УДК 693.54.021.15«324» DOI: 10.33622/0869-7019.2020.10.78-86

Особенности зимнего бетонирования среднемассивных монолитных фундаментов высотных зданий

Марк Юрьевич АБЕЛЕВ, доктор технических наук, профессор, e-mail: int207@mail.ru

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337 Москва, Ярославское ш., 26

Борис Михайлович КРАСНОВСКИЙ, доктор технических наук, профессор, e-mail: bmk-001@yandex.ru

АНО «Центр содействия в развитии образования и научных исследований «Эксперт», 129090 Москва, пер. Астраханский, 1/15

Аннотация. *Для периода остывания как завершающего этапа термообработки в зимних условиях монолитных бетонных и железобетонных конструкций нормами для среднемодульных конструкций установлены достаточно четкие ограничения скорости охлаждения и предельного перепада между температурой поверхности бетона и температурой окружающей среды. Что же касается конструкций средней массивности, характерных для фундаментов высотных зданий, нормы рекомендуют эти параметры устанавливать отдельным расчетом. Авторами предложена методика, позволяющая для конструкций любой массивности рассчитывать допустимую скорость остывания и допустимый температурный перепад в зависимости от прочности бетона при растяжении к моменту начала остывания. Расчет ведется на два этапа (режима) остывания. Для первого этапа, начинающегося с момента окончания изотермического прогрева бетона, устанавливаются предельно высокая скорость остывания, зависящая от достигнутой бетоном прочности при растяжении и определяемая коэффициентом теплопередачи ограждения, и момент (время и температура) возможного снятия теплового ограждения, являющийся началом второго этапа. Момент снятия теплового ограждения определяется условиями окружающей среды — прогнозируемой скоростью ветра, от которой зависит интенсивность теплоотдачи поверхности, и температурой наружного воздуха. Суммарная продолжительность двух этапов дает общую продолжительность остывания конструкции от температуры прогрева до температуры наружного воздуха.*

Ключевые слова: *зимнее бетонирование, массивность конструкций, прочность бетона при растяжении, трещинообразование в остывающем бетоне, коэффициент теплопередачи ограждения, коэффициент теплоотдачи поверхности, скорость остывания после термообработки, предельная разность температур бетона и воздуха, продолжительность остывания.*

FEATURES OF WINTER CONCRETING OF MEDIUM-MASS MONOLITHIC FOUNDATIONS OF HIGH-RISE BUILDINGS

Mark Yu. ABELEV, e-mail: int207@mail.ru

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

Boris M. KRASNOVSKIY, e-mail: bmk-001@yandex.ru

Center for Assistance in the Development of Education and Research “Expert”, pereulok Astrahanskiy, 1/15, Moscow 129090, Russian Federation

Abstract. *For the cooling period as the final stage of heat treatment in winter conditions of monolithic concrete and reinforced concrete structures, the norms set fairly clear limits on the cooling rate and the maximum difference between the concrete surface temperature and the ambient temperature. As for the structures of medium massiveness that are typical for the foundations of high-rise buildings, the standards recommend setting these parameters separately. A method proposed makes it possible to calculate the permissible cooling rate and the permissible temperature drop for structures of any massiveness, depending on the tensile strength of concrete at the moment of cooling. The calculation is carried out in two stages (mode) of cooling. For the first stage, starting from the end of the isothermal heating of concrete, an extremely high cooling rate is set. depending on the tensile strength achieved by the concrete and determined by the heat transfer coefficient of the fence, and the moment (time and temperature) of possible removal of the thermal fence, which is the beginning of the second stage. The moment when the thermal barrier is removed is determined by environmental conditions — the predicted wind speed, which determines the intensity of surface heat transfer, and the outdoor air temperature. The total duration of the two stages gives the total duration of cooling of the structure from the heating temperature to the outdoor temperature.*

Key words: *winter concreting, massiveness of structures, concrete tensile strength, crack formation in cooling concrete, heat transfer coefficient of fence, surface heat transfer coefficient, cooling rate after heat treatment, maximum temperature difference between concrete and air, cooling time.*

© АБЕЛЕВ М. Ю., КРАСНОВСКИЙ Б. М., 2020

Специфика монолитных фундаментов высотных зданий заключается в их относительно высокой по сравнению с надземными конструкциями массивности, в терминологии зимнего бетонирования определяемой как модуль поверхности $M_{пов}$, м$^{-1}$ ($M_{пов} = F/V$, где F — поверхность охлаждения, м^2; V — объем конструкции, м^3). Для надземных конструкций (элементы каркаса, ядра жесткости, стены, пилоны, перекрытия) модуль поверхности может изменяться в пределах от 4 до 12 м$^{-1}$, модуль поверхности массивных фундаментов снижается до значения менее 1 м$^{-1}$ (например, фундаментная плита толщиной 2 м имеет $M_{пов}$ = 0,5 м$^{-1}$) [1, 2].

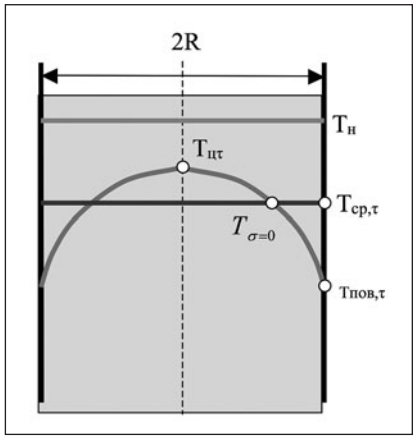


Рис. 1. ***Температурное поле по сечению остывающей конструкции***

При производстве работ в зимних условиях выдерживание бетона до набора им требуемой прочности осуществляется в тепляках, методами термоса (горячего или традиционного) или с применением электротермообработки (греющие провода, электродный прогрев, индукционный прогрев и пр.) при температуре от 30 до 80 °С. Как правило, на строительной площадке наибольшее внимание при термообработке бетона уделяется соблюдению таких параметров прогрева, как скорость разогрева в период подъема температуры, равномерность температурного поля в процессе изотермического выдерживания и продолжительность собственно прогрева [3]. В то же время такой этап термообработки, как период остывания конструкции до температуры наружного воздуха или до температуры, когда возможно снятие технологического утепления (как частный случай утеплением может быть и опалубка), остается за пределами внимания, а чаще и вовсе игнорируется. Отношение к прогретому бетону, как к высокопрочному материалу (да и в действительности имеющему к началу остывания прочность порядка 20—50 МПа), с которым уже ничего неожиданного не может произойти, плюс сравнительно мягкие зимы последних лет (даже в Сибири), — все это приводит к неоправданному игнорированию инженерно-техническим персоналом процессов остывания, хотя нормы предъявляют довольно жесткие требования как к скорости остывания, так и к допустимой разности между температурой открываемой поверхности и температурой наружного воздуха.

