $P_{исп}$  – мощность, необходимая на испарение влаги, Вт;  $P_u$  – тепловые потери, возникающие в результате лучистого теплообмена между облучаемым объектом и окружающими поверхностями, Вт.

Данное уравнение справедливо к категории облучаемых объектов без внутренних источников тепла. Однако известно, что процесс твердения бетона сопровождается выделением тепла. Учесть этот эффект возможно включением в уравнение (1) дополнительной составляющей «Рб», которая будет определять мощность тепловыделений при экзотермической реакции «вода – цемент».

Решая уравнение (1) относительно  $\theta$  и принимая во внимание, что температура стенок формы, камеры и бетонной смеси в начале облучения одинакова, можно записать:

$$\theta = \theta_{\max} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{T}} \right), \quad (2)$$

где  $\theta_{\max}$  – максимально возможное превышение температуры бетонного блока при его тепловлажностной обработке, К;  $T$  – постоянная времени нагрева бетонного блока, сек.

В свою очередь,  $\theta_{\max}$  выражается так:

$$\theta_{\max} = \frac{A_{\lambda} \cdot \eta \cdot P_{обл} + K_B \cdot P_B}{\alpha_{\Sigma} \cdot F_{\Sigma}}, \quad (3)$$

где  $\alpha_{\Sigma}$  – суммарный коэффициент теплообмена, Вт/К·м<sup>2</sup>;  $F_{\Sigma}$  – суммарная площадь теплообмена, м<sup>2</sup>;  $K_B$  – коэффициент тепловой активности бетона;  $P_B$  – мощность тепловыделений при экзотермической реакции «вода – цемент», Вт.

Представив уравнение (3) в виде:

$$\theta_{\max} = E_1 \frac{P_{обл}}{F} + E_2 \frac{P_B}{F}, \quad (4)$$

получим универсальную математическую модель расчета максимально возможных значений температуры нагрева бетонных блоков изделий в системе «ИК-облучатель – бетонное изделие» при различных значениях плотности к мощности  $\left(\frac{P}{F}\right)$ .

Показатель  $E_1$  в уравнении (4) характеризует свойства ИК-излучателей и бетонного блока, зависящие от согласования спектральных характеристик источников излучения и оптических свойств бетонного изделия.

Показатель  $E_2$  выражает тепловую активность процесса твердения бетона и зависит в основном от марки бетона. Физическая модель планируемых экспериментов представлена на рисунке 1.

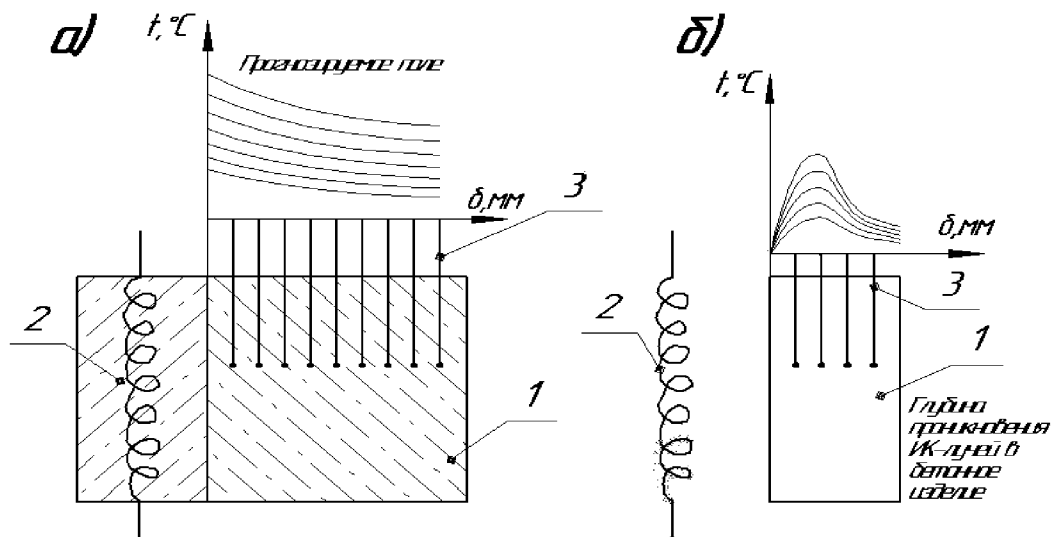


Рис. 1. Физическая модель экспериментальной установки набора температуры исследуемого образца при различных способах передачи тепла: а) теплопроводностью, б) излучением:  
1 – исследуемый образец; 2 – источник тепла; 3 – термопары

