

Ю. С. ВЫТЧИКОВ
И. В. НЕДОСЕКО
М. Е. САПАРЁВ
А. А. ЧУЛКОВ

ПРИБЛИЖЕННЫЙ АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПРОЦЕССА ОБОГРЕВА БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ГРЕЮЩИХ ОПАЛУБКАХ

APPROXIMATE ANALYTICAL METHOD FOR CALCULATING THE HEATING PROCESS OF CONCRETE STRUCTURES IN HEATING FORMWORK

Применение электрообогрева бетона при строительстве в зимний период позволяет создать оптимальный тепловой режим, при котором происходит процесс твердения, и получить конструкцию требуемого качества. При разработке системы автоматического управления процессом обогрева необходимо определить закон регулирования мощности нагревателей. В данной статье представлена методика расчета теплового режима обогрева бетонных конструкций в греющих опалубках, сущность которой заключается в сведении краевой задачи теплопроводности к системе эквивалентных интегральных уравнений. Для решения данной задачи было проведено теоретическое исследование процесса теплопереноса в бетонных конструкциях, обогреваемых при зимнем бетонировании, а также представлено математическое описание этого процесса в виде системы дифференциальных уравнений. После преобразований указанной выше системы уравнений и применения к ней функции Грина второго рода для пластины и стержня было получено приближенное решение эквивалентного уравнения. В результате применения асимптотического метода к решению интегрального уравнения получено аналитическое решение рассматриваемой задачи. Полученное решение позволяет определить температурное поле на поверхности бетона, а также величину удельного теплового потока от электронагревателей. С целью автоматизации процесса выполнения теплового расчета обогрева бетонных конструкций с помощью греющих опалубок на основе полученного решения разработана программа расчета температурных полей в греющих опалубках, позволяющая эффективно решать задачи контроля и управления процессом твердения бетона. Разработанная программа позволяет производить расчет температурных полей не только при постоянной мощности нагревателей, но и при ее изменении с помощью регуляторов. Представленная методика теплового расчета с программно-аппаратным комплексом регулирования мощности электронагревателей позволяет решать достаточно широкий круг задач, связанных с поддержанием постоянного температурного поля.

Ключевые слова: тепловой режим, управление процессом твердения, бетон, греющая опалубка, температурное поле, температурный контроль

The use of electric heating of concrete during construction in winter makes it possible to create an optimal thermal regime in which the hardening process takes place, and to obtain a structure of the required quality. When developing a system for automatic control of the heating process, it is necessary to determine the law of regulating the power of heaters. This article presents a method for calculating the thermal heating regime of concrete structures in heating formwork, the essence of which is to reduce the boundary value problem of thermal conductivity to a system of equivalent integral equations. To solve this problem, a theoretical study was carried out, a theoretical study of the heat transfer process in concrete structures heated during winter concreting was carried out, and a mathematical description of this process was presented in the form of a system of differential equations. After the transformations of the above system of equations and the application of the Green function of the second kind to it for the plate and rod, an approximate solution of the equivalent equation was obtained. As a result of the application of the asymptotic method to the solution of the integral equation, an analytical solution of the problem under consideration is obtained. The resulting solution makes it possible to determine the temperature fields on the concrete surface, as well as the value of the specific heat flux from electric heaters. In order to automate the process of performing the thermal calculation of heating concrete structures with the help of heating forms, a program for calculating temperature fields in heating forms has been developed based on the solution obtained, which makes it possible to effectively solve the tasks of monitoring and controlling the concrete hardening process. The developed program makes it possible to calculate temperature fields not only at constant heater power, but also when it changes with the help of regulators. The presented method of thermal calculation with a hardware and software complex for regulating the power of electric heaters allows solving a fairly wide range of tasks related to maintaining a constant temperature field.

Keywords: thermal regime, control of the hardening process, concrete, heating formwork, temperature field, temperature control

Температурный режим при твердении бетона и керамзитобетона, как показано в работах [1, 2], оказывает существенное влияние на нарастание прочности возводимых строительных конструкций. Применение тепловой обработки возводимых конструкций с помощью греющих опалубок с регулируемой мощностью электронагревателей позволяет улучшить их качество в процессе твердения за счет устранения возможных трещин в процессе твердения, снизить энергозатраты, а также в целом ускорить процесс строительства зданий [3, 4].

Изучению и применению обогрева бетона в зимних условиях посвящены работы [5, 6]. Однако при использовании довольно эффективных методов тепловой обработки бетона в построечных условиях имеются свои недостатки, проявляющиеся при обогреве тонкостенных и густоармированных ограждающих конструкций. Неравномерность электрического и температурного полей при бетонировании конструкций с пространственной каркасной арматурой, возможность замыкания электродов на арматуру, значительная потребность электродов, повышенные требования техники безопасности и другие недостатки ограничивают сферу применения электрообогрева [7–9]. Метод, связанный с применением греющих опалубок, лишен большинства этих недостатков. Его основным достоинством является простота производства работ зимой с применением греющей опалубки в сочетании с любым способом ускоренного твердения бетона [10, 11]. При этом экономичность электрообогрева бетона во многом определяется типом электронагревательных устройств. Наиболее экономичными являются электронагреватели, устанавливаемые вплотную к опалубке и передающие через нее тепло бетону [12–14]. Применение такой технологии при возведении монолитных ограждающих конструкций в холодное время года позволяет получить высококачественные изделия. Другие факторы и особенности, влияющие на формирование физико-механических свойств бетонов, представлены в работах [15, 16]. Математическое описание процесса теплопереноса в твердеющих бетонных конструкциях, обогреваемых в холодное время, представлено в работах [17, 18].

