

УДК 693.54

Научная специальность: 2.1.7 Технология и организация строительства

## **ЗИМНЕЕ БЕТОНИРОВАНИЕ МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ: ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ, НАБОР ПРОЧНОСТИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ**

Комаров Евгений Вячеславович

*Автономная некоммерческая организация высшего образования «Московский университет «Синергия», Москва, Россия*

e-mail: Komarov131415@inbox.ru

### **Аннотация**

Рассмотрены технологические принципы зимнего бетонирования монолитных конструкций при отрицательной температуре воздуха. Показана связь теплового режима, гидратации цемента и набора ранней прочности. Сопоставлены метод термоса и электротермообработка; приведены расчетные зависимости для теплового баланса, зрелости бетона и мощности нагрева. Рассмотрены размещение температурных датчиков и подтверждение прочности перед распалубливанием. Предложен практический алгоритм выбора режима выдерживания с учетом геометрии элемента, температуры наружного воздуха и состава бетонной смеси.

**Ключевые слова:** зимнее бетонирование, монолитные конструкции, бетон, низкие температуры, электропрогрев, метод термоса, зрелость бетона, температурный контроль, прочность бетона, противоморозные добавки.

## **COLD-WEATHER CONCRETING OF CAST-IN-PLACE STRUCTURES: THERMAL REGIME, STRENGTH DEVELOPMENT AND PROCESS CONTROL**

Komarov Evgeny Vyacheslavovich

*Autonomous Non-Profit Organization of Higher Education «Moscow University «Synergy», Moscow, Russia*

e-mail: Komarov131415@inbox.ru

### **Abstract**

The paper considers the main principles of cold-weather concreting of cast-in-place structures at subzero ambient temperatures. The relationship between thermal regime, cement hydration and early-age strength is discussed. The thermos method and electrical heating are compared, and calculation approaches to heat balance, concrete maturity and heating power are presented. Sensor placement and strength verification before formwork removal are considered. A practical procedure for selecting the curing regime with regard to member geometry, ambient temperature and concrete mixture is proposed.

**Keywords:** cold-weather concreting, cast-in-place structures, concrete, low temperature, electrical heating, thermos method, concrete maturity, temperature monitoring, concrete strength, antifreeze admixtures.

### **Введение**

Монолитное строительство в холодный период отличается от летнего производства работ не только необходимостью защищать свежесуложенный бетон от замерзания. При снижении температуры резко замедляются гидратация цемента и формирование структуры цементного камня, а при замерзании свободной воды на ранней стадии возникают внутренние напряжения, которые способны нарушить еще слабые связи между продуктами гидратации и заполнителем. После последующего оттаивания реакция цемента частично возобновляется, однако повреждения ранней структуры могут оказаться необратимыми и

проявиться снижением прочности, повышенной проницаемостью и ухудшением морозостойкости [6; 10].

Цель статьи – систематизировать инженерные принципы зимнего бетонирования монолитных конструкций и показать, как связаны тепловой расчет, выбор способа выдерживания, контроль температуры и подтверждение фактической прочности. Основное внимание уделяется не перечислению технологий, а критериям их выбора и типовым причинам технологических отказов.

### **Обсуждение**

Набор прочности портландцементного бетона обусловлен гидратацией клинкерных минералов и формированием пространственной структуры гидратных новообразований. Скорость этих процессов существенно зависит от температуры. При положительных, но низких температурах твердение продолжается, однако медленнее; при переходе воды в лед подвижность ионов и возможность нормального протекания реакций резко ограничиваются. Современные обзоры холодного бетонирования отмечают, что при охлаждении бетонной смеси примерно до  $-2,8^{\circ}\text{C}$  гидратация в практическом смысле почти прекращается вследствие замерзания значительной части затворяющей воды [7].

СП 70.13330.2012 рассматривает зимнее бетонирование как технологический процесс, режим которого должен обеспечивать получение требуемых свойств бетона и качество конструкции [1]. В нормативной логике выбор способа выдерживания зависит от наружной температуры, массивности элемента, состава бетона, доступной энергии и требуемого темпа работ. Приложения к своду правил содержат указания по выбору экономичных методов зимнего выдерживания, а журнал бетонных работ фиксирует фактические данные производства.

Принципиально важно различать проектную прочность бетона и прочность, необходимую для конкретной технологической операции. До распалубливания, передачи монтажной нагрузки, снятия временных опор или допуска замораживания могут требоваться различные уровни прочности. Контроль должен отвечать именно на вопрос, достигнут ли установленный для текущей операции порог, а не заменяться общей фразой «бетон прогревался трое суток».