Если при охлаждении элементов высокомодульных каркасных конструкций нормы допускают относительно высокую скорость остывания (5—10 °С/ч), а при полном раскрытии значительную разность температур поверхности бетона и наружного воздуха (для сильно армированных конструкций до 50 °С), то определение этих параметров при охлаждении и раскрытии среднемассивных конструкций с модулем поверхности $M_п < 2...4$ м$^{-1}$ СП 70.13330.2012 «СНиП 3.03.01-87 Несущие и ограждающие конструкции» предлагает производить отдельным расчетом.

Такие требования норм к динамическим характеристикам тепловых процессов в остывающем бетоне связаны с возможностью формирования неблагоприятного температурного поля и, как следствие, опасного термонапряженного состояния по сечению конструкции.

Термообрабатываемые бетонные (железобетонные) конструкции имеют, как правило, размеры сечения или толщину тем большие, чем более массивна конструкция, и остывание их по сечению происходит неравномерно. Совершенно очевидно, что сначала остывают поверхностные слои, температура центральных слоев в течение всего периода остывания остается более высокой. Остывающие поверхностные слои стремятся сократить свои линейные размеры, чему препятствуют более нагретые центральные слои. При этом начинают формироваться температурные напряжения: на поверхности — растягивающие, во внутренних слоях — сжимающие.

Если в какой-то момент времени τ температура поверхности бетона равна $T_{пов,\tau}$, средняя температура сечения — $T_{ср,\tau}$ (*рис. 1*), то температурные напряжения на поверхности $\sigma_{пов}$, МПа, определяются следующим соотношением [4]:

$$\sigma_{пов} = \frac{\alpha E}{1-\nu}(T_{ср} - T_{пов}), \qquad (1)$$

где α — линейный коэффициент температурного расширения материала, °С$^{-1}$; E — модуль упругости, МПа; ν — коэффициент Пуассона.

Приняв для бетона модуль упругости равным E = 25 000 МПа, $\alpha = 1 \cdot 10^{-5}$ °С$^{-1}$, ν = 0,2 и разность между температурой поверхности бетона и средней температурой сечения $T_{ср} - T_{пов}$ = 10 °С , получим значение температурного напряжения по формуле (1), равное 3,125 МПа, и, поскольку расчетное сопротивление бетона растяжению находится в пределах 1,5 — 1,75 МПа, совершенно естественно ожидать на такой поверхности, где темпера-

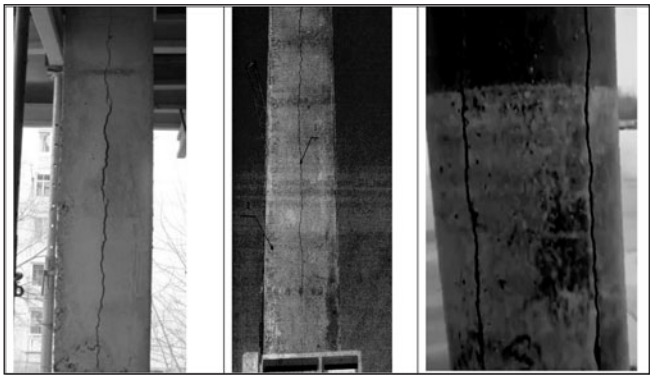


Рис. 2. ***Температурные трещины при резком остывании прогретого бетона [10]***

турные напряжения более чем вдвое превышают возможность работы бетона на растяжение, появления температурных трещин *(рис. 2)*.

Именно в силу этих причин СП 70.13330 ограничивает предельные скорости остывания (п. 5.11.16) конструкций после тепловой обработки: с модулем поверхности до 4 — отдельным расчетом; от 5 до 10 — не более 5 °С/ч; свыше 10 — не более 10 °С/ч. Разность температур наружных слоев бетона и воздуха при распалубке с коэффициентом армирования до 1 %, до 3 % и более 3 % должна быть соответственно для конструкций с модулем поверхности: от 2 до 5 — не более 20, 30, 40 °С; свыше 5 — не более 30, 40, 50 °С.

Как видно из приведенных цифр, нормы предъявляют тем более жесткие ограничения параметров режима остывания, чем более массивны конструкции. Кроме того, нормы, по сути, делят процесс технологического остывания на два этапа: первый этап — остывание конструкции после термообработки в опалубке или под тепловой защитой, второй этап — раскрытие конструкции. На первом этапе регламентируется скорость остывания, на втором — разность между температурой поверхности раскрываемой конструкции и температурой наружного воздуха. Параметр, позволяющий регулировать скорость остывания, — это термическое сопротивление ограждающей конструкции (или обратная ей величина — коэффициент теплопередачи ограждения). Граничный фактор, определяющий возможный момент снятия ограждения, — такой максимальный температурный перепад, который еще не провоцирует скачок температурных напряжений на раскрываемой поверхности до значений, превышающих возможность работы бетона на растяжение.

Таким образом, для управления процессом остывания (или его прогнозирования) следует уметь определять предельно низкую степень тепловой изоляции, которая, с одной стороны, не позволит сформироваться опасным температурным перепадам по сечению остывающей конструкции, а с другой — не приведет к значительной продолжительности остывания.

