

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОСТЫВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ

Б. М. Красновский

1. Общие положения

Конечные свойства бетона, выдерживаемого в зимних условиях по методу традиционного или «горячего» термоса, определяются сформированной в процессе его твердения структурой [1–3]. На формирование структуры самое непосредственное, а иногда и определяющее воздействие оказывает температурный фактор, под влиянием которого происходит как набор бетоном прочности, так и формирование термонапряженного состояния [4–5]. В условиях неравномерного температурного поля прочность бетона в различных частях конструкции может оказаться неодинаковой, так как температура в центре сечения конструкции может на несколько десятков градусов превышать температуру поверхностных слоев. Кроме того, могут возникнуть растягивающие напряжения, превышающие возможность работы бетона на растяжение [6–8].

Поэтому знание действительной картины температурного поля по сечению конструкции в различное время, закономерностей его изменения, его динамики необходимы для разработки технологических приемов, обеспечивающих требуемое качество как бетона, так и возводимых конструкций.

2. Расчет температуры и продолжительности остывания конструкций типа «неограниченная пластина»

Для конструкции типа «неограниченная пластина», т. е. пластины, два измерения которой Z и Y значительно превышают третье – X (рис., A) и заданной своими размерами – толщиной $2R$, характеристиками бетона (вид цемента, его марка и расход C , коэффициенты тепло- и температуропроводности (λ и a), начальная температура T_H) и утеплением, характеризующимся α -коэффициентом теплообмена и остывающей при температуре наружного воздуха

T_{HB} , температура в точке X и в момент времени τ после начала остывания $T_{x,\tau}$ определяется по следующей формуле:

$$T_{x,\tau} - T_{HB} = (T_H - T_{HB}) A \cos \mu \frac{x}{R} \exp(-m\tau), \quad (1)$$

или, если обозначить избыточные температуры:

$$T_{x,\tau} - T_{HB} = \theta_{x,\tau} \text{ и } T_H - T_{HB} = \theta_H; \quad (2)$$

$$\theta_{x,\tau} = \theta_H A \cos \mu \frac{x}{R} \exp(-m\tau). \quad (3)$$

Избыточная температура поверхности $\theta_{R,\tau}$ ($x=R$) и центра $\theta_{0,\tau}$ ($x=0$) определяется соответственно:

$$\theta_{R,\tau} = \theta_H A \cos \mu \exp(-m\tau); \quad (4)$$

$$\theta_{0,\tau} = \theta_H A \exp(-m\tau). \quad (5)$$

В формулах (1)–(5) параметр μ определяется так:

$$\mu^2 = 2,5(1 + 2,25Bi^{-1})^{-1}, \quad (6)$$

где Bi – критерий Био, $Bi = \alpha R \lambda^{-1}$, где R – половина толщины конструкции, λ – коэффициент теплопроводности бетона, Вт/м °С; A – параметр, определяемый по формуле:

$$A = \frac{2 \sin \mu}{\mu + \sin \mu \cos \mu}. \quad (7)$$

Определение продолжительности остывания производится в следующей последовательности:

1. Устанавливается условная избыточная начальная (т. е. в момент времени $\tau = 0$) температура поверхности θ_{yHP} и центра θ_{yHC} :

$$\theta_{yHP} = K_\tau \theta_H A \cos \mu; \quad (8)$$

$$\theta_{yHC} = K_\tau \theta_H A, \quad (9)$$

где K_{τ} – коэффициент экзотермии, определяемый выражением:

$$K_{\tau} = 1,33 \exp\left(-K_{\Pi} \frac{(\alpha \cdot M_{\Pi})^2}{M_{\Pi} \cdot \Pi}\right), \quad (10)$$

где K_{Π} – коэффициент, учитывающий вид цемента: для бетонов на портландцементе $K_{\Pi} = 0,72$, на шлакопортландцементе $K_{\Pi} = 0,98$; M_{Π} – модуль поверхности конструкций, м^{-1} ; M_{Π} – марка цемента; Π – расход цемента, $\text{кг}/\text{м}^3$.

2. Исходя из известных условий теплообмена, заданных коэффициентом α , и найденного выше значения μ , определяется темп остывания m :

$$m = \mu^2 \frac{a}{R^2}, \text{ч}^{-1}, \quad (11)$$

где a – коэффициент температуропроводности бетона, $\text{м}^2/\text{ч}$.

3. Продолжительность остывания поверхности $\tau_{\text{охл.н}}$ от условной избыточной начальной температуры поверхности $\theta_{\text{УНП}}$ до заданной конечной θ_K определяется по формуле:

$$\tau_{\text{охл.н}} = \frac{1}{m} \ln \frac{\theta_{\text{УНП}}}{\theta_K} = \frac{\ln \theta_{\text{УНП}} - \ln \theta_K}{m}. \quad (12)$$

Продолжительность остывания центра $\tau_{\text{охл.ц}}$ от условной избыточной начальной температуры центра $\theta_{\text{УНЦ}}$ до заданной конечной θ_K определяется по формуле:

$$\tau_{\text{охл.ц}} = \frac{1}{m} \ln \frac{\theta_{\text{УНЦ}}}{\theta_K} = \frac{\ln \theta_{\text{УНЦ}} - \ln \theta_K}{m}. \quad (13)$$

4. Средняя избыточная температура поверхности за время остывания $\theta_{\text{п.ср}}$ составит:

$$\theta_{\text{п.ср}} = \frac{\theta_{\text{УНП}}}{m \cdot \tau_{\text{охл.н}}} [1 - \exp(-m \cdot \tau_{\text{охл.н}})]. \quad (14)$$

Средняя избыточная температура центра за время остывания $\theta_{\text{ц.ср}}$ составит:

$$\theta_{\text{ц.ср}} = \frac{\theta_{\text{УНЦ}}}{m \cdot \tau_{\text{охл.ц}}} [1 - \exp(-m \tau_{\text{охл.ц}})]. \quad (15)$$

5. По найденной продолжительности остывания $\tau_{\text{охл.н}}$ и $\tau_{\text{охл.ц}}$ и средней за период остывания температуре поверхности $T_{\text{п.ср}}$ и средней за период остывания температуре центра $T_{\text{ц.ср}}$:

$$T_{\text{п.ср}} = \theta_{\text{п.ср}} + T_{\text{НВ}}, \quad (16)$$

$$T_{\text{ц.ср}} = \theta_{\text{ц.ср}} + T_{\text{НВ}} \quad (17)$$

по соответствующим графикам определяется относительная прочность бетона в поверхностных и центральных зонах, набранная им к моменту достижения температуры T_K .

Пример расчета остывания конструкции типа «неограниченная пластина»

Задача. Требуется рассчитать продолжительность остывания до $T_K = 0$ °С и набранную к этому моменту относительную прочность бетона в поверхностных и центральных слоях протяженной стенки толщиной $2R = 0,4$ м при следующих условиях: температура бетона, уложенного в конструкцию $T_{\text{н}} = 80$ °С; температура наружного воздуха $T_{\text{нв}} = -10$ °С; бетон М300 приготовлен на портландцементе марки 400 при расходе 300 $\text{кг}/\text{м}^3$; коэффициент теплопроводности бетона $\lambda = 1,3$ $\text{Вт}/\text{м}^\circ\text{С}$, температуропроводность $a = 22 \cdot 10^{-4}$ $\text{м}^2/\text{ч}$; коэффициент теплообмена ограждения $\alpha = 5$ $\text{Вт}/\text{м}^2$ °С.