Любой вариант зимнего выдерживания описывается единым тепловым балансом. Тепло в бетон поступает от нагретых исходных материалов, экзотермии гидратации и внешних источников, а убывает через опалубку, укрытия, открытые поверхности, основание, а также при конвективном теплообмене с наружным воздухом. Метод термоса ориентирован на использование накопленного и гидратационного тепла конструкции в процессе выдерживания. Электротермообработка, в свою очередь, вводит управляемый внутренний или поверхностный источник, а тепляк – уменьшает перепад температур между конструкцией и средой.

Далее принимается упрощенная постановка расчета средней температуры элемента. При таком допущении ее изменение выражают через баланс тепловой мощности – как соотношение поступающего и отводимого тепла. Иными словами, рассматривается средняя температура элемента, для которой суммарное действие внутренних и внешних тепловых потоков записывают в форме единого балансового соотношения в каждый момент времени:

$$m c \frac{dT}{dt} = Q_{\text{hyd}} + Q_{\text{ext}} - U A (T - T_a) \quad (1)$$

где  $m$  – масса прогреваемого бетона, кг;

$c$  – его удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C);

$T$  – средняя температура бетона, °C;

$t$  – время, с;

$Q_{\text{hyd}}$  – тепловыделение гидратации, Вт;

$Q_{\text{ext}}$  – мощность внешнего нагрева, Вт;  $U$  – приведенный коэффициент теплопередачи через опалубку и утепление, Вт/(м²·°C);

$A$  – охлаждаемая поверхность, м²;

$T_a$  – температура окружающего воздуха, °C.

В этой записи каждая величина сохраняет свой физический смысл, а баланс – связь между накоплением тепла и его расходом.

Формула (1) объясняет, по какой причине одинаковая электрическая мощность приводит к разным результатам в тонкой стене и массивной фундаментной плите. У тонкого элемента отношение охлаждаемой поверхности к объему велико, поэтому тепловые потери относительно запасенного тепла оказываются высокими. В массивной конструкции, напротив, собственная экзотермия цемента заметнее воздействует на температурный режим, и задача прогрева смещается: вместо недогрева может возникнуть недопустимый перепад температуры между ядром и поверхностью.

Метод термоса предполагает укладку бетонной смеси с положительной температурой в утепленную опалубку; далее используется начальный тепловой запас и теплота гидратации. Его преимущество состоит в том, что в зоне бетонирования не требуется сложное электрооборудование, а энергоемкость остается сравнительно низкой. Но результат здесь существенно зависит от массивности конструкции, наружной температуры, активности цемента и фактического сопротивления теплопередаче укрытия – именно этим определяется основной недостаток способа.

Для термосного выдерживания наиболее благоприятны массивные фундаменты, толстые стены и иные элементы с малым модулем поверхности. У тонких плит, колонн малого сечения и ребристых конструкций собственное тепловыделение часто не покрывает теплотери, возникающие при охлаждении. По этой причине термос применяют как часть комбинированной технологии: предварительно повышают температуру смеси, вводят ускоряющие или противоморозные добавки, усиливают утепление конструкции и, если это требуется, подключают дополнительный прогрев.

Электрический прогрев используют в тех случаях, когда пассивного тепла недостаточно либо необходимо сократить продолжительность выдерживания. На строительных площадках применяют нагревательные провода, электродный прогрев, греющую опалубку и различные контактные нагреватели; набор средств варьирует, но принцип остается общим. Их общая задача – подвести тепло к бетону с управляемой интенсивностью и исключить локальное превышение температуры.

Нагревательные провода дают сравнительно равномерное распределение тепла при правильном шаге раскладки и удобны для стен, плит, колонн и узлов сложной формы. Технологический риск связан с повреждением кабеля при армировании и бетонировании, пересечением участков, локальным уменьшением шага и неправильным подключением секций. Схема раскладки должна быть зафиксирована до укладки бетонной смеси, поскольку после бетонирования визуальная проверка становится невозможной.

Зимняя технология начинается с состава смеси. Чем ниже водоцементное отношение при обеспеченной удобоукладываемости, тем меньше свободной воды и тем быстрее достигается ранняя прочность. Это не означает, что смесь следует делать неоправданно жесткой: плохое уплотнение создает крупные поры и дефекты, которые перекрывают ожидаемый эффект от снижения В/Ц. Требуемая подвижность должна обеспечиваться рациональным подбором гранулометрии и пластифицирующих добавок.