Будем рассматривать бетонную конструкцию, как неограниченную в направлении Y и Z пластину толщиной $2R$ (от неограниченной пластины при необходимости математически просто перейти к протяженному брусу или параллелепипеду). Температурное поле $\Theta_{x,\tau}$ в такой конструкции для граничных условий 3-го рода (теплообмен по закону Ньютона со средой, заданной температурой $T_{нв}$) и при равномерном распределении начальной температуры $T_н$ определяется по следующей формуле [5]:

$$\Theta_{x,\tau} = \Theta_н \sum_1^{\infty} A_n \cos\mu_n \frac{x}{R} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{a}{R^2}\tau\right), \quad \textbf{(2)}$$

где $\Theta_{x,\tau}$ и $\Theta_н$ — избыточная скользящая и начальная температура бетона: $\Theta_{x,\tau} = T_{x,\tau} - T_{нв}$; $\Theta_н = T_н - T_{нв}$; $T_{x,\tau}$ — температура, °С, в точке x, м, сечения в момент времени τ, ч, после начала остывания; $T_н$ — начальная температура бетона, °С; $T_{нв}$ — температура наружного воздуха (среды), °С; R — половина толщины конструкции, м; a — коэффициент температуропроводности бетона, м^2/ч; μ_n и A_n — безразмерные корни характеристического уравнения $\mathrm{ctg}\mu = \mu/Bi$ (Bi — критерий Био); значения μ_n и A_n табулированы [5]; $Bi = \alpha_t R/\lambda$ (α_t — коэффициент теплообмена на остывающей поверхности, Вт/(м^2·°С); λ — коэффициент теплопроводности бетона, Вт/(м·°С).

Для характеристики формирующегося температурного поля наибольший интерес представляет температура трех характерных точек сечения — температура центра $\Theta_{ц,\tau}$, средняя температура по сечению $\Theta_{ср,\tau}$ и температура поверхности $\Theta_{пов,\tau}$.

При расчете $T_{x,\tau}$ для $\tau > 5$ ч в (2) можно ограничиться двумя первыми членами ряда. Тогда для момента времени τ температура центра $\Theta_{ц,\tau}$ ($x = 0$) составит:

$$\Theta_{ц,\tau} = \Theta_н[A_1 \exp(-\mu_1^2 Fo) + A_2 \exp(-\mu_2^2 Fo)]; \quad \textbf{(3)}$$

средняя температура по сечению $\Theta_{ср,\tau}$:

$$\Theta_{ср,\tau} = \frac{1}{2R}\int_{-R}^{+R} \Theta_{x,\tau} dx = \quad \textbf{(4)}$$

$$= \Theta_н\left[A_1 \frac{\sin\mu_1}{\mu_1}\exp(-\mu_1^2 Fo) + A_2 \frac{\sin\mu_2}{\mu_2}\exp(-\mu_2^2 Fo)\right];$$

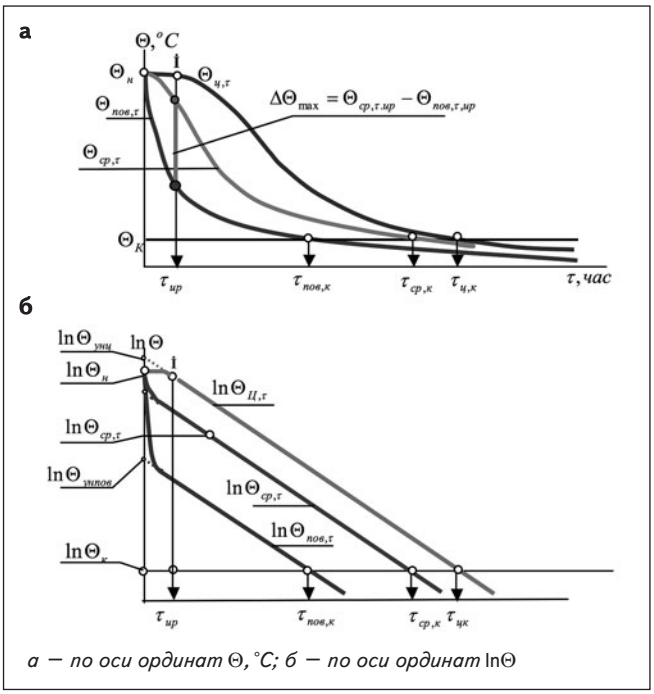
температура поверхности $\Theta_{пов,\tau}$ ($x = R$):

$$\Theta_{пов,\tau} = \Theta_н[A_1 \cos\mu_1 \exp(-\mu_1^2 Fo) + \quad \textbf{(5)}$$

$$+ A_2 \cos\mu_2 \exp(-\mu_2^2 Fo)],$$

где $Fo = \frac{a\tau}{R^2}$ — безразмерный критерий Фурье (обобщенное время).

Разность последних двух температур, наряду с упругими характеристиками материала, и опреде-



а — по оси ординат Θ, °C; б — по оси ординат lnΘ

Рис. 3. ***Изменение во времени избыточной температуры центра*** $\Theta_{ц,\tau}$***, поверхности*** $\Theta_{пов,\tau}$ ***и средней температуры*** $\Theta_{ср,\tau}$

ляет по (1) конкретное значение температурных напряжений.

График изменения $\Theta_{пов,\tau}$, $\Theta_{ц,\tau}$ и $\Theta_{ср,\tau}$ представлен на *рис. 3а,* откуда видно, что температура всех точек — центра, поверхности и средняя температура по сечению изменяются по-разному и по довольно сложным кривым.

Температура поверхности $\Theta_{пов,\tau}$ сразу, с момента начала остывания, начинает резко снижаться; скорость снижения температуры — сначала высокая, затем, по мере приближения к температуре наружного воздуха, начинает замедляться.

Температура центра $\Theta_{ц,\tau}$ сначала, в течение некоторого периода — до достижения точки **i**, остается без изменения, что совершенно естественно, так как должно пройти какое-то время, пока зона охлаждения подойдет к центральной точке, затем и в этой точке температура тоже начинает снижаться. Режим остывания до достижения точки **i** называют **иррегулярным,** после точки **i** (когда в процесс остывания включаются все точки сечения) — **регулярным** [6].

Как это очевидно из механизма остывания пластины при граничных условиях третьего рода и хорошо видно на графике, максимальная разность между средней температурой по сечению и температурой поверхности практически совпадает с моментом завершения иррегулярного режима.