### *Расчет времени прогрева*

Воспользуемся приближенным методом решения задач нестационарной теплопроводности для нахождения времени прогрева бетонного изделия в камере тепловлажностной обработки, в практических расчетах часто применяется метод конечных разностей Шмидта. Этот метод основан на допущении возможности замены непрерывного процесса скачкообразным как в пространстве, так и во времени. При этом дифференциальное уравнение теплопроводности заменяется уравнением в конечных разностях, которое для одномерного поля имеет вид:

$$\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = \alpha \cdot \frac{\Delta^2 t}{\Delta x^2} \quad (5)$$

Практика применения этого метода к расчету плоских, цилиндрических и сферических тел, а также к расчету двумерного температурного поля впервые была разработана Э. Шмидтом. Рассмотрим этот метод в применении к изделию камеры. Разделим изделие на слои одинаковой толщины  $\Delta x$ ; (рис. 2), которые будем обозначать номерами  $(n-1)$ ,  $n$ ,  $(n+1)$ ... Время также разобьем на интервалы  $\Delta t$ , которые будем обозначать номерами  $k$ ,  $(k+1)$ ... В таком случае  $t_{n,k}$  обозначает температуру в середине  $n$ -го слоя в течение всего  $k$ -го промежутка времени; температурная кривая представляется ломаной линией. Из рисунка 2 следует, что в пределах слоя  $n$  температурная кривая имеет два наклона. Следовательно, производная от температуры по координате должна иметь два экстремума, а именно:

$$\frac{\Delta t}{\Delta \tau +} = \frac{t_{n+1,k} - t_{n,k}}{\Delta x}$$

и

$$\frac{\Delta t}{\Delta \tau -} = \frac{t_{n,k} - t_{n-1,k}}{\Delta x}$$

---



---

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

---



---

Для второй производной получим:

$$\frac{\Delta^2 t}{\Delta \tau^2} = \frac{1}{\Delta x} \left[ \left( \frac{\Delta t}{\Delta x} \right) - \left( \frac{\Delta t}{\Delta x} \right) \right] = \frac{1}{\Delta x^2} (t_{n+1,k} + t_{n-1,k} - 2t_{n,k}) \quad (6)$$

Производная от температуры по времени для слоя n имеет вид:

$$\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = \frac{t_{n,k+1} - t_{n,k}}{\Delta \tau} \quad (7)$$

Подставляя уравнения (6) и (7) в уравнение (5), имеем:

$$\frac{t_{n,k+1} - t_{n,k}}{\Delta \tau} = \alpha \frac{t_{n,k+1} + t_{n-1,k} - 2t_{n,k}}{\Delta x^2}$$

или

$$t_{n,k+1} = 2\alpha \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} \cdot \frac{t_{n+1,k} + t_{n-1,k}}{2} - \left( 2\alpha \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} - 1 \right) t_{n,k} \quad (8)$$

Таким образом, зная распределение температур в теле для k-го интервала времени, на основании уравнения (8) можно найти распределение температур для последующего интервала времени (k + 1) и т. д.