Применение термической обработки для интенсификации процесса твердения обуславливает при этом наличие температурно-прочностного контроля. Вопросы, связанные с контролем и управлением процессов термобработки бетона, освещены в работах [19–21]. При решении подобных задач возникает необходимость в определении температурного поля в указанной выше конструкции. Кроме

того, требуется контролировать тепловой режим процесса твердения. В настоящее время эти задачи успешно решаются с применением современных компьютеров и специализированных программ.

Целью проведенного исследования являлась разработка инженерного метода расчета процесса обогрева бетонных конструкций, базирующегося на использовании приближенных аналитических выражений для удельного теплового потока, поступающего от электронагревателей, размещенных на греющей опалубке, а также температур на поверхности и в толще бетона.

Для разработки данного метода были решены следующие задачи:

- теоретическое исследование процесса теплообмена в обогреваемых бетонных конструкциях;
- математическое описание процесса сложного теплопереноса в конструкциях, подвергаемых термической обработке.

С помощью полученных аналитических решений можно определять удельные затраты электрической энергии при тепловой обработке 1 м³ бетона, а также выбрать оптимальные конструктивные характеристики греющей опалубки.

При расчете температурных полей обогреваемых конструкций приняты следующие допущения:

- 1) Температурное поле в конструкции опалубочного щита принимаем одномерное в направлении оси X.
- 2) Температурное поле в исследуемой конструкции является двухмерным.
- 3) Величина тепловыделений в бетоне зависит от времени и температуры.
- 4) Градиент температур по толщине утеплителя принимаем постоянным, поэтому теплопотери определяем приближенно.
- 5) Из-за малости теплоемкости утеплителя и опалубочного щита данной величиной пренебрегаем.

Фрагмент применяемой греющей опалубки изображен на рис.1.

Учитывая вышеизложенные допущения, процесс теплообмена можно описать системой дифференциальных уравнений:

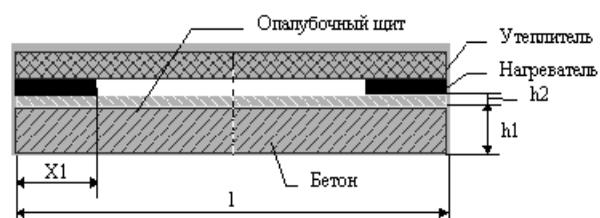


Рис. 1. Фрагмент греющей опалубки

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a_1(t) \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) + \frac{Q}{c \cdot \rho} \cdot \frac{dQ_3}{dt}; \quad (1)$$

$0 \leq x \leq l; 0 \leq y \leq h_1; t > 0$

$$\lambda_2 \cdot h_2 \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q(x, t) - q_1(x, t) - q_2(x, t) = 0; \quad (2)$$

$0 \leq x \leq l; t > 0$

$$q_1(x, t) = -\lambda_1(t) \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=h_1}; \quad (3)$$

$$q_2(x, t) = k(T - T_f); \quad (4)$$

$$q(x, t) = \begin{cases} q(t); & 0 \leq x \leq x_1; \quad x_2 \leq x; \\ 0; & x_1 \leq x \leq x_2; \end{cases} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0; \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0; \quad (6)$$

$$\theta(x, y, 0) = \theta_0(x, y); \quad (7)$$

$$\theta(x, h_1, t) = T(x, t); \quad (8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0; \quad (9)$$

где $\theta = \theta(x, y, t)$; $T(x, t)$ – температура бетона и рассматриваемой опалубки соответственно, °С; $\theta_0(x, y)$; $T_0(x)$ – начальная температура бетона и опалубки соответственно, °С; $\alpha_1(t)$ – коэффициент температуропроводности бетона, м²/ч; $\lambda_1(t)$ – коэффициент теплопроводности бетона, Вт/м·°С; Q – масса цемента в 1м³ бетонной смеси, кг/м³; Q_3 – количество теплоты, выделяемое при гидратации цемента, кДж/кг; $q(x, t)$ – удельный поток теплоты, выделяемый электронагревателями, Вт/м²; $q_1(x, t)$ – удельный тепловой поток, отдаваемый поверхностью бетона, Вт/м²; $q_2(x, t)$ – удельный тепловой поток, отдаваемый поверхностью изоляции, Вт/м²; $2h_1, h_2$ – толщины рассматриваемой бетонной конструкции и греющей опалубки соответственно, м; λ_2 – коэффициент теплопроводности материала опалубки, Вт/(м·°С); l – шаг между нагревателями, м; $2x_1$ – ширина нагревателя, м; k – коэффициент теплопередачи, определяемый по формуле

$$k = \left(\frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}} + \frac{1}{\alpha} \right)^{-1}, \text{ Вт/(м}^2\text{·°С)}, \quad (10)$$

где $\delta_{из}$ – толщина теплоизоляции, м; $\lambda_{из}$ – коэффициенты теплопроводности тепловой изоляции, Вт/(м·°С); α – коэффициент теплоотдачи с внешней поверхности теплоизоляции, Вт/(м²·°С).