Воспользовавшись уравнением термоупругости для неограниченной пластины толщиной $2R$ [4]

$$\sigma_{x,\tau} = \frac{\alpha E}{1-\nu}\Theta_{x,\tau} + \frac{\alpha E}{2R(1-\nu)}\int_{-R}^{+R}\Theta_{x,\tau}dx + \frac{3\alpha E x}{2R^3(1-\nu)}\int_{-R}^{+R}\Theta_{x,\tau}x dx \quad (6)$$

и температурной функцией $\Theta_{x,\tau}$ для граничных условий 3-го рода (2), найдем напряжения $\sigma_{x,\tau}$ в точке x в момент времени τ:

$$\sigma_{x,\tau} = \frac{\alpha E}{1-\nu}\Theta_{н}\sum A_n\left(\frac{\sin\mu_n}{\mu_n} - \cos\mu_n\frac{x}{R}\right)\times \exp\left(-\mu_n^2\frac{a\tau}{R^2}\right). \quad (7)$$

Из выражения (7), положив $a\tau/R^2 = Fo$, с учетом двух первых членов ряда найдем обобщенный момент времени $Fo_{σ.пов,max}$, в который на поверхности сформируются максимальные температурные напряжения $\sigma_{пов,max}$ [7]:

$$Fo_{σ.пов,max} = \frac{1}{\mu_1^2-\mu_2^2}\ln - \frac{\mu_1^2 A_1\left(\frac{\sin\mu_1}{\mu_1} - \cos\mu_1\right)}{\mu_2^2 A_2\left(\frac{\sin\mu_2}{\mu_2} - \cos\mu_2\right)}. \quad (8)$$

Вычислив по (8) значение $Fo_{σ.пов,max}$, для бетона, заданного упругими характеристиками α_t, ν, E, начальной температурой остывания конструкции $\Theta_н$, заданной размерами R и условиями тепловой изоляции α, из выражения (7) можно определить максимальные температурные напряжения $\sigma_{пов,max}$:

$$\sigma_{пов,max} = \frac{\alpha E}{1-\nu}\Theta_{н}\sum A_n\left(\frac{\sin\mu_n}{\mu_n} - \cos\mu_n\right)\times \exp\left(-\mu_n^2 Fo_{σ,пов,max}\right). \quad (9)$$

Рассмотрим подробнее выражение (8). Момент формирования максимальных температурных напряжений $Fo_{σ.пов,max}$ определяется только параметрами A_n и μ_n, однозначно зависящими лишь от критерия $Bi = \alpha R/\lambda$, что дает возможность построения графика $Fo_{σ.пов,max} = f(Bi)$, позволяющего быстро находить $Fo_{σ.пов,max}$ для известного Bi (кривая Fo на *рис. 4*).

Далее, обозначим в формуле (9) ряд $\Sigma A_n\ldots$ символом σ^*, так что

$$\sigma_{пов,max} = \frac{\alpha E}{1-\nu}\Theta_{н}\sigma^* \quad (10)$$

и отметим, что параметр σ^*, по физическому смыслу являющийся единичным напряжением, отнесенным к единице температуры и комплексу упругих характеристик бетона, как и (9), состоит лишь из

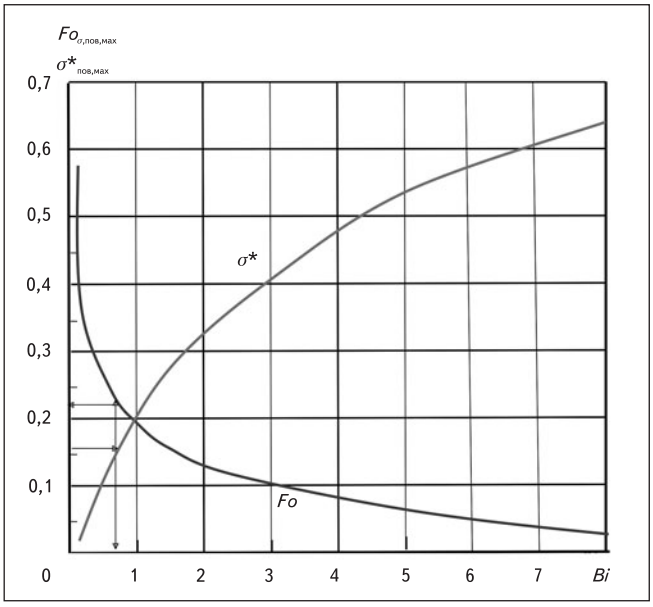


Рис. 4. ***Графики*** $Fo_{\sigma,\text{пов,max}} = f(Bi)$ ***и*** $\sigma^* = f(Bi)$

параметров A_n и μ_n, однозначно зависящих лишь от критерия $Bi = \alpha R/\lambda$, что позволяет графически выразить зависимость $\sigma^* = f(Bi)$ (кривая σ^* на *рис. 4*)

Установленные выражениями (2)—(10) закономерности формирования температурного поля и динамики напряженного состояния в сечении остывающей бетонной конструкции (неограниченная пластина, плита, стенка) и графики $Fo_{\sigma,\text{пов,max}} = f(Bi)$ и $\sigma^* = f(Bi)$ позволяют для конкретной конструкции, заданной своими упругими и теплофизическими характеристиками, начальной температурой и температурой наружного воздуха, исходя из допустимого значения растягивающих напряжений, найти предельный коэффициент теплопередачи поверхности и время достижения критических напряжений.

Теперь, для полноты решения, следует определить продолжительность остывания конструкции от начальной температуры $\Theta_н$ до конечной температуры $\Theta_к$. Вернемся к выражению (2) и, приняв, что для размеров реальных конструкций в ряду можно ограничиться лишь первым членом [6], и обозначив $\mu^2 a/R^2 = m$, запишем его в следующем виде:

$$\Theta_{x,\tau} = \Theta_н A_1 \cos\mu_1 \frac{x}{R} \exp(-m\tau). \quad (11)$$