Решение.

1. Избыточные температуры по (2):

$$\theta_{\text{н}} = T_{\text{н}} - T_{\text{нв}} = 80 - (-10) = 90$$
 °С;

$$\theta_K = T_K - T_{\text{нв}} = 0 - (-10) = 10$$
 °С.

2. Модуль поверхности конструкции M_{Π} :

$$M_{\Pi} = \frac{2R^2}{0,4\text{м}^3} = 5,0\text{м}^{-1}.$$

3. Число Bi для заданных условий (расшифровка к (6)):

$$Bi = \alpha R \lambda^{-1} = 5 \cdot 0,2 \cdot 1,3^{-1} = 0,77.$$

4. Параметр μ в соответствии с (6):

$$\mu^2 = 2,5(1 + 2,25Bi^{-1}) = 2,5(1 + 2,25 \cdot 0,77^{-1}) = 0,63;$$

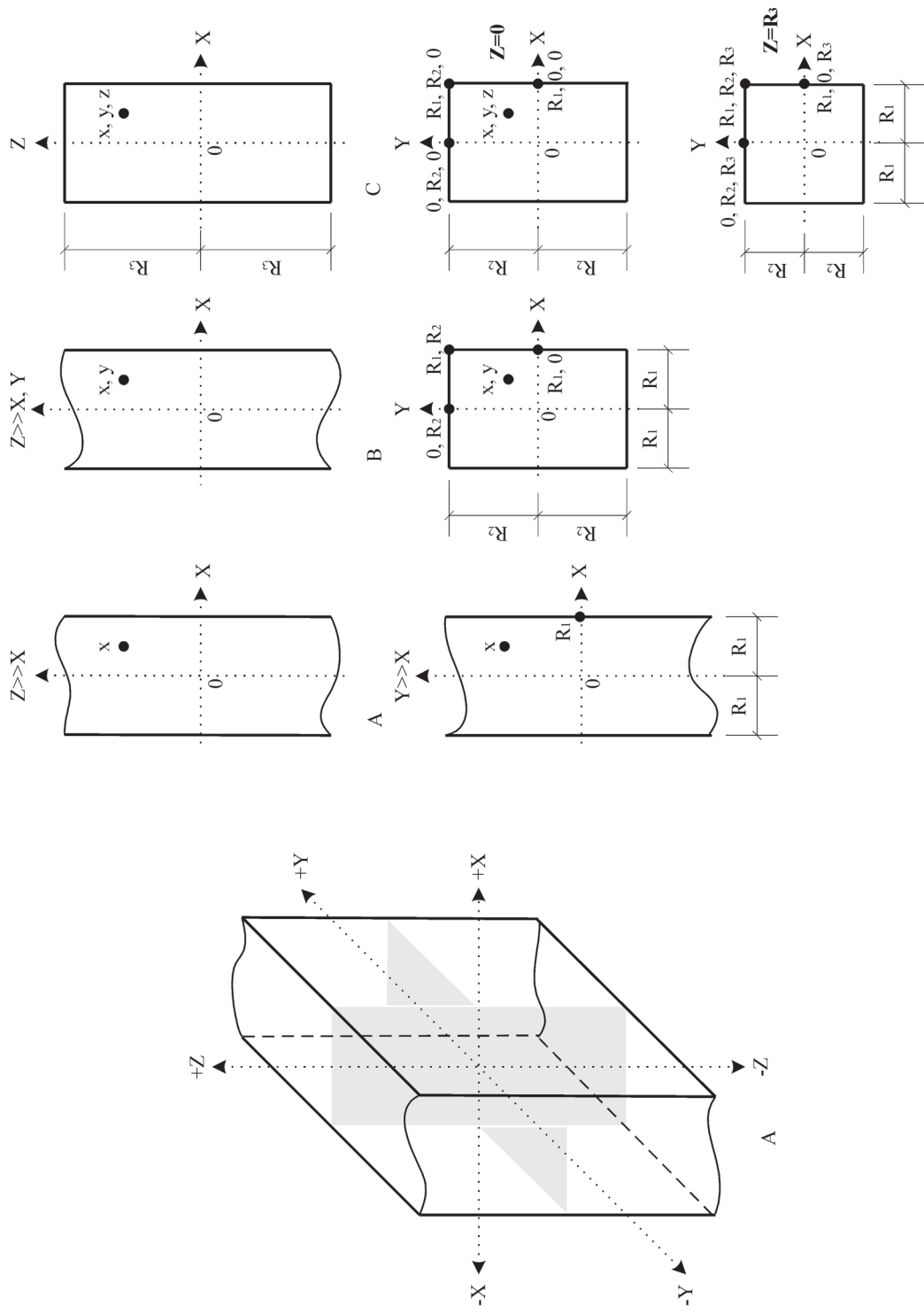
$$\mu = 0,79.$$

5. Параметр A в соответствии с (7):

$$A = \frac{2 \sin \mu}{\mu + \sin \mu \cos \mu} = \frac{2 \sin 0,79}{0,79 + \sin 0,79 \cdot \cos 0,79} = 1,08.$$

6. Коэффициент экзотермии K_{τ} в соответствии с (10):

$$K_{\tau} = 1,33 \exp\left[-0,72 \frac{(\alpha \cdot M_{\Pi})^2}{\Pi \cdot M_{\Pi}}\right] = 1,33 \exp\left[-0,72 \frac{(5 \cdot 5,0)^2}{300 \cdot 400}\right] = 1,32.$$



Типы конструкций: А – неограниченная пластина; В – протяженный брус; С – параллелепипед. Верхний ряд А, В и С – сечения на уровне $y = 0$; нижний ряд – на уровне $z = 0$ и $z = R_3$

Types of structures: А – Unlimited plate; В – Extended bar; С – Parallelepiped. The top number А, В and С – Sections at a level $y = 0$; The bottom number – at a level $z = 0$ and $z = R_3$

7. Избыточная условная начальная температура поверхности $\theta_{УНП}$ по (8):

$$\theta_{УНП} = K_{\tau} \theta_H A \cos \mu = 1,32 \cdot 90 \cdot 1,08 \cdot \cos 0,79 = 90,3 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

8. Темп остывания m определяется по (11):

$$m = \mu^2 \frac{a}{R^2} = 0,63 \frac{22 \cdot 10^{-4}}{0,2^2} = 0,0346 \text{ ч}^{-1}.$$

9. Продолжительность остывания поверхности $\tau_{охл.п}$ до температуры θ_K определяется по (12):

$$\tau_{охл.п} = \frac{\ln \theta_{УНП} - \ln \theta_K}{m} = \frac{\ln 90,3 - \ln 10}{0,0346} = 63,6 \text{ ч}.$$

Продолжительность остывания центра $\tau_{охл.ц}$ до температуры θ_K определяется по (13):

$$\tau_{охл.ц} = \frac{\ln \theta_{УНЦ} - \ln \theta_K}{m} = \frac{\ln 128,3 - \ln 10}{0,0346} = 73,8 \text{ ч}.$$