Теплота, выделяющаяся при гидратации цемента, может быть представлена как произведение функции экзотермии от времени на температуру бетонной смеси

$$Q_3 = f(t)\theta, \quad (11)$$

где $f(t)$ – функция, зависящая от условий рассматриваемого процесса.

Тогда уравнение (1) примет вид

$$F(t) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \varphi(t)\theta, \quad (12)$$

$$\text{где } F(t) = \frac{1 - \frac{Q}{c\rho} f(t)}{a_1(t)}; \quad \varphi(t) = \frac{Q \cdot f'(t)}{c \cdot \rho \cdot a_1(t)}.$$

Введем новую переменную τ и новую функцию $\bar{\theta}$. Тогда уравнение (12) приведем к уравнению с новыми постоянными коэффициентами и запишем в следующем виде:

$$\tau = \int_0^t \frac{d\alpha}{F(\alpha)}; \quad \theta = \bar{\theta} \exp \left[\int_0^\tau \varphi(\alpha) d\alpha \right]. \quad (13)$$

Если функция $\tau(t)$ монотонна, то существует обратная функция

$$t = t(\tau); \quad t(0) = 0; \quad \alpha_1(t) = \alpha_1(\tau); \quad \varphi(t) = \varphi(\tau). \quad (14)$$

Следовательно, вместо (1) – (9) получим:

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial y^2}; \quad (15)$$

$$\lambda_2 h_2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q(x, \tau) - q_1(x, \tau) - q_2(x, \tau) = 0; \quad (16)$$

$$q_1(x, \tau) = -\lambda_1 \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} \Big|_{y=h_1}; \quad (17)$$

$$\bar{\theta}(x, h_1, \tau) \exp \left[\int_0^\tau \varphi(\alpha) d\alpha \right] = T(x, \tau). \quad (18)$$

Приведем уравнения (15), (16) к эквивалентным уравнениям, используя функцию Грина. Запишем в интегральном виде вторую краевую задачу:

$$\bar{\theta}(x, y, \tau) = \int_0^{\tau} d\alpha \int_0^l q_1(\xi, \alpha) G_1(x, \xi, y, h_1, \tau - \alpha) d\xi + F_1(x, y, \tau). \quad (19)$$

Примем, что $y = h_1$, тогда получим:

$$\bar{\theta}(x, h_1, \tau) = \int_0^{\tau} d\alpha \int_0^l q_1(\xi, \alpha) G_1(x, \xi, h_1, h_1, \tau - \alpha) d\xi + F_1(x, h_1, \tau); \quad (20)$$

где $F_1(x, y, \tau) = \int_0^l G_1(x, \xi, \tau) \theta_0(\xi, y) d\xi$; $G_1(x, \xi, y, \eta, \tau) = G_1(x, \xi, \tau) G_1(y, \eta, \tau)$;

$G_1(x, \xi, \tau)$, $G_1(y, \eta, \tau)$ – функции Грина второго рода для пластины и стержня.

Уравнения (15) – (18), (20) описывают систему интегро-дифференциальных уравнений относительно функции

$$\bar{\theta}(x, h_1, \tau), T(x, \tau), q(x, \tau), q_1(x, \tau).$$

Для получения приближенного решения уравнения (20) применим асимптотический метод. Тогда получим:

$$\bar{\theta}(x, h_1, \tau) = q_1(x, \tau) \Gamma(x, \tau) + F_1(x, \tau); \quad (21)$$

где $\Gamma(x, \tau) = \int_0^{\tau} d\alpha \int_0^l G_1(x, \xi, h_1, h_1, \tau - \alpha) d\xi$.

Выражение, описывающее тепловой поток $q_1(x, \tau)$, найдем из уравнения (21). Далее подставим это выражение в уравнение (16). Таким образом, получим дифференциальное уравнение относительно функции $T(x, \tau)$, решение которого можно записать с помощью функции Грина в следующем виде:

$$T(x, \tau) = \int_0^l G_2(x, \xi, \tau) R(\xi, \tau) d\xi, \quad (22)$$

$$G_2(x, \xi, \tau) = \begin{cases} \frac{ch(px)ch[p(l-\xi)]}{psh(pl)}; & 0 \leq x \leq \xi; \\ \frac{ch(p\xi)ch[p(l-x)]}{psh(pl)}; & \xi \leq x \leq l; \end{cases}$$

$$p = \sqrt{\frac{1}{\lambda_2 h_2} \left[k + \frac{f}{\Gamma(x, \tau)} \right]}; \quad f = \exp \left[- \int_0^{\tau} \phi(\alpha) d\alpha \right];$$

$$R(x, \tau) = - \frac{1}{\lambda_2 h_2} \left[\frac{F_1(x, \tau)}{\Gamma(x, \tau)} + kT_f + q(x, \tau) \right].$$

Тогда для температуры поверхности бетона приближенное решение нестационарной задачи имеет следующий вид:

при $0 \leq x \leq x_1$

$$v(x, \tau) = \frac{q}{\lambda_2 h_2 p^2 sh(pl)} \left\{ \frac{sh(pl) + ch(px)sh(px_1) - ch(px)sh[p(l-x_1)]}{sh(pl)} \right\}; \quad (23)$$

при $x_1 \leq x \leq l/2$

$$v(x, \tau) = \frac{q}{\lambda_2 h_2 p^2 sh(pl)} \left\{ \frac{ch[p(l-x)]sh(px_1) - ch(px)sh(px_1)}{sh(pl)} \right\}; \quad (24)$$

$$\partial(\tau) = \frac{a\tau}{h_1} + \frac{2h_1}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \left[1 - \exp \left(- \frac{n^2 \pi^2}{h_1^2} a\tau \right) \right], \quad (25)$$

где $v(x, \tau) = T - T_0$ – избыточная температура опалубки, равная температуре поверхности бетона, °C; T_0 – начальная температура бетона и опалубки, °C; q – удельный поток от электронагревателей, рассчитываемый по следующему выражению:

$$q(\tau) = \frac{v(0, \tau) \lambda_2 h_2 p^2 sh(pl)}{sh[p(l-x_1)] - sh(pl) - sh(px_1)}, \quad (26)$$

где $2h_1, h_2$ – толщина бетонной конструкции и опалубки соответственно; λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности бетона и материала опалубки соответственно, Вт/(м°C); a – коэффициент температуропроводности бетона, м²/ч; $2x_1$ – ширина нагревателя, м; l – шаг между нагревателями, м.

Таким образом, разработана методика на основе фундаментального решения (функция Грина). Разработанная методика может быть применена для решения широкого круга задач, связанных с процессом теплопередачи. В результате усложнение выражения функции Грина увеличит затраты на вычислительный процесс.

Полученное в формулах (24) и (25) решение позволяет определить температурные поля на поверхности бетона. Выражение (26) позволяет определить величину удельного теплового потока от электронагревателей. Однако при ручном счете затрачивается достаточно много времени. С целью автоматизации процесса выполнения теплового расчета обогрева бетонных конструкций с помощью греющих опалубок и сетчатых нагревателей разработана специализированная компьютерная программа «Тепло», написанная на Borland Delphi 7.

Алгоритм данной программы состоит из следующих этапов:

- ввод исходных данных, которые включают теплофизические характеристики материалов опалубки, бетонной смеси и утеплителя, а также геометрические размеры применяемой опалубки и ограждающей конструкции;
- задание графика термообработки монолитного бетона или керамзитобетона;
- определение закона регулирования мощности нагревателей с учетом тепловыделений при гидратации цемента;
- расчет температурных полей на поверхности бетона.

Расчет греющей опалубки выполняется в следующей последовательности. Для заданной конструкции наружной стены определяется требуемая толщина слоя стены из монолитного керамзитобетона. Далее выполняется расчет электрических параметров сетчатых нагревателей. Вначале производится выбор конструкции греющего щита или греющего покрывала. Основными элементами греющих щитов или покрывал является палуба или основа сетчатых электронагревателей, а также электро- и теплоизоляция. Сетчатый нагреватель представляет собой тканую металлическую сетку (стальную или латунную), состоящую из продольных нитей (основы) и поперечных (уток). Металлическая сетка в щитах и покрывалах используется в виде отдельных полос одинаковой ширины 10–30 см, нарезанных вдоль основы сетки, размещаемых на расстоянии 5–20 см друг от друга. Соединение полос осуществляется последовательно с помощью металлических шин (рис. 2).

Греющее покрывало состоит из нагревательного элемента, укрепленного на основе, электро- и теплоизоляционного слоя, помещенных в наружную оболочку из прочного, термостойкого, влагонепроницаемого материала. Конструкция прошивается стеклотканью с последующей отделкой отверстий для токовыводящих шин. В качестве теплоизоляции можно использовать стекловату и базальтовую минвату.

Конструирование сетчатого нагревателя заключалось в выборе материала сетки, ширины

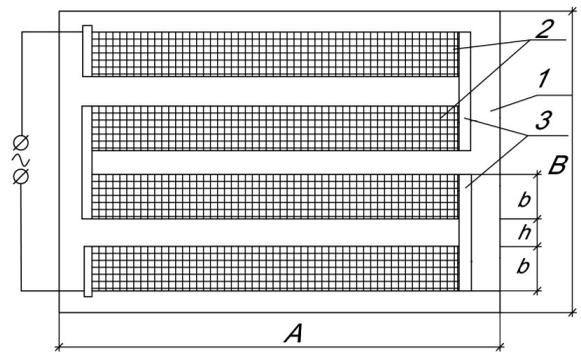


Рис. 2. Схема раскладки сетчатого электронагревателя в греющем устройстве: 1 – палуба устройства; 2 – элементы сетчатого электронагревателя; 3 – коммутационные шины

полос сетки и расстояний между ними. В качестве нагревателей применяются сетки, выпускаемые промышленностью. Самыми распространенными в настоящее время являются стальные сетки. Ширина сетки составляла 20 см.