В начальный момент времени $\tau = 0$, тогда

$$\Theta_{x,0} = \Theta_н A_1 \cos\mu_1 \frac{x}{R}, \quad (12)$$

где правая часть последнего уравнения приобретает физический смысл условной начальной температуры остывания точки x, которую обозначим $\Theta_{унх}$. Перепишем (11) в виде

$$\Theta_{x,\tau} = \Theta_{унх} \exp(-m\tau)$$

и, прологарифмировав обе части, получим:

$$\ln\Theta_{x,\tau} = \ln\Theta_{унх} - m\tau,$$

откуда

$$\tau = \frac{\ln\Theta_{унх} - \ln\Theta_{x,\tau}}{m}. \quad (13)$$

Параметр $m = \mu^2 a/R^2$, ч$^{-1}$, в теории регулярного режима [6] называемый темпом остывания, определяет продолжительность остывания от логарифма одной температуры до логарифма другой в любой точке сечения и остается постоянным в течение всего периода регулярного остывания (*см. рис. 3б*). Применительно к поверхности ($x = R$), где остывание происходит от условной начальной температуры поверхности $\Theta_{ухп} = \Theta_н A_1 \cos\mu_1$ до какой-то конечной (задаваемой) температуры $\Theta_к$, продолжительность остывания $\tau_{пов}$ составит:

$$\tau_{пов} = \frac{\ln\Theta_{унп} - \ln\Theta_к}{m} \quad (14)$$

или в размерности обобщенного времени:

$$Fo_{пов} = \frac{\ln\Theta_{унп} - \ln\Theta_к}{\mu^2}. \quad (15)$$

Теперь мы обладаем аппаратом, позволяющим для заданных условий остывания конструкции рассчитать минимально допустимое значение теплозащиты, обеспечивающей достижение напряжений на поверхности, не превышающих расчетного сопротивления бетона растяжению, и общую продолжительность остывания бетона (по температуре поверхности или в иной расчетной точке) до конечной заданной температуры.

При разработке технологических карт, ППР и ПОС естественно минимизировать продолжительность основных работ, тем более тех, которые чаще всего лежат на критическом пути [8]. Продолжительность остывания массивных бетонных конструкций до возможной температуры их раскрытия (все это время остается задействованной опалубка или тепловое ограждение) исчисляется сотнями часов, являющимися по факту пассивным технологическим ожиданием. В связи с этим рационально проектировать режим остывания с использованием максимально допустимых с точки зрения трещинообразования температурных параметров — предельно высоким коэффициентом теплопередачи ограждения и максимально возможной разностью температур поверхности бетона и наружного воздуха. Другими словами: при максимально быстром остывании и максимально раннем раскрытии конструкции должно обеспечиваться главное условие — температурные напряжения не должны превышать прочность бетона при растяжении.

Расчет ведется на два этапа (режима) остывания. *Первый этап* начинается с момента окончания периода изотермического прогрева бетона, когда поступление тепла в конструкцию прекращается, и бетон к этому моменту уже имеет установленную проектом (распалубочную) прочность и фиксированную температуру изотермического прогрева (предположительно равномерную по сечению), являющуюся начальной температурой остывания $\Theta_{н(1)}$. Завершается этап снятием теплового ограждения, после чего конструкция начинает взаимодействовать с окружающей средой без какой-либо защиты. Для первого этапа, исходя из известной для данного бетона прочности при растяжении, устанавливаются значения единичного напряжения $\sigma^*_{(1)}$ (здесь и далее нижний индекс в скобках будет указывать на принадлежность к этапу остывания) и на основе графика $\sigma^* = f(Bi)$ (*см. рис. 4*) соответствующий ему критерий $Bi_{(1)}$, а также связанный с ним коэффициент теплопередачи ограждения $\alpha_{(1)}$. Найденное значение $Bi_{(1)}$ дает характеристические числа $A_{(1)}$ и $\mu_{(1)}$, что позволяет найти темп остывания конструкции на первом этапе $m_{(1)}$ и продолжительность остывания $\tau_{(1)}$ до искомой температуры. При желании можно найти напряжения в сечении для любого момента времени в пределах $\tau_{(1)}$.

Второй этап начинается с фиксации ожидаемого (зависящего в основном от скорости ветра) коэффициента теплоотдачи на поверхности открытого бетона $\alpha_{(2)}$, определения критерия $Bi_{(2)}$ и связанного с ним *(см. рис. 3)* значения единичного напряжения $\sigma^*_{(2)}$. По найденному значению $\sigma^*_{(2)}$ рассчитывается соответствующая ему температура $\Theta_{(2)}$ бетона, при которой уже возможно будет снятие теплового ограждения и вновь произойдет скачок температурных напряжений до запланированного допустимого значения прочности бетона при растяжении. Эта температура считается завершающей температурой первого этапа остывания $\Theta_{к(1)}$ и начальной температурой второго этапа $\Theta_{н(2)}$. Далее по аналогии с первым этапом по значению критерия $Bi_{(2)}$ устанавливаются характеристические числа $A_{(2)}$ и $\mu_{(2)}$, темп остывания $m_{(2)}$ и продолжительность остывания от начальной температуры второго этапа до расчетной температуры (температуры наружного воздуха).

Поясним методику расчета на следующем примере.

Задано. Рассчитать, исходя из соображений недопущения трещинообразования, режим остывания среднемассивной слабоармированной железобетонной конструкции (коэффициент армирования $\mu_A < 0{,}01$), прошедшей термообработку при температуре изотермического прогрева $T_н = 40$ °С. Конструкция — протяженная стена толщиной $2R = 1$ м (модуль поверхности $M_{пов} = 1/R = 2$ м$^{-1}$). Бетон класса В30 после прогрева имеет следующие характеристики: модуль упругости $E = 25\,000$ МПа, прочность при растяжении $R_{раст} = 1{,}7$ МПа, коэффициент линейного расширения $\alpha_{бет} = 10^{-5}$ (°С)$^{-1}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}2$, коэффициент теплопроводности $\lambda = 1{,}75$ Вт/(м·°С), температуропроводность $a = 0{,}0025$ м^2/ч. Температура наружного воздуха $T_{нв} = -10$ °С.

Следует найти:

- максимально допустимый коэффициент теплопередачи ограждения α, обеспечивающий скорость остывания, при которой формирующиеся температурные напряжения на поверхности бетона не превышают его прочности при растяжении;
- температуру поверхности бетона $T_{с.огр}$, при которой допускается снятие теплового ограждения и продолжительность остывания τ от температуры $T_н$ до температуры $T_к$.

Решение.