10. Средняя температура поверхности $T_{п.ср}$ за время остывания определяется по (14) и (16):

$$\theta_{п.ср} = \frac{\theta_{УНП}}{m \cdot \tau_{охл.п}} [1 - \exp(-m \cdot \tau_{охл.п})] = \frac{90,3}{0,0346 \cdot 63,6} [1 - \exp(-0,0346 \cdot 63,6)] = 36,5 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

$$T_{п.ср} = \theta_{п.ср} + T_{НВ} = 36,5 + (-10) = 26,5 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Средняя температура центра $T_{ср.ц}$ за время остывания определяется по (15) и (17):

$$\theta_{ср.ц} = \frac{\theta_{УНЦ}}{m \cdot \tau_{охл.ц}} [1 - \exp(-m \cdot \tau_{охл.ц})] = \frac{128,3}{0,0346 \cdot 73,8} [1 - \exp(-0,0346 \cdot 73,8)] = 46,3 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

$$T_{ср.ц} = \theta_{ср.ц} + T_{НВ} = 46,3 + (-10) = 36,3 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

11. Согласно известным графикам бетон М300 при температуре 26,5 $^{\circ}$ С за время 63,6 ч приобретает относительную прочность порядка 55 % (прочность бетона поверхностных зон); при температуре 36,3 $^{\circ}$ С за время 73,8 ч – около 75% (прочность центральных зон).

12. Если из каких-либо технологических соображений требуется определить температуру поверхности и центра, например, на 24-м часу после начала остывания, то с использованием (12)–(13) и (16)–(17) находят:

$$\theta_{п,\tau=24} = 90,3 \exp(-0,0346 \cdot 24) = 39,4 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$T_{п,\tau=24} = 39,4 + (-10) = 29,4 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$\theta_{ц,\tau=24} = 128,3 \exp(-0,0346 \cdot 24) = 55,9 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$T_{ц,\tau=24} = 55,9 + (-10) = 45,9 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

3. Расчет температуры и продолжительности остывания конструкций типа «протяженного прямоугольного бруса»

Под типом «протяженного прямоугольного бруса» понимаются конструкции, одно из измерений которых Z (высота, длина) значительно больше каждого из двух других измерений X и Y (рис., В), а X и Y имеют один порядок.

С геометрической точки зрения протяженный прямоугольный брус сечением $2R_1 \cdot 2R_2$ рассматривается как результат пересечения под прямым углом двух неограниченных пластин: пластины толщиной $2R_1$ и пластины толщиной $2R_2$.

С теплофизической точки зрения температурное поле протяженного бруса определяется как произведение температурных коэффициентов (температурный коэффициент = $A \cos \mu \frac{x}{R} \exp(-m\tau)$) составляющих этот брус пластин соответственно для точки с заданными координатами.

Так как условия теплообмена, определяемые $Bi = \alpha R \lambda^{-1}$, у соседних граней будут различными (если $R_1 \neq R_2$), различной будет и продолжительность остывания каждой грани до заданной температуры.

Для конструкции типа «протяженного прямоугольного бруса», заданной своими размерами сечения $2R_1 \cdot 2R_2$, характеристиками бетона (вид цемента, его марка и расход Ц, коэффициенты тепло- и температуропроводности (λ и a), начальная температура T_H) и утеплением, характеризующимся α - коэффициентом теплообмена и остывающей при температуре наружного воздуха $T_{НВ}$, температура в точке X, Y и в момент времени τ после начала остывания $T_{x,y,\tau}$ определяется по следующей формуле:

$$T_{x,y,\tau} - T_{НВ} = (T_H - T_{НВ}) A_{R_1} A_{R_2} \cos \mu_{R_1} \frac{x}{R_1} \cos \mu_{R_2} \frac{y}{R_2} \exp(-m_0 a \tau) \quad (18)$$

или, если обозначить избыточные температуры:

$$T_{x,y,\tau} - T_{HB} = \theta_{x,y,\tau}; \quad T_H - T_{HB} = \theta_H; \quad (19)$$

$$\theta_{x,y,\tau} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} \cos \mu_{R_1} \frac{x}{R_1} \cos \mu_{R_2} \frac{y}{R_2} \exp(-m_0 a \tau), \quad (20)$$

где параметры A_{R_i} и μ_{R_i} принимаются каждый для «своей» пластины.

Избыточная температура поверхности R_1 ($x = R_1$, $y = 0$) – $\theta_{R_1,\tau}$, избыточная температура поверхности R_2 ($x = 0$, $y = R_2$) – $\theta_{R_2,\tau}$, избыточная температура угла ($x = R_1$, $y = R_2$) – $\theta_{R_1,R_2,\tau}$ и избыточная температура центра сечения ($x = 0$, $y = 0$) – $\theta_{цт}$ определяются с учетом (20) соответственно:

$$\theta_{R_1,\tau} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} \cos \mu_{R_1} \exp(-m_0 a \tau), \quad (21)$$

$$\theta_{R_2,\tau} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} \cos \mu_{R_2} \exp(-m_0 a \tau), \quad (22)$$

$$\theta_{R_1,R_2,\tau} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} \cos \mu_{R_1} \cos \mu_{R_2} \exp(-m_0 a \tau), \quad (23)$$

$$\theta_{цт,\tau} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} \exp(-m_0 a \tau). \quad (24)$$

В соответствии с методикой расчета параметров для «неограниченной пластины» для каждой из пластин $2R_1$ и $2R_2$ находятся число Bi_{R_i} , параметры m_{R_i} и A_{R_i} , модуль поверхности $M_{ПR_i}$, коэффициент экзотермии $K_{\tau R_i}$, общие для бруса избыточные температуры θ_H и θ_K и темп остывания m .

Темп остывания определяется выражением:

$$m = m_0 a = \left\{ \frac{\mu_{R_1}^2}{R_1^2} + \frac{\mu_{R_2}^2}{R_2^2} \right\} a. \quad (25)$$

Далее для поверхности $X = R_1$, поверхности $Y = R_2$, угла и центра определяются:

– избыточные условные начальные температуры θ_{YHRi} :

$$\theta_{YHRi} = k_{\tau} \theta_H A_1 A_2 \cos \mu_{R_i}, \quad (26)$$

– продолжительность остывания τ_{R_i} до температуры θ_k :

$$\tau_{R_i} = \frac{\ln \theta_{YHRi} - \ln \theta_k}{m}, \quad (27)$$

– средняя избыточная температура θ_{cp,R_i} за время остывания:

$$\theta_{cp,R_i} = \frac{\theta_{YHRi}}{m \cdot \tau_{R_i}} [1 - \exp(-m \tau_{R_i})]. \quad (28)$$

Пример расчета остывания конструкции типа «протяженного прямоугольного бруса»

Задача. Рассчитать продолжительность остывания до температуры $T_k = 0$ °С поверхностей, угла и центра простенка сечением $0,4 \cdot 0,8$ м, образованного пересечением двух пластин толщиной $2R_1 = 0,8$ м и $2R_2 = 0,4$ м при следующих условиях: температура бетона, уложенного в конструкцию $T_H = 80$ °С; температура наружного воздуха $T_{HB} = -10$ °С; коэффициент теплопроводности бетона $\lambda = 1,3$ Вт/м °С, температуропроводности $a = 22 \cdot 10^{-4}$ м²/с; коэффициент теплообмена $\alpha = 5$ Вт/м² °С; бетон М300 приготовлен на поргеландцементе марки 400 при расходе 300 кг/м³.