Расчет мощности сетчатых нагревателей производился в следующей последовательности:

- определялся модуль обогреваемой поверхности бетона;
- рассчитывалось время подъема температуры;
- определялась продолжительность изотермического выдерживания бетона по рис. 3 в зависимости от его максимальной температуры, применяемого цемента и требуемой к концу тепловой обработки прочности цемента, руководствуясь исследованиями, проведенными в НИИЖБ им. А. А. Гвоздева;
- при помощи программы «Тепло» выполнялся расчет удельных тепловых потоков и температур на поверхности обогреваемой бетонной конструкции;
- определялась величина удельных энергозатрат на термообработку 1 м³ бетона;
- вычислялись энергетические параметры 1 м сетчатого нагревателя;
- определялись энергетические характеристики принятого источника питания (напряжение и сила тока).

Данная программа позволяет производить расчет температурных полей не только при постоянной мощности нагревателей, но и при ее изменении с помощью регуляторов.

По изложенной выше методике был выполнен расчет теплового режима наружных стен из керамзитобетона. При расчете были приняты следующие исходные данные:

- термообработка керамзитобетонных стен жилого дома производилась в термоактивной опалубке толщиной 0,3, 0,4, 0,5 и 0,6 м;

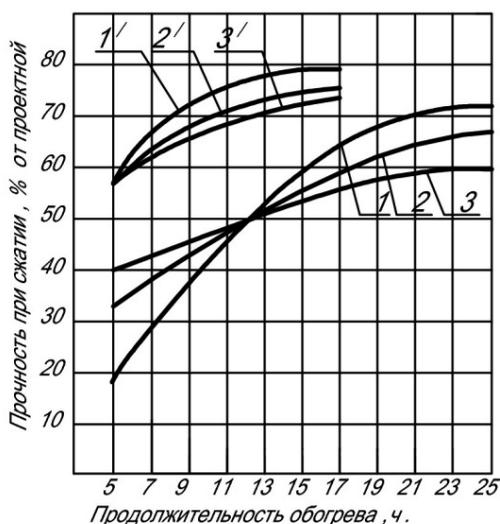


Рис. 3. Характер нарастания прочности бетона (подвижности бетонной смеси 4–6 см) на цементе марки 400 при температуре тепловой обработки 65 °С (1, 2, 3) и 85 °С (1', 2', 3'):

- 1–1' – на портландцементе;
- 2–2' – на шлакопортландцементе;
- 3–3' – на быстротвердеющем цементе

- начальная температура бетона принималась равной $T_0 = 10\text{ }^\circ\text{C}$;
- температура наружного воздуха $t_n = -28\text{ }^\circ\text{C}$;
- керамзитобетон марки М200 на портландцементе М400;
- прочность по окончании термообработки принималась равной 40 % R_{28} ;
- принят опалубочный щит с установленными сетчатыми электронагревателями из стальной сетки с шириной полос 0,2 м и длиной 2,5 м;
- электронагреватели поверху закрыты слоем минеральной ваты и металлическим листом толщиной 1 мм;
- шаг по координате x принят равным 0,01 м;
- шаг по времени принят равным 0,5 ч;
- принят двухстадийный режим обогрева: подъем температуры до $T_{\max} = 90\text{ }^\circ\text{C}$ и изотермическое выдерживание.

Расчет производился в следующей последовательности:

1. Определялась продолжительность периода подъема температуры керамзитобетона:

$$\tau_1 = \frac{T_{\max} - T_0}{W},$$

где W – скорость подъема температуры, принимаемая равной 11,4 °С/ч;

$$\tau_1 = \frac{90 - 10}{11,4} = 7\text{ ч.}$$

2. Определялась средняя температура керамзитобетона в период разогрева:

$$t_1 = \frac{T_{\max} + T_0}{2} = \frac{90 + 10}{2} = 50\text{ }^\circ\text{C}.$$

3. Устанавливался период изотермического выдерживания в зависимости от условий набора керамзитобетоном прочности 40 % R_{28} . В рассматриваемом примере $\tau_2 = 10\text{ ч}$.

4. Продолжительность остывания керамзитобетона до 0 °С определялась по допустимой скорости остывания конструкции 10 °С/ч:

$$\tau_3 = \frac{90 - 0}{10} = 9\text{ ч.}$$

5. Таким образом, режим термообработки принят 7 + 10 + 9 = 26 ч.

Перечисленные выше данные заносились в программу расчета «Тепло».

С помощью описанной программы был получен график изменения теплового потока электронагревателей во времени (рис. 4).

График изменения теплового потока в процессе термообработки керамзитобетона, представленный на рис. 4, свидетельствует о том, что через 3 ч удельный тепловой поток достигает максимального значения (123,2 – 132,5 Вт/м²), что связано с аккумуляцией тепловой энергии при твердении керамзитобетона. Далее наблюдается его снижение до значения 56 Вт/м², компенсирующее теплопотери через изолированную опалубку.

Используя данные, представленные на рис. 4, был определен удельный расход электроэнергии на термообработку 1 м³ керамзитобетона по формуле

$$q_y = \frac{2x_1 \int_0^{\tau} q(\tau) d\tau}{10^3 h_1 l}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3,$$

где x_1 – ширина нагревателя, м; h_1 – толщина бетонной конструкции, м; l – расстояние между нагревателями, м.