1. Устанавливаем избыточную (по отношению к температуре среды) температуру бетона:

$$\Theta_н = T_н - T_{нв} = 40 - (-10) = 50\ °С.$$

2. Из выражения (10), считая, что должно быть соблюдено условие $\sigma_{пов.max} < R_{раст} = 1{,}7$ МПа, найдем единичное напряжение σ^*:

$$\sigma^* \leqslant \frac{\sigma_{пов.max}(1-\nu)}{\alpha E \Theta_н} \rightarrow \sigma^* \leqslant \frac{1{,}7(1-0{,}2)}{10^{-5}\cdot 25000\cdot 50} \rightarrow \sigma^* \leqslant 0{,}11.$$

3. Как следует из графика *рис. 4,* единичному напряжению $\sigma^* = 0{,}11$ соответствуют $Bi = 0{,}5$ и $Fo_{\sigma.пов,max} = 0{,}28$. По графикам *рис. 5* определяем соответствующие критерию $Bi = 0{,}5$ характеристические числа $A_1 = 1{,}07$ и $\mu_1 = 0{,}65$.

4. По $Bi = \alpha R/\lambda = 0{,}5$ найдем максимально допустимый коэффициент теплопередачи ограждения α:

$$\alpha = \frac{Bi\lambda}{R} = \frac{0{,}5\cdot 1{,}75}{0{,}5} = 1{,}75\ Вт/(м^2\cdot °С).$$

При $\alpha = 1{,}75$ Вт/(м^2·°С) сформируются максимально допустимые напряжения на поверхности. При $\alpha < 1{,}75$ уменьшатся температурные напряжения, но увеличится продолжительность остывания; при $\alpha > 1{,}75$ напряжения превысят допустимые.

5. По $Fo_{\sigma.пов,max} = a\tau/R^2 = 0{,}28$ найдем момент формирования максимальных температурных напряжений:

$$\tau = \frac{Fo_{\sigma.пов,max} R^2}{a} = \frac{0{,}28\cdot 0{,}5^2}{0{,}0025} = 28\ ч.$$

6. По $m = \mu_1^2 a/R^2$ определим темп остывания конструкции в период регулярного охлаждения:

$$m = \frac{0{,}65^2 \cdot 0{,}0025}{0{,}5^2} = 0{,}0042 \text{ ч}^{-1}.$$

7. По формуле (12) найдем условную начальную температуру поверхности $\Theta_{унп}$ ($x = R$):

$$\Theta_{унп} = \Theta_н A_1 \cos\mu_1 \frac{R}{R} = 50 \cdot 1{,}07 \cos 0{,}65 = 42{,}5 \text{ °C}.$$

8. По формуле (14) определим продолжительность остывания от избыточной условной начальной температуры поверхности $\Theta_{унп}$ до избыточной температуры наружного воздуха $\Theta_{н.в.} = 0$ °С:

$$\tau_{пов} = \frac{\ln \Theta_{унп} - \ln \Theta_к}{m} = \frac{\ln 42{,}5 - 0}{0{,}0042} = 893 \text{ ч},$$

т. е. продолжительность остывания конструкции $2R = 1$ м ($M_{пов} = 2$ м$^{-1}$) с тепловой защитой $\alpha = 1{,}75$ Вт/(м^2·°С) до температуры наружного воздуха составит около 37 сут.

9. Рассмотрим возможность более раннего снятия тепловой защиты. Понятно, что при полном остывании до температуры наружного воздуха термические напряжения по мере охлаждения будут снижаться, достигнув к окончанию процесса нулевых значений (в условиях равновесия). Попытка снять тепловую защиту в рамках первого этапа остывания (при $\alpha = 1{,}75$ Вт/(м^2·°С) и темпе остывания $m = 0{,}0042$ ч$^{-1}$) приведет к скачку температурных напряжений на поверхности, размер которых зависит от условий обветривания открытой поверхности бетона. Так, коэффициент теплоотдачи у открытой наружной поверхности при скорости ветра до 2 м/с составляет $\alpha = 10$ Вт/(м^2·°С), при скорости ветра до 5 м/сек $\alpha = 20$ Вт/(м^2·°С) [3]. Найдем допустимо раннюю температуру снятия ограждения для обоих случаев.

9.1. При $\alpha = 10$ Вт/(м^2·°С) критерий Bi составит:

$$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda} = \frac{10 \cdot 0{,}5}{1{,}75} = 2{,}86,$$

соответствующее ему единичное напряжение по графику *рис. 3* равно $\sigma^* = 0{,}39$, а искомая температура $\Theta_{н(2)}$ по формуле (10):

$$\sigma_{пов,max} = \frac{\alpha E}{1-\nu}\Theta_н \sigma^* \to \Theta_{н(2)} = \frac{\sigma_{пов,max}(1-\nu)}{\alpha E \sigma^*} =$$

$$= \frac{1{,}7 \cdot 0{,}8}{10^{-5} \cdot 25000 \cdot 0{,}39} = 13{,}9 \text{ °C}.$$

Для $Bi = 2{,}86$ по графикам *рис. 4* характеристические коэффициенты $A_1 = 1{,}2$ и $\mu_1 = 1{,}17$. Темп остывания

$$m_{(2)} = \frac{1{,}17^2 \cdot 0{,}0025}{0{,}5^2} = 0{,}0137 \text{ ч}^{-1}.$$

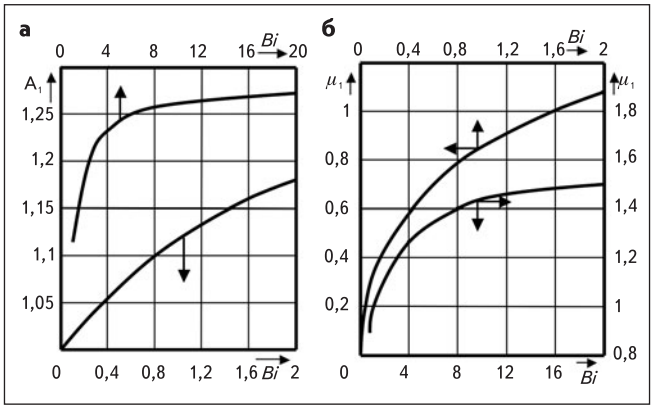


Рис. 5. *Графики $A_1 = f(Bi)$ (а) и $\mu_1 = f(Bi)$ (б) [3]*

Продолжительность остывания от температуры $\Theta_{н(1)} = 42{,}5$ °С по первому режиму (при $\alpha = 1{,}75$ Вт/(м^2·°С) и темпе остывания $m = 0{,}0042$ ч$^{-1}$) до конечной температуры первого режима, равной начальной температуре второго $\Theta_{к(1)} = \Theta_{н(2)} = 13{,}9$ °С, составит:

$$\tau_{(1)} = \frac{\ln \Theta_{унп(1)} - \ln \Theta_{к(1)}}{m} = \frac{\ln 42{,}5 - \ln 13{,}9}{0{,}0042} = 266 \text{ ч.}$$

Через 266 ч остывания по первому режиму тепловая защита может быть снята. Перепад между температурой поверхности бетона и температурой наружного воздуха составит 13,9 °С.