Решение.

1. Для заданных условий применительно к пластине $2R_1 = 0,8$ м:

$$M_{П1} = \frac{2M^2}{0,8M^3} = 2,5M^{-1};$$

$$Bi_{R_1} = \alpha \lambda^{-1} R = 5 \cdot 1,3^{-1} \cdot 0,4 = 1,54.$$

$$\mu_{R_1}^2 = 2,5(1 + 2,25Bi^{-1})^{-1} =$$

$$2,5(1 + 2,25 \cdot 1,54^{-1})^{-1} = 1,01; \quad \mu_{R_1} = 1,0;$$

$$A_{R_1} = \frac{2 \sin \mu_{R_1}}{\mu_{R_1} + \sin \mu_{R_1} \cos \mu_{R_1}} = \frac{2 \sin 1,0}{1,0 + \sin 1,0 \cdot \cos 1,0} = 1,15;$$

$$K_{\tau R_1} = 1,33 \left[-0,72 \frac{(5 \cdot 2,5)^2}{300 \cdot 400} \right] = 1,32.$$

2. Для заданных условий применительно к пластине $2R_2 = 0,4$ м:

$$M_{П2} = \frac{2M^2}{0,4M^3} = 5M^{-1};$$

$$Bi_{R_2} = \alpha \lambda^{-1} R = 5 \cdot 1,3^{-1} \cdot 0,2 = 0,77;$$

$$\mu_{R_2} = 2,5(1 + 2,25 \cdot 0,77^{-1})^{-1} = 0,63; \quad \mu_{R_2} = 0,79;$$

$$A_{R_2} = \frac{2 \sin 0,79}{0,79 + \sin 0,79 \cos 0,79} = 1,08;$$

$$K_{\tau R_2} = 1,33 \left[-0,72 \frac{(5 \cdot 5)^2}{300 \cdot 400} \right] = 1,32.$$

3. Для обеих пластин:

$$\theta_H = 80 - (-10) = 90 \text{ °С}; \quad \theta_K = 0 - (-10) = 10 \text{ °С},$$

темп остывания m в соответствии с (25):

$$m = \left(\frac{\mu_{R_1}^2}{R_1^2} + \frac{\mu_{R_2}^2}{R_2^2} \right) a = \left(\frac{1,0^2}{0,4^2} + \frac{0,79^2}{0,2^2} \right) 22 \cdot 10^{-4} = 0,048.$$

4. Условная избыточная начальная температура по (26):

$$\theta_{YHR_1} = 1,32 \cdot 90 \cdot 1,15 \cdot 1,08 \cdot \cos 1,0 = 79,7 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\theta_{YHR_2} = 1,32 \cdot 90 \cdot 1,15 \cdot 1,08 \cdot \cos 0,79 = 104 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\theta_{YHR_{R_2}} = 1,32 \cdot 90 \cdot 1,15 \cdot 1,08 \cdot \cos 1,0 \cdot \cos 0,79 = 56,2 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\theta_{YHC} = 1,32 \cdot 90 \cdot 1,15 \cdot 1,08 = 147,6 \text{ }^\circ\text{C}.$$

5. Продолжительности остывания τ_{R_i} до θ_k определяются по (27):

$$\tau_{R_1} = \frac{\ln 79,7 - \ln 10}{0,048} = 43,6 \text{ ч};$$

$$\tau_{R_2} = \frac{\ln 104 - \ln 10}{0,048} = 48,8 \text{ ч};$$

$$\tau_{R_1 R_2} = \frac{\ln 56,2 - \ln 10}{0,048} = 36 \text{ ч};$$

$$\tau_{\mu} = \frac{\ln 147,6 - \ln 10}{0,048} = 56,1 \text{ ч}.$$

6. Средние избыточные температуры θ_{cp, R_i} за время остывания определяются по (28):

$$\theta_{cp, R_1} = \frac{79,7}{0,048 \cdot 43,6} [1 - \exp(-0,048 \cdot 43,6)] = 33,6 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\theta_{cp, R_2} = \frac{104}{0,048 \cdot 48,8} [1 - \exp(-0,048 \cdot 48,8)] = 40 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\theta_{cp, R_1 R_2} = \frac{56,2}{0,048 \cdot 36} [1 - \exp(-0,048 \cdot 36)] = 26,7 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\theta_{cp, \mu} = \frac{147,6}{0,048 \cdot 56,1} [1 - \exp(-0,048 \cdot 56,1)] = 51,1 \text{ }^\circ\text{C}.$$

7. Средние температуры T_{R_i} составят:

$$T_{cp, R_1} = \theta_{cp, R_1} + T_{HB} = 33,6 + (-10) = 23,6 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$T_{cp, R_2} = \theta_{cp, R_2} + T_{HB} = 40 + (-10) = 30 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$T_{cp, R_1 R_2} = \theta_{cp, R_1 R_2} + T_{HB} = 26,7 + (-10) = 16,7 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$T_{cp, \mu} = \theta_{cp, \mu} + T_{HB} = 51,1 + (-10) = 41,1 \text{ }^\circ\text{C}.$$

8. Таким образом, бетон на поверхности $x = R_1$ остывает до $0 \text{ }^\circ\text{C}$ за 43,6 ч, имея среднюю температуру $23,6 \text{ }^\circ\text{C}$, и набирает около 50% марочной прочности; бетон на поверхности $Y = R_2$ остывает за 48,8 ч при средней температуре $30 \text{ }^\circ\text{C}$ и набирает около 55% марочной прочности; бетон в углу остывает до $0 \text{ }^\circ\text{C}$ за 36 ч, имея среднюю температуру $16,7 \text{ }^\circ\text{C}$, и набирает около 25% марочной прочности. Наконец, бетон в центре простенка остывает до $0 \text{ }^\circ\text{C}$ за 56,1 ч при средней температуре $41,1 \text{ }^\circ\text{C}$ и набирает более 65% от R_{28} .

4. Расчет температуры и продолжительности остывания конструкции типа «прямоугольный параллелепипед»

Под типом «прямоугольного параллелепипеда» понимаются конструкции, все три измерения которых X , Y и Z имеют величину одного порядка (рис., С).

С геометрической точки зрения прямоугольный параллелепипед $2R_1 \cdot 2R_2 \cdot 2R_3$ рассматривается как результат пересечения под прямым углом трех неограниченных пластин толщиной соответственно $2R_1$, $2R_2$ и $2R_3$.

С теплофизической точки зрения температурное поле параллелепипеда определяется как произведение температурных коэффициентов (температурный

коэффициент = $A \cos \mu \frac{x}{R} \exp(-m\tau)$) составляющих

этот параллелепипед пластин соответственно для точек, заданных своими координатами.