Если интервалы времени  $\Delta t$  и размер слоев  $\Delta x$  выбрать так, чтобы  $2\alpha \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} = 1$ , то уравнение (8) принимает вид:

$$t_{n,k+1} = \frac{1}{2} (t_{n+1,k} + t_{n-1,k}) \quad (9)$$

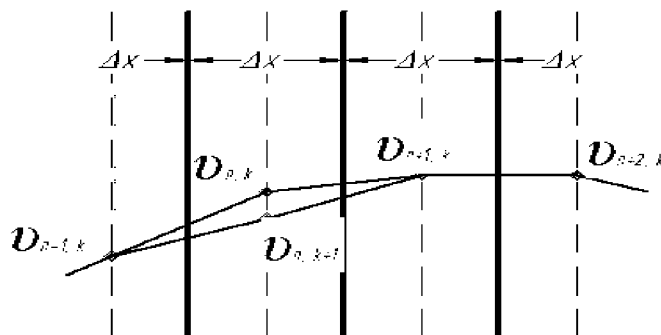


Рис. 2. Метод конечных разностей: условные обозначения и графическая интерпретация

Из уравнения (9) следует, что  $t_{n,k+1}$  является среднеарифметическим значений  $t_{n+1,k}$  и  $t_{n-1,k}$ . Поэтому техника расчета очень проста. Также просто уравнение (8) решается и графически. Значение интервала времени  $\Delta \tau$  определяется из соотношения:

$$\Delta \tau = \Delta x^2 / 2\alpha. \quad (10)$$

Рассматривая бетонное изделие ( $\alpha=0.765 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/сек) толщиной 200 мм, после разбивки на 4, слой берется равным 50 мм, интервал времени  $\Delta t$  получает значение:

$$\Delta \tau = \Delta x^2 / 2\alpha = \frac{0.05^2}{2 \cdot 0.765 \cdot 10^{-6}} = 2700 \text{ сек.}$$

Получили время прогрева одного слоя, после сложения времен прогрева всех слоев получаем 10800 сек, или 3 часа (время прогрева всего изделия).

На основании полученных уравнений выявляется задача постановки экспериментов. Они должны включать в себя выявление температурного поля внутри исследуемого образца с различными источниками ИК-излучения, влияние длины волны и длительности процесса тепловлажностной обработки на прочностные характеристики получаемых изделий.

#### Список литературы

1. Гинзбург А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов / А. С. Гинзбург // Пищевая промышленность. – 1973. – № 8. – С. 14–16.
2. Жучков П. А. Теплообмен на сушильных цилиндрах БАМ / П. А. Жучков // Труды ЛТИ ЦБП. – 1962. – № 10. – С. 24–36.
3. Красников В. В. Контактная комбинированная сушка капиллярно-пористых материалов / В. В. Красников // МТИПП. – 1958. – С. 118–121.

#### References

1. Ginzburg A. S. Osnovy teorii i tekhniki sushki pishhevykh produktov / A. S. Ginzburg // Pishhevaya promyshlennost'. – 1973. – № 8. – S. 14–16.
2. Zhuchkov P. A. Teploobmen na sushil'nykh tsilindrakh BAM / P. A. Zhuchkov // Trudy LTI TSBP. – 1962. – № 10. – S. 24–36.
3. Krasnikov V. V. Kontaktnaya kombinirovannaya sushka kapillyarno-poristykh materialov / V. V. Krasnikov // MTIPP. – 1958. – S. 118–121.

УДК 004.032.26 + 338.27

### **ПРИМЕНЕНИЕ ЭВОЛЮЦИОННЫХ КОННЕКТИВИСТСКИХ МОДЕЛЕЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ СОСТОЯНИЙ ДИНАМИКИ СИСТЕМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ\***

*Щербаков Максим Владимирович, кандидат технических наук, Волгоградский государственный технический университет, 400131, Россия, Волгоград, пр. Ленина, 28, e-mail: maxim.shcherbakov@gmail.com.*

*Козлов Илья Петрович, магистрант, Волгоградский государственный технический университет, 400131, Россия, Волгоград, пр. Ленина, 28, e-mail: benkyo.nanodesu@gmail.com.*

*Щербакова Наталия Львовна, кандидат технических наук, Волгоградский государственный технический университет, 400131, Россия, Волгоград, пр. Ленина, 28, e-mail: snl@gebeus.ru.*

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 10-07-97008-р\_поволжье\_a).