Продолжительность остывания от температуры $\Theta_{н(2)} = 13{,}9$ °С уже по второму режиму (при $\alpha = 10$ Вт/(м^2·°С) и темпе остывания $m = 0{,}0137$ ч$^{-1}$) до конечной температуры второго режима, равной температуре наружного воздуха $\Theta_{к(2)} = 0$ °С, составит:

$$\tau_{(2)} = \frac{\ln \Theta_{нп(2)} - \ln \Theta_{к(2)}}{m} = \frac{\ln 13{,}9 - 0}{0{,}0137} = 192 \text{ ч.}$$

Общая продолжительность остывания по обоим режимам составит 458 ч (около 19 сут).

9.2. При $\alpha = 20$ Вт/(м^2·°С) критерий Bi составит:

$$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda} = \frac{20 \cdot 0{,}5}{1{,}75} = 5{,}72,$$

соответствующее ему единичное напряжение по графику *рис. 4* равно $\sigma^* = 0{,}56$, а искомая температура $\Theta_{н(2)}$ определится по формуле (10)

$$\Theta_{н(2)} = \frac{\sigma_{пов,max}(1-\nu)}{\alpha E \sigma^*} = \frac{1{,}7 \cdot 0{,}8}{10^{-5} \cdot 25000 \cdot 0{,}56} = 9{,}7 \text{ °C}.$$

Для $Bi = 5{,}72$ по графикам *рис. 5* характеристические коэффициенты $A_1 = 1{,}24$ и $\mu_1 = 1{,}33$. Темп остывания

$$m_{(2)} = \frac{1{,}33^2 \cdot 0{,}0025}{0{,}5^2} = 0{,}0177 \text{ ч}^{-1}.$$

Продолжительность остывания от температуры $\Theta_{н(1)}$ = 42,5 °С по первому режиму (при α = 1,75 Вт/(м^2·°С) и темпе остывания m = 0.0042 ч$^{-1}$) до конечной температуры первого режима, равной начальной температуре второго $\Theta_{к(1)} = \Theta_{н(2)}$ = 9,7 °С, составит:

$$\tau_{(1)} = \frac{\ln \Theta_{унп(1)} - \ln \Theta_{к(1)}}{m} = \frac{\ln 42{,}5 - \ln 9{,}7}{0{,}0042} = 352 \text{ ч}.$$

Через 352 ч остывания по первому режиму тепловая защита может быть снята. Перепад между температурой поверхности бетона и температурой наружного воздуха составит 9,7 °С.

Продолжительность остывания от температуры $\Theta_{н(2)}$ = 9,7 °С уже по второму режиму (при α = 20 Вт/(м^2·°С) и темпе остывания m = 0,0177 ч$^{-1}$) до конечной температуры второго режима, равной температуре наружного воздуха $\Theta_{к(2)}$ = 0 °С, составит:

$$\tau_{(1)} = \frac{\ln \Theta_{нп(2)} - \ln \Theta_{к(2)}}{m} = \frac{\ln 9{,}7 - 0}{0{,}0177} = 128 \text{ ч}.$$

Общая продолжительность остывания по обоим режимам составит 480 ч, т. е. 20 сут, но выдерживание конструкции под тепловой защитой придется продлить на 352 — 266 = 86 ч.

Выводы

1. Расчетом установлено, что для бетонной конструкции с модулем поверхности $M_{пов}$ = 2 м$^{-1}$ безопасным с точки зрения предотвращения трещинообразования режимом остывания после термообработки при температуре 40 °С и температуре наружного воздуха минус 10 °С является остывание под тепловой защитой, коэффициент теплопередачи которой не превышает 1,75 Вт/(м^2·°С).

2. Возможность снятия тепловой защиты зависит от условий обветривания. При прогнозе скорости ветра до 2 м/с (коэффициент теплоотдачи открытой поверхности 10 Вт/(м^2·°С) остывание под тепловой защитой должно продолжаться до температуры 3,9 °С. Перепад между температурой поверхности бетона и температурой наружного воздуха составит 13,9 °С. Нормы (СП 70.13330) предусматривают для такого случая температурный перепад не более 20 °С.

При прогнозе скорости ветра до 5 м/с (коэффициент теплопередачи открытой поверхности 20 Вт/(м^2·°С) остывание под тепловой защитой должно продолжаться практически до 0 °С. Перепад между температурой поверхности бетона и температурой наружного воздуха составит 10 °С.

3. Регламентируемая нормами скорость остывания конструкций — не более 5 °С/ч для конструкций с модулем поверхности от 5 до 10 м$^{-1}$ и не более 10 °С/ч для конструкций с модулем поверхности свыше 10 м$^{-1}$. Для среднемассивных конструкций с модулем поверхности от 1 до 4 м$^{-1}$ такая скорость представляется на один-два порядка более высокой, чем реализуется на площадке. Действительно, из проделанного расчета видно, что продолжительность остывания здесь исчисляется сотнями часов, и средняя скорость для режима с 1,75 Вт/(м^2·°С) составляет от 0,045 до 0,15 °С/ч. Сам по себе такой параметр, как скорость остывания, представляется не совсем корректным, так как, во-первых, скорость остывания интенсивно изменяется в течение всего периода охлаждения (температура поверхности быстро снижается в начальный период и замедляется по ходу процесса, а температура центра, наоборот, вначале снижается медленно, постепенно ускоряясь и вновь замедляясь ближе к завершению остывания), и неясно о скорости остывания какой точки и в какой момент времени можно судить. Если иметь в виду скорость остывания, то можно говорить лишь о средней скорости остывания в течение всего процесса, но контролировать такой параметр практически невозможно, оставляя его полезным лишь в целях планирования. С этой точки зрения более представительной явилась бы средняя температурная точка сечения (в пластине — на расстоянии 0,43R от поверхности), где температура в любой момент времени, по крайней мере, на стадии регулярного режима, равна средней температуре сечения.