Так как условия теплообмена, определяемые $Bi = \alpha R \lambda^{-1}$, у соседних граней будут различными (если $R_1 \neq R_2 \neq R_3$), различной будет и продолжительность остывания каждой грани до заданной температуры.

Для конструкции типа «прямоугольный параллелепипед», заданной своими размерами $2R_1 \cdot 2R_2 \cdot 2R_3$, характеристиками бетона (вид цемента, его марка и расход ρ , коэффициенты тепло- и температуропроводности (λ и a), начальная температура T_H) и утеплением, характеризующимся α -коэффициентом теплообмена и остывающей при температуре наружного воздуха T_{HB} , температура в точке X, Y, Z в момент времени τ после начала остывания $T_{x,y,z,\tau}$ определяется по следующей формуле:

$$T_{x,y,z,\tau} - T_{HB} = (T_H - T_{HB}) A_{R_1} A_{R_2} A_{R_3} \cdot \cos \mu_{R_1} \frac{x}{R_1} \cos \mu_{R_2} \frac{y}{R_2} \cos \mu_{R_3} \frac{z}{R_3} \cdot \exp(-m_0 a \tau) \quad (29)$$

или обозначив избыточные температуры:

$$T_{x,y,z,\tau} - T_{HB} = \theta_{x,y,z,\tau}; \quad T_H - T_{HB} = \theta_H; \quad (30)$$

$$\theta_{x,y,z,\tau} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} A_{R_3} \cos \mu_{R_1} \frac{x}{R_1} \cdot \cos \mu_{R_2} \frac{y}{R_2} \cos \mu_{R_3} \frac{z}{R_3} \cdot \exp(-m_0 a \tau), \quad (31)$$

где параметры A_{R_i} и μ_{R_i} принимаются каждый для «своей» пластины.

Избыточные температуры точек среднего по высоте параллелепипеда сечения: поверхности R_1 ($x = R_1, y = 0, z = 0$) – $\theta_{R_1,\tau}$, поверхности R_2 ($x = 0, y = R_2, z = 0$) – $\theta_{R_2,\tau}$, угла ($x = R_1, y = R_2, z = 0$) – $\theta_{R_1,R_2,\tau}$ и центра сечения ($x = 0, y = 0, z = 0$) – $\theta_{ц\tau}$, а также точек, например, верхней грани параллелепипеда: поверхности R_{1z} ($x = R_1, y = 0, z = R_3$) – $\theta_{R_1z,\tau}$, поверхности R_{2z} ($x = 0, y = R_2, z = R_3$) – $\theta_{R_2z,\tau}$, угла ($x = R_1, y = R_2, z = R_3$) – $\theta_{R_1R_2R_3}$ и центра сечения ($x = 0, y = 0, z = R_3$) – $\theta_{цz}$, определяются с учетом (31) соответственно:

$$\theta_{R_1,\tau} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} A_{R_3} \cos \mu_{R_1} \exp(-m_0 a \tau); \quad (32)$$

$$\theta_{R_2,\tau} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} A_{R_3} \cos \mu_{R_2} \exp(-m_0 a \tau); \quad (33)$$

$$\theta_{R_1R_2,\tau} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} A_{R_3} \cos \mu_{R_1} \cos \mu_{R_2} \exp(-m_0 a \tau); \quad (34)$$

$$\theta_{ц\tau} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} A_{R_3} \exp(-m_0 a \tau); \quad (35)$$

$$\theta_{R_1z,\tau} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} A_{R_3} \cos \mu_{R_1} \cos \mu_{R_3} \exp(-m_0 a \tau); \quad (36)$$

$$\theta_{R_2z,\tau} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} A_{R_3} \cos \mu_{R_2} \cos \mu_{R_3} \exp(-m_0 a \tau); \quad (37)$$

$$\theta_{R_1R_2R_3} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} A_{R_3} \cos \mu_{R_1} \cos \mu_{R_2} \cos \mu_{R_3} \exp(-m_0 a \tau); \quad (38)$$

$$\theta_{цz} = \theta_H A_{R_1} A_{R_2} A_{R_3} \cos \mu_{R_3} \exp(-m_0 a \tau). \quad (39)$$

В соответствии с методикой расчета параметров для «неограниченной пластины» для каждой из пластин $2R_1, 2R_2$ и $2R_3$ находят число Bi , параметры A_R и μ_R , модуль поверхности $M_{ПР}$, коэффициент экзотермии $K_{\tau R}$, общие для параллелепипеда избыточные температуры θ_H и θ_K и темп остывания m .

Темп остывания m определяется выражением:

$$m = m_0 a = \left(\frac{\mu_{R_1}^2}{R_1^2} + \frac{\mu_{R_2}^2}{R_2^2} + \frac{\mu_{R_3}^2}{R_3^2} \right) a. \quad (40)$$

Далее для каждой избыточной температуры (32) – (39) определяются:

– основная избыточная начальная температура при $\tau = 0$:

$$\theta_{YHRi} = k_{\tau} \theta_H A_1 A_2 A_3 \cos \mu_{R_i}; \quad (41)$$

– продолжительность остывания τ_{R_i} до температуры θ_K :

$$\tau_{R_i} = \frac{\ln \theta_{YHRi} - \ln \theta_K}{m}; \quad (42)$$

– средняя избыточная температура θ_{cp,R_i} за время остывания:

$$\theta_{cp,R_i} = \frac{\theta_{YHRi}}{m \cdot \tau_{R_i}} \left[1 - \exp(-m \cdot \tau_{R_i}) \right]. \quad (43)$$

Пример расчета остывания конструкции типа «прямоугольный параллелепипед»

Задача. Рассчитать продолжительность остывания до температуры $T_K = 0$ °С поверхностей, угла и центра (в двух уровнях – в среднем сечении и на верхней грани) короткого столба $0,4 \cdot 0,8 \cdot 1,6$ м, образованного пересечением трех пластин толщиной $2R_1 = 0,8$ м; $2R_2 = 0,4$ м; $2R_3 = 1,6$ м при следующих условиях: температура бетона, уложенного в конструкцию $T_H = 80$ °С; коэффициент теплопроводности бетона $\lambda = 1,3$ Вт/м °С, температуропроводности $a = 22 \cdot 10^{-4}$ м²/ч; коэффициент теплообмена $\alpha = 5$ Вт/м² °С; бетон М300 приготовлен на портландцементе марки 400 при расходе 300 кг/м³.

Решение.