Результаты расчета удельного расхода электроэнергии на термообработку 1 м³ керамзитобетонной наружной стены приведены в таблице.

Результаты расчета удельного расхода электроэнергии

Толщина керамзитобетонной наружной стены, м	Удельный расход электроэнергии q_y , кВт·ч/м ³
0,3	8,63
0,4	6,72
0,5	5,50
0,6	4,61

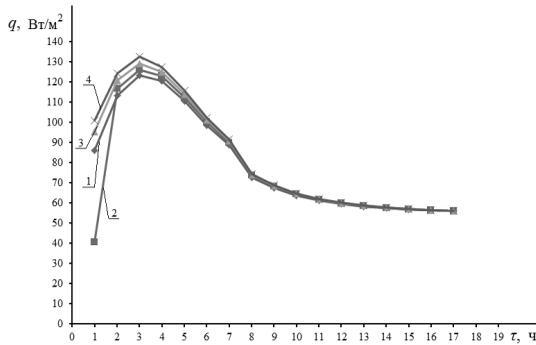


Рис. 4. График изменения теплового потока в процессе термообработки:
1 – для стены толщиной 0,3 м;
2 – для стены толщиной 0,4 м;
3 – для стены толщиной 0,5 м;
4 – для стены толщиной 0,6 м

Анализируя данные, приведенные в таблице, можно сделать вывод о том, что с увеличением толщины керамзитобетонной наружной стены удельный расход электроэнергии на термообработку 1 м³ керамзитобетона уменьшается за счет теплоты гидратации цемента.

Также были получены температурные поля на поверхности наружной стены из керамзитобетона (рис. 5).

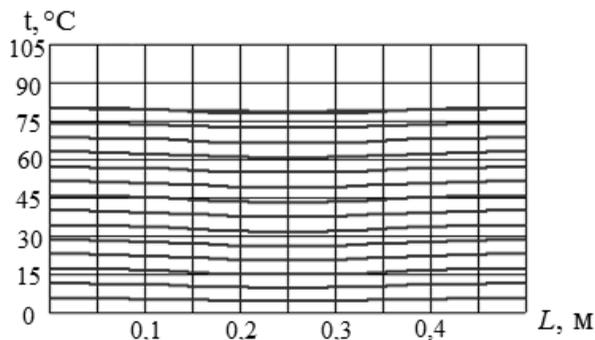


Рис. 5. Распределение избыточных температур на поверхности наружной стены из керамзитобетона

Из рис. 5 видно, что максимальный перепад температур на поверхности обогреваемой наружной стены составляет лишь 2 °С, что исключает возможность образования трещин из-за термических напряжений.

Возможность регулирования мощности электронагревателей позволяет сократить затраты энергии и обеспечить равномерное температурное поле в обогреваемой конструкции на протяжении всего процесса термообработки. В этом случае происходит уменьшение температурных градиентов, в результате чего

осуществляется равномерный прогрев бетона и повышается его качество.

Полученное с помощью функции Грина аналитическое решение позволяет определить температуру на поверхности бетона. Практическое применение полученной зависимости при ручном счете весьма затруднено и требует много времени. Поэтому наиболее обоснованным является применение машинного счета и разработка соответствующих компьютерных программ.

Разработанная программа «Тепло» позволяет успешно решать эту задачу. Результат расчета, представленный на рис. 3, показывает, что заданная прочность конструкции достигается к концу остывания. Такой режим термообработки рекомендуется применять для конструкций с $M_{п} = 3-7$.

Приведенное выше аналитическое решение для определения температуры на поверхности обогреваемой конструкции дает возможность осуществления эффективного контроля и управления процессом термообработки бетона. При этом для конкретных условий бетонирования задается управляющая функция.

Выводы. В результате решения задачи теплопереноса с применением функции Грина 2-го рода для бетонных конструкций и греющих опалубок получена аналитическая зависимость для определения температуры на поверхности бетона.

На основе полученного решения разработана программа расчета температурных полей на поверхности бетонной конструкции при его термообработке в греющих опалубках. Данная программа позволяет производить расчет температурных полей не только при постоянной мощности нагревателей, но и при ее изменении с помощью регуляторов.

Данные теплового расчета греющей опалубки позволили получить закон регулирования мощности сетчатых нагревателей при максимальной температуре нагрева, равной 80 °С. Продолжительность изотермического выдерживания при этом составила 8 ч, а время остывания – 9 ч. Температурные градиенты при таком регулировании мощности уменьшаются, что обеспечивает более равномерный прогрев бетона и повышает его качество. Кроме того, сокращаются затраты энергии и обеспечивается равномерное температурное поле в обогреваемой конструкции на всем протяжении термообработки.

Результаты программного расчета показали хорошую сходимость с результатами теоретических и экспериментальных исследований других авторов. Полученная методика и разработанная на ее основе программа могут быть

рекомендованы при проектировании обогреваемых при твердении бетонных конструкций, а также при разработке системы автоматического управления процессом обогрева.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аханов В.С. Электротермия в технологии бетона. Махачкала: Дагестанское книжное издательство, 1971. 252 с.