4. В условии приведенного примера оговорено, что остывающая конструкция является слабоармированной (μ_A < 0,01) и поэтому рассчитывается, как бетонная. Дело в том, что предельно допустимые перепады между температурой поверхности и температурой наружного воздуха нормами СП 70.13330 дифференцированы в зависимости от процента армирования в довольно широких пределах — от 20 до 50 °С. Учет степени армирования сечения осуществляется введением повышающего коэффициента ($5\mu_a n + 1$) к прочности бетона при растяжении [9].

Если бы рассмотренная выше конструкция имела коэффициент армирования μ = 0,02, то расчет (здесь не приводится) показал бы следующие результаты:

- принимаемая прочность при растяжении 1,7(5 · 0,02 · 8 + 1) ≈ 3 МПа ($n = E_A/E_{бет}$ = 200000/25000 = 8);
- по завершении термообработки безопасный коэффициент теплопередачи поверхности α = 3,5 Вт/(м^2·°С), что при безветренной погоде позволяет

снять тепловое ограждение сразу после прогрева. Если же прогнозируется ветер скоростью порядка 5 м/сек (т. е. $\alpha = 20$ Вт/(м^2·°С), то тепловое ограждение $\alpha = 3{,}5$ Вт/(м^2·°С) должно оставаться в течение 87 ч до достижения поверхностью бетона температуры 19,2 °С, после чего может быть снято и процесс охлаждения до температуры наружного воздуха завершится через 196 ч;

• общая продолжительность остывания составляет 283 ч, что почти на 200 ч меньше по сравнению со слабоармированной конструкцией.

5. Предлагаемая методика не ограничивается тепловым расчетом среднемассивных конструкций и может быть в равной степени использована для конструкций с модулем поверхности 5—10 м$^{-1}$ и выше.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абелев М. Ю.* Аварии фундаментов промышленных и гражданских сооружений. М. : ГАСИС, 2011. 76 с.
2. *Харитонов В. А.* Проектирование, строительство и эксплуатация высотных зданий. М. : АСВ, 2018. 346 с.
3. Руководство по производству бетонных работ в зимних условиях, районах Дальнего Востока, Сибири и Крайнего Севера. М. : Стройиздат, 1982. 313 с.
4. *Тимошенко С. П., Гудьер Дж.* Теория упругости. М. : Наука, 1975. 576 с.
5. *Лыков А. В.* Теория теплопроводности. М. : Гостехиздат, 1952. 600 с.
6. *Кондратьев Г. М.* Регулярный тепловой режим. М. : Гостехиздат, 1954. 408 с.
7. *Красновский Б. М.* Инженерно-физические основы методов зимнего бетонирования. М. : ГАСИС, 2007. 509 с.
8. *Олейник П. П., Жадановский Б. В., Кужин М. Ф.* [и др.]. Возведение монолитных конструкций зданий и сооружений. М. : МИСИ–МГСУ, 2018. 494 с.
9. *Трапезников Л. П.* Температурная трещиностойкость массивных бетонных сооружений. М. : Энергоатомиздат, 1986. 272 с.
10. *Кусаинов М.* Мины замедленного действия в строительном производстве. Астана : Сарыарка, 2009. 336 с.

REFERENCES

1. Abelev M. Yu. *Avarii fundamentov promyshlennyh i grazhdanskih sooruzhenij* [Design, construction and operation of high-rise buildings]. Moscow, GASIS Publ., 2011. 76 p. (In Russian).
2. Haritonov V. A. *Proektirovanie, stroitel'stvo i ekspluataciya vysotnyh zdanij* [Design, construction and operation of high-rise buildings]. Moscow, ASV Publ., 2018. 346 p. (In Russian).
3. *Rukovodstvo po proizvodstvu betonnyh rabot v zimnih usloviyah, rajonah Dal'nego Vostoka, Sibiri i Krajnego Severa* [Guide to the production of concrete works in winter conditions, regions of the Far East, Siberia and the Far North]. Moscow, Strojizdat Publ., 1982. 313 p. (In Russian).
4. Timoshenko S. P., Gud'er Dzh. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 576 p. (In Russian).
5. Lykov A. V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity]. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1952. 600 p. (In Russian).
6. Kondrat'ev G. M. *Regulyarnyj teplovoj rezhim* [Regular heat regime]. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1954. 408 p. (In Russian).
7. Krasnovskij B. M. *Inzhenerno-fizicheskie osnovy metodov zimnego betonirovaniya* [Engineering and physical bases of winter concreting methods]. Moscow, GASIS Publ., 2007. 509 p. (In Russian).
8. Olejnik P. P., Zhadanovskij B. V., Kuzhin M. F., et al. *Vozvedenie monolitnyh konstrukcij zdanij i sooruzhenij* [Construction of monolithic structures of buildings and stru]. Moscow, MISI–MGSU, 2018. 494 p. (In Russian).
9. Trapeznikov L. P. *Temperaturnaya treshchinostojkost' massivnyh betonnyh sooruzhenij* [Temperature crack resistance of massive concrete structures]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 272 p. (In Russian).
10. Kusainov M. *Miny zamedlennogo dejstviya v stroitel'nom proizvodstve* [Delayed-action mines in construction production]. Astana, Saryarka Publ., 2009. 336 p. (In Russian).

Для цитирования: *Абелев М. Ю., Красновский Б. М.* Особенности зимнего бетонирования среднемассивных монолитных фундаментов высотных зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 10. С. 78—86. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.10.78-86.

For citation: Abelev M. Yu., Krasnovskiy B. M. Features of Winter Concreting of Medium-Mass Monolithic Foundations of High-Rise Buildings. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2020, no. 10, pp. 78—86. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2020.10.78-86.