Противоморозные добавки понижают температуру замерзания жидкой фазы и/или ускоряют твердение, но не отменяют расчет теплового режима. Их действие зависит от химической природы, дозировки, температуры и состава цемента. Неправильное применение может изменить сроки схватывания, вызвать высолообразование, увеличить риск коррозии арматуры или привести к непредсказуемому набору прочности. Поэтому конкретная добавка должна применяться по утвержденному регламенту и совместимости с используемыми материалами.

В зимних условиях одна и та же календарная выдержка может приводить к разной прочности: бетон при  $+15^{\circ}\text{C}$  и бетон, значительную часть времени находившийся при  $+2^{\circ}\text{C}$ , за трое суток развиваются по-разному. Метод зрелости связывает температурно-временную историю с развитием прочности и позволяет оценивать состояние бетона

непосредственно в конструкции. Он особенно полезен для решения оперативных задач – распалубки, перестановки опор, начала последующего цикла и прекращения обогрева [8].

Наиболее известна функция Нерса–Сола, в которой температурно-временной фактор определяется суммированием превышения фактической температуры над условной базовой температурой:

$$M(t) = \sum (T_a - T_0) \Delta t \quad (2)$$

где  $M(t)$  – температурно–временной фактор, °C·ч или °C·сут;

$T_a$  – средняя температура бетона за интервал  $\Delta t$ , °C;

$T_0$  – базовая температура, при которой развитие прочности принимается прекращающимся;

$\Delta t$  – продолжительность интервала.

Простота функции Нерса–Сола делает ее удобной для строительного контроля, но она предполагает линейную температурную чувствительность, что не всегда точно на широком диапазоне температур. Более физически обоснован эквивалентный возраст на основе уравнения Аррениуса. В общем виде его можно записать как:

$$t_e = \sum \exp \left[ \left( \frac{E_a}{R} \right) \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_a} \right) \right] \Delta t \quad (3)$$

где  $t_e$  – эквивалентный возраст при эталонной температуре;

$E_a$  – кажущаяся энергия активации процесса твердения, Дж/моль;

$R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·K);

$T_r$  – эталонная абсолютная температура, K;

$T_a$  – средняя абсолютная температура бетона за интервал, K.

Ключевое ограничение метода зрелости состоит в том, что математический индекс сам по себе не является прочностью. Для конкретного рабочего состава должна быть установлена экспериментальная кривая «прочность – зрелость».

ASTM C1074 предусматривает такую калибровочную логику [9], а обзор D. Miller, N. M. Но и N. Talebian показывает широкое применение метода для контроля распалубки, предварительного напряжения, массивного бетона и других операций [8].

Температурные датчики следует размещать не только там, где их проще установить, но и там, где ожидаются экстремальные режимы. Для тонкой стены это могут быть верхняя кромка, угол и центральная зона; для плиты – поверхность у края, центр по толщине и зона над холодным основанием; для массивного фундамента – ядро и несколько точек поверхности. Если контролируется только одна средняя точка, локальное переохлаждение или перегрев останется незамеченным.

Для активного прогрева установленная мощность должна компенсировать теплопотери и обеспечить заданный темп изменения температуры. В простой инженерной оценке средняя требуемая мощность может быть представлена как сумма мощности на нагрев бетона и текущих потерь:

$$P_{req} \approx m c \frac{\Delta T}{\tau} + U A (T_m - T_a) - Q_{hyd} \quad (4)$$

где  $P_{req}$  – требуемая средняя мощность нагрева, Вт;

$\Delta T$  – требуемое изменение средней температуры бетона, °C;

$\tau$  – время разогрева, с;

$T_m$  – расчетная средняя температура в период выдерживания; остальные обозначения соответствуют формуле (1).

Формула (4) подчеркивает две возможности экономии энергии: уменьшить теплопотери или сократить избыточный температурный уровень. На практике первое часто эффективнее. Дополнительный слой сухого утеплителя, защита торцов и устранение продувания снижают требуемую мощность без ускорения процессов высушивания. Повышение же температуры на несколько градусов увеличивает потери почти пропорционально разности температур между бетоном и наружным воздухом.

Распалубливание относится к числу наиболее ответственных операций зимнего цикла. Допущенная ошибка может не вызвать немедленного разрушения, однако

впоследствии привести к чрезмерным прогибам, трещинам или повреждению кромок. Требуемый уровень прочности определяется работой конкретного элемента, схемой временных опор и последовательностью последующего нагружения, поэтому универсальный календарный срок – «двое суток прогрева» – не может рассматриваться как достаточный критерий.