2. Сокова С.Д. Зимнее бетонирование монолитных конструкций. М., 2013. 56 с.

3. Зиневич Л.В., Галумян А.В. Скоростное монолитное домостроение: условия достижения высоких темпов строительства и качества бетона получаемых конструкций // Бетон и железобетон. 2009. №5. С. 23–26.

4. Мавлюбердинов А. Р., Сунгатуллина Г. А. Изучение процессов твердения бетонной смеси в термоактивной опалубке // Вестник технологического университета. 2015. Т.18, №7. С. 181–183.

5. Миронов С.А. Теория и методы зимнего бетонирования. 3-е изд. М.: Стройиздат, 1975. 700 с.

6. Осипов А.М. Бетонирование при низких температурах // Инженерный вестник Дона. 2012. №4 (ч 2). Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1306>.

7. Виноградова Е.В. Проблемы управления качеством бетонных работ // Инженерный вестник Дона. 2012. №3. Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/1001>.

8. Усов Б.А. Бетонирование монолитных конструкций из литых смесей в зимних условиях // Системные технологии. 2016. №4. С. 5–17.

9. Costantino Mennea, Jaime Mata-Falcón, Freek P. Bos, Gieljan Vantuyghem, Liberato Ferrara, Domenico Asprone, Theo Salet, Walter Kaufmann, Opportunities and challenges for structural engineering of digitally fabricated concrete, Cement and Concrete Research. Vol. 133. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106079>.

10. Krylov B. A. Temperature Influence on Concreting Structures and Its Hardenings // International Symposium in Japan E&FN Spook. 1995. Vol. 2. Pp. 917–925.

11. Крылов Б. А. и др. Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях. М., 2005. 275 с.

12. Долодов М. Ю., Долодов Ю. И. Программа для расчета обогрева бетона при зимнем бетонировании // Строительный вестник Российской инженерной академии. 2006. Вып. 7. С. 52–56.

13. Anja Estensen Klausen, Terje Kanstad and Øyvind Bjøntegaard, Hardening Concrete Exposed to Realistic Curing Temperature Regimes and Restraint Conditions: Advanced Testing and Design Methodology, Advances in Materials Science and Engineering. Vol. 2019. 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/9071034>.

14. Vishwanath P. Singh1, Huseyin O. Tekin, Nagappa M. Badiger1, Tubga Manici, Elif E. Altunsoy, Effect of Heat Treatment on Radiation Shielding Properties of Concretes, Journal of Radiation Protection and Research. Vol. 43. Issue 1. 2018. Pp 20-28. <https://doi.org/10.14407/jrpr.2018.43.1.20>.

15. Теличенко В.И. Технология строительных процессов. М., 2005. 392 с.

16. Имайкин Д. Г., Ибрагимов Р. А., Мартынов М. М., Сунгатуллина А. Р. Технология зимнего бетонирования строительных конструкций с применением термоактивной опалубки // Вестник КГТУ. 2014. №24. С. 96–99.

17. Гныря А.И., Коробков С.В. Технология бетонных работ в зимних условиях. Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2011. 412 с.

18. Chi-Hyung Ahn, Jinbok Lee, Dong-Jin Kim, Hyun-Oh Shin, Development of a Novel Concrete Curing Method Using Induction Heating System, Sci. 2021, 11(1), <https://doi.org/10.3390/app11010236>, <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/1/236/htm>.

19. Galitskov S.Y., Galitskov K.S., Bolkhovetsky A.S., Modeling the process of autoclaving treatment of cellular concrete products as control object // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific Conference Interstroyemeh. ISM 2019. 2019.

20. Perfilov V.A., Gabova V.V., Tomareva I.A. Impact of superplasticizing agents on physical and mechanical properties of cellular concrete // Materials Science Forum. 2020. Vol. 974. Pp. 181–186.

21. Kuchin V.N., Shilonosova N.V. Features of peripheral heating of monolithic reinforced concrete structures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018.

REFERENCES

1. Akhanov V.S. *Elektrotermiya v tekhnologii betona* [Electrothermia in concrete technology]. Makhachkala, Dagestanskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1971. 252 p.

2. Sokova S.D. *Zimnee betonirovanie monolitnykh konstruktсий* [Winter concreting of monolithic structures]. Moscow, 2013. 56 p.

3. Zinevich L. V., Galumyan A. V. High-speed monolithic housing construction: conditions for achieving high rates of construction and quality of concrete of the resulting structures. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 2009, no. 5, pp. 23-26. (in Russian)

4. Mavlyuberdinov A. R., Sungatullina G. A. Studying the processes of concrete mixture hardening in thermoactive formwork. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2015, vol.18, no. 7, pp. 181-183. (in Russian)

5. Mironov S.A. *Teoriya i metody zimnego betonirovaniya* [Theory and methods of winter concreting]. 3rd ed. Moscow, Stroyizdat, 1975. 700 p.