1. Для заданных условий применительно к пластине $2R_1 = 0,8$ м:

$$M_{П} = \frac{2M^2}{0,8m^3} = 2,5m^{-1};$$

$$Bi_{R_1} = \alpha R \lambda^{-1} = 5 \cdot 0,4 \cdot 1,3^{-1} = 1,54;$$

$$\mu_{R_1}^2 = 2,5 \left(1 + 2,25 Bi^{-1} \right)^{-1} =$$

$$2,5 \left(1 + 2,25 \cdot 1,54^{-1} \right)^{-1} = 1,01; \quad \mu_{R_1} = 1,0;$$

$$A_{R_1} = \frac{2 \sin \mu_{R_1}}{\mu_{R_1} + \sin \mu_{R_1} \cos \mu_{R_1}} = \frac{2 \sin 1,0}{1,0 + \sin 1,0 \cdot \cos 1,0} = 1,15;$$

$$K_{\tau} = 1,33 \left[-0,72 \frac{(5 \cdot 2,5)^2}{300 \cdot 400} \right] = 1,32.$$

2. Для заданных условий применительно к пластине $2R_2 = 0,4$ м:

$$M_{П} = \frac{2M^2}{0,4m^3} = 5m^{-1};$$

$$Bi_{R_2} = \alpha R \lambda^{-1} = 5 \cdot 0,2 \cdot 1,3^{-1} = 0,77;$$

$$\mu_{R_2}^2 = 2,5(1 + 2,25Bi^{-1})^{-1} =$$

$$2,5(1 + 2,25 \cdot 0,77^{-1})^{-1} = 0,63; \quad \mu_{R_2} = 0,79;$$

$$A_{R_2} = \frac{2 \sin 0,79}{0,79 + \sin 0,79 \cdot \cos 0,79} = 1,08;$$

$$K_{\tau_{R_2}} = 1,33 \left[-0,72 \frac{(5 \cdot 5)^2}{300 \cdot 400} \right] = 1,32.$$

3. Для заданных условий применительно к пластине $2R_3 = 1,6$ м:

$$M_{II} = \frac{2M^2}{1,6M^3} = 1,25M^{-1};$$

$$Bi_{R_3} = \alpha R \lambda^{-1} = 5 \cdot 0,8 \cdot 1,3^{-1} = 3,08;$$

$$\mu_{R_3}^2 = 2,5(1 + 2,25 \cdot 3,08^{-1})^{-1} = 1,44; \quad \mu_{R_3} = 1,2;$$

$$A_{R_3} = \frac{2 \sin 1,2}{1,2 + \sin 1,2 \cdot \cos 1,2} = 1,21;$$

$$K_{\tau_{R_3}} = 1,33 \left[-0,72 \frac{(5 \cdot 1,25)^2}{300 \cdot 400} \right] = 1,32.$$

4. Для обеих пластин:

$$\theta_H = 80 - (-10) = 90 \text{ }^\circ\text{C}; \quad \theta_K = 0 - (-10) = 10 \text{ }^\circ\text{C},$$

темп остывания m в соответствии с (40):

$$m = \left(\frac{\mu_{R_1}^2}{R_1^2} + \frac{\mu_{R_2}^2}{R_2^2} + \frac{\mu_{R_3}^2}{R_3^2} \right) a =$$

$$\left(\frac{1,0^2}{0,4^2} + \frac{0,79^2}{0,2^2} + \frac{1,2^2}{0,8^2} \right) 22 \cdot 10^{-4} = 0,053.$$

5. Вычисляем условные избыточные начальные температуры по (41):

$$\theta_{yHR_1} = 1,32 \cdot 90 \cdot 1,15 \cdot 1,08 \cdot 1,21 \cdot \cos 1,0 = 96,4 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\theta_{yHR_2} = 1,32 \cdot 90 \cdot 1,15 \cdot 1,08 \cdot 1,21 \cdot \cos 0,79 = 125,8 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\theta_{yHR_1R_2} = 1,32 \cdot 90 \cdot 1,15 \cdot 1,08 \cdot 1,21 \cdot \cos 1,0 \cdot \cos 0,79 =$$

$$68 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\theta_{yHЦ} = 1,32 \cdot 90 \cdot 1,15 \cdot 1,08 \cdot 1,21 = 178,6 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\theta_{yHR_1Z} = 1,32 \cdot 90 \cdot 1,15 \cdot 1,08 \cdot 1,21 \cdot \cos 1,0 \cdot \cos 1,2 =$$

$$34,7 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\theta_{yHR_2Z} = 1,32 \cdot 90 \cdot 1,15 \cdot 1,08 \cdot 1,21 \cdot \cos 0,79 \cdot \cos 1,2 =$$

$$45,0 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\theta_{yHR_1R_2R_3} = 1,32 \cdot 90 \cdot 1,15 \cdot 1,08 \cdot 1,21 \cdot \cos 1,0 \cdot \cos 0,79 \cdot$$

$$\cos 1,2 = 24,3 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\theta_{yHЦZ} = 1,32 \cdot 90 \cdot 1,15 \cdot 1,08 \cdot 1,21 \cdot \cos 1,2 = 64,3 \text{ }^\circ\text{C}.$$

6. Продолжительность остывания τ_{R_i} до θ_K определяется по (42):

$$\tau_{R_1} = \frac{\ln 96,4 - \ln 10}{0,053} = 42,7 \text{ ч};$$

$$\tau_{R_2} = \frac{\ln 125,8 - \ln 10}{0,053} = 47,7 \text{ ч};$$

$$\tau_{R_1R_2} = \frac{\ln 68 - \ln 10}{0,053} = 36,2 \text{ ч};$$

$$\tau_{Ц} = \frac{\ln 178,6 - \ln 10}{0,053} = 54,4 \text{ ч};$$

$$\tau_{R_1Z} = \frac{\ln 34,7 - \ln 10}{0,053} = 23,5 \text{ ч};$$

$$\tau_{R_2Z} = \frac{\ln 45,0 - \ln 10}{0,053} = 28,4 \text{ ч};$$

$$\tau_{R_1R_2R_3} = \frac{\ln 24,3 - \ln 10}{0,053} = 16,8 \text{ ч};$$

$$\tau_{ЦZ} = \frac{\ln 64,3 - \ln 10}{0,053} = 35,1 \text{ ч}.$$

7. Средняя избыточная температура θ_{cp,R_i} за время остывания определяется по (43):

$$\theta_{cp,R_1} = \frac{96,4}{0,053 \cdot 42,7} [1 - \exp(-0,053 \cdot 42,7)] = 38,1 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\theta_{cp,R_2} = \frac{125,8}{0,053 \cdot 47,7} [1 - \exp(-0,053 \cdot 47,7)] = 45,8 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\theta_{cp,R_1R_2} = \frac{68}{0,053 \cdot 36,2} [1 - \exp(-0,053 \cdot 36,2)] = 30,2 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\theta_{cp,Ц} = \frac{178,6}{0,053 \cdot 54,4} [1 - \exp(-0,053 \cdot 54,4)] = 58,5 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\theta_{cp.R_1Z} = \frac{34,7}{0,053 \cdot 23,5} [1 - \exp(-0,053 \cdot 23,5)] = 19,8 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\theta_{cp.R_2Z} = \frac{45,0}{0,053 \cdot 28,4} [1 - \exp(-0,053 \cdot 28,4)] = 23,2 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\theta_{cp.R_1R_2R_3} = \frac{24,3}{0,053 \cdot 16,8} [1 - \exp(-0,053 \cdot 16,8)] = 16,1 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\theta_{cp.IIZ} = \frac{64,3}{0,053 \cdot 35,1} [1 - \exp(-0,053 \cdot 35,1)] = 28,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

8. Средние температуры составляют:

$$T_{cp.R_1} = \theta_{cp.R_1} + T_{HB} = 38,1 + (-10) = 28,1 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$T_{cp.R_2} = \theta_{cp.R_2} + T_{HB} = 45,8 + (-10) = 35,8 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$T_{cp.R_1R_2} = \theta_{cp.R_1R_2} + T_{HB} = 30,2 + (-10) = 20,2 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$T_{cp.II} = \theta_{cp.II} + T_{HB} = 58,5 + (-10) = 48,5 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$T_{cp.R_1Z} = \theta_{cp.R_1Z} + T_{HB} = 19,8 + (-10) = 9,8 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$T_{cp.R_2Z} = \theta_{cp.R_2Z} + T_{HB} = 23,2 + (-10) = 13,2 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$T_{cp.R_1R_2R_3} = \theta_{cp.R_1R_2R_3} + T_{HB} = 16,1 + (-10) = 6,1 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$T_{cp.IIZ} = \theta_{cp.IIZ} + T_{HB} = 29,2 + (-10) = 19,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

5. Практические приемы определения продолжительности остывания

Знание закономерностей формирования температурного поля, рассмотренных в настоящей главе, и использование понятия темпа остывания создают чрезвычайно простые возможности прогнозирования продолжительности остывания конструкций на основе замеров температуры в фиксированных точках непосредственно на строительной площадке.