Практически надежная схема контроля объединяет несколько источников информации: результаты испытаний контрольных образцов по ГОСТ 10180–2012 [5], зарегистрированную температурную историю конструкции, расчет зрелости по калиброванной зависимости и визуально–инструментальный контроль качества поверхности. При ответственных конструкциях, как представляется, могут использоваться и дополнительные неразрушающие методы, но их результаты также требуют установленной корреляции с прочностью. И здесь ключевое условие – сопоставимость косвенных показателей с фактическим набором прочности бетона.

Разработка режима начинается с анализа исходных данных: прогнозируемой температуры и ветра, геометрии элемента, характеристик опалубки, состава бетона, температуры поставки, доступной электрической мощности и требуемого срока оборота опалубки. Затем оценивают теплопотери и способность конструкции использовать собственное тепло гидратации; после этого выбирают базовый способ выдерживания. На практике именно эта последовательность – от параметров среды и смеси к тепловой оценке – задает логику дальнейшего расчета.

Следующий этап включает расчет температурной кривой: температуры к окончанию укладки, темпа разогрева, рабочего диапазона выдерживания, продолжительности активной стадии и допустимого охлаждения. Одновременно назначают точки измерения и частоту регистрации, поскольку контроль должен охватывать наиболее чувствительные зоны элемента. Для каждого датчика необходимо заранее понимать, какой риск он контролирует – недогрев, локальный перегрев или чрезмерный температурный перепад.

Зимнее бетонирование следует рассматривать как управляемый процесс твердения. В этом процессе тепловой режим должен обеспечивать достижение требуемой прочности без раннего замораживания, локального перегрева и резкого охлаждения. Выбор метода термоса, электрического прогрева или комбинированной схемы определяется геометрией элемента, наружной температурой, свойствами смеси и условиями теплообмена, а сама технология – по нашему мнению – должна соотноситься с реальным режимом работы конструкции.

Температурный мониторинг и калиброванный метод зрелости связывают фактическую историю выдерживания с набором прочности и позволяют обоснованно принимать решения о прекращении обогрева, распалубливании и нагружении. Практическая надежность режима достигается сочетанием теплового расчета, теплоизоляции, контролируемого нагрева и подтверждения прочности бетона; именно такая схема снижает риск ошибочных технологических решений. Отсюда следует и главный вывод – оценка режима должна опираться не на календарный срок, а на подтвержденное состояние материала.

### Литература

1. СП 70.13330.2012. СНиП 3.03.01-87 Несущие и ограждающие конструкции (с изменениями и дополнениями, действующими на 07.10.2026). – М.: Минстрой России. – URL: <https://base.garant.ru/483424314/> (дата обращения: 07.10.2026).
2. СП 63.13330.2018. СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения (с изменениями и дополнениями). – М.: Минстрой России, 2018. – URL: <https://base.garant.ru/72230218/> (дата обращения: 07.10.2026).
3. ГОСТ 7473-2010. Смеси бетонные. Технические условия. – Введ. 01.01.2012. – М.: Стандартинформ, 2012. – URL: <https://protect.gost.ru/gost/details/fd47b526-d233-40ef-a03b-70d7199e1a97> (дата обращения: 07.10.2026).

4. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – Введ. 01.07.2013. – М.: Стандартиформ, 2013. – URL: <https://protect.gost.ru/gost/details/21f8b4ca-b5cf-4d4f-a2da-066262b992b6> (дата обращения: 07.10.2026).

5. Wang Y. A review of concrete exposed to low-temperature environments at early ages: mechanical properties and durability / Y. Wang, Z. Wu, X. Zheng, K. Li, C. Liu // Journal of Building Engineering. – 2025. – DOI: 10.1016/j.jobbe.2025.113122.

6. Miller D. Monitoring of in-place strength in concrete structures using maturity method – An overview / D. Miller, N.M. Ho, N. Talebian // Structures. – 2022. – Vol. 44. – P. 1081-1104. – DOI: 10.1016/j.istruc.2022.08.077.

7. ASTM C1074. Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method. – ASTM International, West Conshohocken, PA.

8. Huang D. Research on mechanical properties and durability of early frozen concrete / D. Huang, Y. Feng, Q. Xia, J. Tian, X. Li // Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 425. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135988.

9. ACI 306R-16. Guide to Cold Weather Concreting. – Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2016.