6. Osipov A.M. Concreting at low temperatures. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2012, no. 4 (Part 2). (in Russian)

7. Vinogradova E.V. Problems of quality management of concrete works // *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2012, no 3. (in Russian)

8. Usov B.A. Concreting of monolithic structures from cast mixtures in winter conditions. *Sistemnyye tekhnologii* [System technologies], 2016, no. 4, pp. 5-17. (in Russian)

9. Costantino Mennaa, Jaime Mata-Falcón, Freek P. Bos, Gieljan Vantyghem, Liberato Ferrara, Domenico Asprone, Theo Salet, Walter Kaufmann, Opportunities and challenges for structural engineering of digitally fabricated concrete. *Cement and Concrete Research*, 2020, vol. 133.
10. Krylov V. A. Temperature Influence on Concreting Structures and Its Hardenings. International Symposium in Japan E&FN Spook, 1995, vol. 2, pp. 917-925.
11. Krylov B. A. et al. *Rukovodstvo po progrevu betona v monolitnykh konstruksiyakh* [Manual for heating concrete in monolithic structures]. Moscow, 2005. 275 p.
12. Doladov M. Yu., Doladov Yu. I. Program for calculating concrete heating during winter concreting. *Stroitel'nyy vestnik Rossiyskoy inzhenernoy akademii* [Construction Bulletin of the Russian Engineering Academy], 2006, vol. 7, pp. 52-56. (in Russian)
13. Anja Estensen Klausen, Terje Kanstad and Øyvind Bjøntegaard. Hardening Concrete Exposed to Realistic Curing Temperature Regimes and Restraint Conditions: Advanced Testing and Design Methodology. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019.
14. Vishwanath P. Singh¹, Huseyin O. Tekin, Nagappa M. Badiger¹, Tubga Manici, Elif E. Altunsoy, Effect of Heat Treatment on Radiation Shielding Properties of Concretes. *Journal of Radiation Protection and Research*, 2018, vol. 43, no. 1, pp. 20-28.
15. Telichenko V.I. *Tekhnologiya stroitel'nykh protsessov* [Technology of construction processes]. Moscow, 2005. 392 p.
16. Imaykin D. G., Ibragimov R. A., Martynov M. M., Sungatullina A. R. Technology of winter concreting of building structures using thermoactive formwork. *Vestnik KGTU* [Bulletin of KSTU], 2014, no. 24, pp.96-99. (in Russian)
17. Gnyrya A.I., Korobkov S.V. *Tekhnologiya betonnykh rabot v zimnikh usloviyakh* [Technology of concrete works in winter conditions]. Tomsk: Publishing House of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, 2011. 412 p.
18. Chi-Hyung Ahn, Jinbok Lee, Dong-Jin Kim, Hyun-Oh Shin, Development of a Novel Concrete Curing Method Using Induction Heating System. *Science*, 2021, no. 11(1).
19. Galitskov S.Y., Galitskov K.S., Bolkhovetsky A.S. Modeling the process of autoclaving treatment of cellular concrete products as control object. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific Conference Interstroyemeh. ISM 2019, 2019. (in Russian)
20. Perfilov V.A., Gabova V.V., Tomareva I.A. Impact of superplasticizing agents on physical and mechanical properties of cellular concrete. *Materials Science Forum*, 2020, vol. 974, pp. 181-186.
21. Kuchin V.N., Shilonosova N.V. Features of peripheral heating of monolithic reinforced concrete structures. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018.

Об авторах:

ВЫТЧИКОВ Юрий Серафимович

кандидат технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: git.2008@mail.ru

VYTCHIKOV Yuri S.

PhD in Engineering Science, Professor of the Heat and Gas Supply and Ventilation Chair Samara State Technical University Academy of Civil Engineering and Architecture 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: git.2008@mail.ru

НЕДОСЕКО Игорь Вадимович

доктор технических наук, профессор кафедры строительных конструкций Уфимский государственный нефтяной технический университет Архитектурно-строительный институт 450080, Россия, г. Уфа, ул. Менделеева, 195 E-mail: nedoseko1964@mail.ru

NEDOSEKO Igor' V.

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Building Structures Chair Ufa State Petroleum Technical University Architectural and Construction Institute 443100, Russia, Ufa, Mendeleev str., 195 E-mail: nedoseko1964@mail.ru

САПАРЁВ Михаил Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: msx072007@yandex.ru

SAPAREV Mikhail E.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Heat and Gas Supply and Ventilation Chair Samara State Technical University Academy of Civil Engineering and Architecture 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: msx072007@yandex.ru

ЧУЛКОВ Александр Анатольевич

инженер Центра энергосбережения в строительстве Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: ch_aleks01@mail.ru

ChULKOV Aleksandr A.

Engineer of the Center Energy Saving in Construction Samara State Technical University Academy of Civil Engineering and Architecture 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: ch_aleks01@mail.ru

Для цитирования: *Вытчиков Ю.С., Недосеко И.В., Сапарёв М.Е., Чулков А.А. Приближенный аналитический метод расчета процесса обогрева бетонных конструкций в греющих опалубках // Градостроительство и архитектура. 2022. Т. 12, № 4. С. 75–84. DOI: 10.17673/Vestnik.2022.04.10.*

For citation: *Vytchikov Yu.S., Nedoseko I.V., Saparev M.Ye., Chulkov A.A. Approximate Analytical Method for Calculating the Heating Process of Concrete Structures in Heating Formwork. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2022, vol. 12, no. 4, pp. 75–84. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2022.04.10.*