1. Определение продолжительности остывания по замеренной температуре центра и поверхности конструкции типа «неограниченная пластина».

Не ранее чем через 10 часов после начала остывания, чтобы дать остыванию выйти на регулярный режим, производятся замеры температуры центра T_{II} и температуры поверхности T_{II} остывающей конструкции. С учетом температуры наружного воздуха определяются $\theta_{II} = T_{II} - T_{HB}$ и $\theta_{II} = T_{II} - T_{HB}$. Из соотношений (4) и (5) следует, что $\theta_{II} = \theta_{II} \cos \mu_1$, откуда вычисляется $\cos \mu_1$, а затем и μ_1 .

Зная теплопроводность бетона a и размеры конструкции R и с учетом найденного μ_1 рассчитывается темп остывания m на основе формулы (11). Устанавливается температура поверхности $T_{ПК}$, до

достижения которой от температуры T_{II} требуется определить продолжительность $\tau_{ПК}$, приняв соответственно $\theta_{ПК} = T_{ПК} - T_{HB}$. Далее по (12) определяется продолжительность остывания $\tau_{ПК}$, а по (17) средняя температура поверхности $T_{II,CP}$ за время остывания от температуры T_{II} до температуры $T_{К}$. По этим двум показателям $T_{II,CP}$ и $\tau_{ПК}$ устанавливается набранная за этот период величина относительной прочности бетона.

Пример расчета. В бетонной стенке толщиной $2R = 0,6$ м (теплопроводность бетона $a = 22 \cdot 10^{-4}$ м²/ч) через несколько часов после начала остывания произведены замеры температуры центра T_{II} и температуры поверхности T_{II} . В результате получено $T_{II} = 60$ °С и $T_{II} = 40$ °С. Требуется рассчитать через какое время температура поверхности достигнет температуры $T_{ПК} = 5$ °С. Температура наружного воздуха $T_{HB} = -10$ °С.

$$1. \theta_{II} = T_{II} - T_{HB} = 40 - (-10) = 50 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\theta_{II} = T_{II} - T_{HB} = 60 - (-10) = 70 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\theta_{ПК} = T_{К} - T_{HB} = 5 - (-10) = 15 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

2. Из соотношения $\theta_{II} = \theta_{II} \cos \mu_1$ находим $\cos \mu_1$ и μ_1 :

$$\cos \mu_1 = \frac{\theta_{II}}{\theta_{II}} = \frac{50}{70} = 0,714; \quad \mu_1 = 0,775.$$

3. Из соотношения $m = -\mu_1^2 a R^{-2}$ определяем темп остывания:

$$m = -0,775^2 \cdot 22 \cdot 10^{-4} \cdot 0,3^{-2} = -0,0147.$$

4. Определяется продолжительность остывания $\tau_{ПК}$:

$$\tau_{ПК} = \frac{\ln \theta_{ПК} - \ln \theta_{II}}{m} = \frac{\ln 15 - \ln 50}{-0,0147} = 82 \text{ часа}.$$

2. Определение продолжительности остывания по замеренной температуре центра и поверхности конструкции «протяженный брус».

Через несколько часов после начала остывания производятся замеры температуры центра T_{II} и температуры поверхности T_{R1} и T_{R2} . Из соотношений (21) и (22) и с учетом $\theta_{II} = T_{II} - T_{HB}$ и $\theta_{R1} = T_{R1} - T_{HB}$ устанавливается $\theta_{R1} = \theta_{II} \cos \mu_{R1}$, а из соотношений (22) и (24) и с учетом $\theta_{R2} = T_{R2} - T_{HB}$ устанавливается $\theta_{R2} = \theta_{II} \cos \mu_{R2}$, откуда вычисляется сначала $\cos \mu_{R1}$ и $\cos \mu_{R2}$, а затем и μ_{R1} и μ_{R2} .

По полученным значениям μ_{R1} и μ_{R2} и известным a , R_1 и R_2 находится по (25) темп остывания m . По (27) рассчитывается продолжительность остывания до

заданной температуры T_K (соответственно $\theta_K = T_K - T_{HB}$) поверхности R_1 и R_2 .

Пример расчета. В бетонной колонне сечением $2R_1 \cdot 2R_2$, где $2R_1 = 0,8$ м и $2R_2 = 0,4$ м через несколько часов после начала остывания произведены замеры температуры центра и двух поверхностей: $T_{Ц} = 61,9$ °С; $T_{R1} = 28,8$ °С и $T_{R2} = 40,6$ °С. Требуется рассчитать через какое время температура поверхностей достигнет температуры $T_K = 5$ °С. Температура наружного воздуха $T_{HB} = -10$ °С, теплопроводность бетона $a = 22 \cdot 10^{-4}$ м²/ч.

$$1. \theta_{Ц} = T_{Ц} - T_{HB} = 61,9 - (-10) = 71,9 \text{ °С};$$

$$\theta_{R_1} = T_{R_1} - T_{HB} = 28,8 - (-10) = 38,8 \text{ °С};$$

$$\theta_{R_2} = T_{R_2} - T_{HB} = 40,6 - (-10) = 50,6 \text{ °С};$$

$$\theta_K = T_K - T_{HB} = 5 - (-10) = 15 \text{ °С}.$$

2. Из соотношения $\theta_{R1} = \theta_{Ц} \cos \mu_{R1}$ находим $\cos \mu_{R1}$ и μ_{R1} :

$$\cos \mu_{R1} = \frac{38,8}{71,9} = 0,54; \quad \mu_{R1} = 1,0.$$

3. Из соотношения $\theta_{R2} = \theta_{Ц} \cos \mu_{R2}$ находим $\cos \mu_{R2}$ и μ_{R2} :

$$\cos \mu_{R2} = \frac{50,6}{71,9} = 0,70; \quad \mu_{R2} = 0,79.$$

4. По (2.114) находим темп остывания m :

$$m = - \left(\frac{\mu_{R1}^2}{R_1^2} + \frac{\mu_{R2}^2}{R_2^2} \right) a = - \left(\frac{1}{0,4^2} + \frac{0,79}{0,2^2} \right) \cdot 22 \cdot 10^{-4} = -0,048.$$

5. По (2.116) и (2.117) определяем продолжительность остывания до +5 °С поверхности R_1 :

$$\tau_{R1} = \frac{\ln \theta_{R1} - \ln \theta_K}{m} = \frac{\ln 38,8 - \ln 15}{0,048} = 19,8 \text{ ч}$$

и поверхности R_2 :

$$\tau_{R2} = \frac{\ln \theta_{R2} - \ln \theta_K}{m} = \frac{\ln 50,6 - \ln 15}{0,048} = 25,3.$$

3. Определение темпа остывания по двум последовательным замерам температуры поверхности.

Замеры температуры в одной и той же точке поверхности, сделанные через несколько часов при известной температуре наружного воздуха, позволяют рассчитать темп остывания этой поверхности. Если

температуры составляют T_{τ_1} и T_{τ_2} , а время между замерами τ , то при температуре наружного воздуха T_{HB} темп остывания составляет:

$$m = \frac{\ln \theta_{\tau_1} - \ln \theta_{\tau_2}}{\tau} = \frac{\ln(T_{\tau_1} - T_{HB}) - \ln(T_{\tau_2} - T_{HB})}{\tau}.$$

Найденное значение m позволит определить продолжительность остывания $\tau_{охл}$ точки от температуры T_{τ_2} до температуры T_K ($\theta_K = T_K - T_{HB}$):

$$\tau_{охл} = \frac{\ln \theta_{\tau_2} - \ln \theta_K}{m}.$$

Пример расчета. Замеры температуры в одной точке поверхности, сделанные через 5 часов один после другого дали следующие результаты: $T_{\tau_1} = 50$ °С; $T_{\tau_2} = 45,2$ °С. Температура наружного воздуха $T_{HB} = -10$ °С. Найти продолжительность остывания этой точки до температуры $T_K = 0$ °С.

$$1. \theta_{\tau_1} = 50 - (-10) = 60 \text{ °С};$$

$$\theta_{\tau_2} = 45,2 - (-10) = 55,2 \text{ °С};$$

$$\theta_K = 0 - (-10) = 10 \text{ °С}.$$

2. Определим темп остывания:

$$m = \frac{\ln 60 - \ln 55,2}{5} = 0,0167.$$

3. Определим продолжительность остывания от 45,2 °С до 0 °С:

$$\tau_{охл} = \frac{\ln 55,2 - \ln 10}{0,0167} = 102 \text{ ч}.$$

Заключение

Предложена методика и пример расчета:

- остывание конструкции типа «неограниченная пластина»;
- остывание конструкции типа «протяженный прямоугольный брус»;
- остывание конструкции типа «прямоугольный параллелепипед»;
- определение продолжительности остывания по замеренной температуре центра и поверхности конструкции типа «неограниченная пластина»;
- определение продолжительности остывания по замеренной температуре центра и поверхности конструкции «протяженный брус»;
- определение темпа остывания по двум последовательным замерам температуры поверхности.

Literatūra

1. Nmai, Ch. K. Cold weather concreting admixtures. *Cement and Concrete Composites*, Vol 20, Issues 2–3, 1998, p. 121–128.
2. Husem, M. and Gozutok, S. The effects of low temperature curing on the compressive strength of ordinary and high performance concrete. *Construction and Building Materials*, Vol 19, Issue 1, February 2005, p. 49–53.
3. Vodák, F.; Trtík, K.; Kapičková, O.; Hošková, Š. and Demo, P. The effect of temperature on strength – porosity relationship for concrete. *Construction and Building Materials*, Vol 18, Issue 7, September 2004, p. 529–534.
4. Ballim, Y. A numerical model and associated calorimeter for predicting temperature profiles in mass concrete. *Cement and Concrete Composites*, Vol 26, Issue 6, August 2004, p. 695–703.
5. Pisani, M. A. Non-linear strain distributions due to temperature effects in compact cross-sections. *Engineering Structures*, Vol 26, Issue 10, August 2004, p. 1349–1363.
6. Sacks, R.; Eastman, Ch. M. and Lee, G. Parametric 3D modeling in building construction with examples from precast concrete. *Automation in Construction*, Vol 13, Issue 3, May 2004, p. 291–312.
7. Ragueneau, F. and Gatuingt, F. Inelastic behavior modeling of concrete in low and high strain rate dynamics. *Computers & Structures*, Vol 81, Issue 12, May 2003, p. 1287–1299.
8. Sankarasubramanian, G. and Rajasekaran, S. Constitutive modeling of concrete using a new failure criterion. *Computers & Structures*, Vol 58, Issue 5, 3 March 1996, p. 1003–1014.

KONSTRUKCIJŲ AUŠIMO TEMPERATŪROS IR TRUKMĖS NUSTATYMAS

B. M. Krasnovskis

S a n t r a u k a

Sukietėjusio betono savybės, atliekant betonavimo darbus žiemą termosu būdu, priklauso nuo jo struktūros formavimosi kietėjimo metu. Betono struktūros formavimuisi tiesioginė, o kai kada ir pagrindinę įtaką daro temperatūros veiksnys, nes nuo jo priklauso betono stiprio didėjimas ir įtempimų būvio

formavimasis. Dėl nevienodos temperatūros betono stiprumas įvairiose konstrukcijos skerspjūvio vietose gali būti skirtingas, nes temperatūra skerspjūvio centre gali būti keletą dešimčių laipsnių didesnė nei kraštiniuose sluoksniuose. Be to, gali kilti tempimo įtempimai, viršijantys betono tempiamąjį stiprį. Mokėti temperatūrinio lauko intensyvumo pasiskirstymo konstrukcijos skerspjūvyje bei jo kitimo dinamikos dėsnius yra būtina kuriant technologinius sprendimus, kurie užtikrintų reikalaujamą betono ir pačios konstrukcijos kokybę.

Pasiūlyta metodika leidžia nustatyti temperatūrą bet kuriame auštančios konstrukcijos taške, aušimo trukmę iki nustatytos temperatūros bei vidutinę temperatūrą aušimo metu.

DEFINITION OF COOLING TEMPERATURE AND DURATION OF STRUCTURES

B. M. Krasnovsky

S u m m a r y

The final properties of concrete maintained under winter conditions by the method of a “hot” thermos are defined by the generated structure during its hardening. The formation of the structure is determined by the temperature factor which influences both the durability of set concrete and the formation of thermo-strain conditions. Due to non-uniform temperature the field durability of concrete in various parts of a design can be different as the temperature in the center of the section of a design can exceed the temperature of superficial layers and there can be the stretching pressure exceeding the opportunity of work of concrete. Therefore the knowledge of the picture of a temperature field in the section of a design and the knowledge of laws of its change and its dynamics are necessary for the development of technological solutions providing the required quality of concrete and erected designs.

The technique offered below allows to define the temperature at any point of a cooling structure, the duration of cooling up to the set temperature and the average temperature for the period of cooling.

Boris KRASNOVSKY. Professor, Dr. Sci. Tech., the member-correspondent of the Russian engineering Academy, the deserved builder of Russia, the first pro-rector of the State Academy of professional retraining and improvement of professional skill of executives and experts of investment sphere of the Ministry of Education of the Russian Federation.