

**НОРМАТИВНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ МЕТОДОВ
ТЕМПЕРАТУРНО-ПРОЧНОСТНОГО КОНТРОЛЯ БЕТОНА****УТЕПОВ Е. Б.^{1,2}, ТУЛЕБЕКОВА А. С.^{1,2}, КАЗКЕЕВ А. Б.^{1,3}, ОШАН М. М.²**¹ ТОО «CSI Research & Lab», 010000, Нур-Султан, Казахстан² Евразийский Национальный университет имени Л.Н. Гумилева, 010000, Нур-Султан, Казахстан³ Государственный университет имени Шакарима, 070000, Семей, Казахстан

Аннотация. Метод зрелости является подходом к контролю качества бетона, который прогнозирует прочность на месте, основываясь на внутренней температуре. Известно, в процессе твердения бетона происходит процесс гидратации цемента. В результате этого процесса цемент затворяется водой, из-за чего выделяется энергия. В таком случае температура и влажность являются основными характеристиками для контроля прочности бетона. Степень зрелости зависит от изменяющихся условий твердения путем измерения и регистрации внутренней температуры бетона с помощью специальных датчиков и регистров, встроенных в момент укладки бетона. Сегодня данный подход широко используется во всем мире. Однако существуют и другие методы расчетов, регламентированные в стандартах других стран. Данная статья посвящена анализу существующих методов температурно-прочностного контроля бетона. В статье приведен перечень нормативной документации, регламентирующий данные требования, обсуждаются особенности, преимущества и недостатки. Также авторы обосновывают необходимость формирования унифицированного подхода к температурно-прочностному контролю бетона.

Ключевые слова: прочность, температура твердения бетона, контроль прочности, напряжение, техническое регулирование.

**БЕТОНДЫ ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ-БЕРІКТІК БАҚЫЛАУ ӘДІСТЕРІН
НОРМАТИВТІК РЕТТЕУ****УТЕПОВ Е. Б.^{1,2}, ТУЛЕБЕКОВА А. С.^{1,2}, КАЗКЕЕВ А. Б.^{1,3}, ОШАН М. М.²**¹ «CSI Research & Lab» ЖШС, Нұр-Сұлтан, Қазақстан² Л. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық университеті, 01000, Нұр-Сұлтан, Қазақстан³ Шәкәрім атындағы мемлекеттік университеті, 070000, Семей, Қазақстан

Аңдатпа. Кемелдену әдісі – бұл бетонның сапасын бақылаудың тәсілі, ол ішкі температураға негізделген жерде беріктікті болжайды. Бетонды қатайту процесінде цементті ылғалдандыру процесі жүретіні белгілі. Осы процестің нәтижесінде цемент сумен жабылады, соның салдарынан энергия шығады. Бұл жағдайда температура мен ылғалдылық бетонның беріктігін бақылаудың негізгі сипаттамалары болып табылады. Жетілу дәрежесі бетонның ішкі температурасын өлшеу және бетон төсеу кезінде салынған арнайы сенсорлар мен регистрлердің көмегімен өлшеу және тіркеу арқылы өзгеретін қатайту жағдайларына байланысты. Бүгінгі таңда бұл тәсіл бүкіл әлемде кеңінен қолданылады. Алайда басқа елдердің стандарттарында реттелетін басқа есептеу әдістері бар. Бетонның температурасын және беріктігін бақылаудың қолданыстағы әдістерін талдауға арналған. Мақалада осы талаптарды реттейтін нормативтік құжаттаманың тізімі берілген, ерекшеліктері, артықшылықтары мен кемшіліктері талқыланады. Сондай-ақ авторлар бетонның температурасын және беріктігін бақылауға бірыңғай көзқарас қалыптастыру қажеттілігін негіздейді.

Түйінді сөздер: беріктік, бетонның қатаю температурасы, беріктікті бақылау, кернеу, техникалық реттеу.

NORMATIVE REGULATION OF METHODS OF TEMPERATURE AND STRENGTH CONTROL OF CONCRETE

UTEPOV Y.B.^{1,2}, TULEBEKOVA A.S.^{1,2}, KAZKEYEV A.B.^{1,3}, OSHAN M.M.²

¹ «CSI Research & Lab» LLP, 010000, Nur-Sultan, Kazakhstan

² L. Gumilyov Eurasian National University, 010000, Nur-Sultan, Kazakhstan

³ Shakarim State University, 070000, Semey, Kazakhstan

Abstract. *The maturity method is an approach to concrete quality control that predicts the in-situ strength based on internal temperature. It is known that the cement hydration process takes place during the hardening of concrete. This process causes the cement to become waterlogged, due to which energy is released. Temperature and moisture are then the main characteristics to control the strength of concrete. The degree of maturity depends on the changing curing conditions by measuring and recording the internal temperature of the concrete using special sensors and registers embedded in the concrete at the time of placement. This approach is now widely used all over the world. There are, however, other methods of calculation regulated in the standards of other countries. The following article is devoted to the analysis of existing methods of temperature and strength control of concrete. A list of normative documents regulating these requirements is given in the article, the features, advantages and disadvantages are discussed. Also the authors justify the necessity of formation of the unified approach to temperature-strength control of concrete.*

Keywords: *strength, concrete curing temperature, strength control, stress, technical regulation.*

Введение

Бетон набирает необходимую прочность постепенно в процессе твердения. Знание и понимание внешних и внутренних характеристик твердения бетона, таких как относительная влажность и температура, позволяет определить полную картину о наборе прочности бетона. Поэтому очень важно определять с высокой точностью значение прочности этого материала перед использованием изделий или конструкций в строительстве.

Определение фактической прочности бетона непосредственно в строительных конструкциях является сложной технической задачей. Эту задачу можно решить только путем использования косвенных величин, связанных с прочностью.

Развитие теоретических и экспериментальных исследований в области контроля качества привело к появлению значительного количества методов оценки прочности бетона. Каждый из существующих методов имеет определенную область применения, свои достоинства и недостатки. Контроль прочности бетона по результатам испытаний на сжатие образцов кубов не может полностью удовлетворять работников лабораторий, проектиров-

щиков и строителей, потому что результаты испытаний образцов не всегда отражают действительную прочность бетона в изделиях и конструкциях [1].

В ряде случаев контроль прочности бетона путем испытания стандартных образцов создает определенные трудности. Например, часто возникает необходимость дополнительно определить прочность бетона в более поздние сроки, чем предполагалось ранее; однако отсутствие контрольных образцов не позволяет это сделать. Также прочность бетона конструкции проверяют путем высверливания из нее цилиндров (кернов) с последующим испытанием их на сжатие. Обычно в лабораторию доставляют керны с неправильными основаниями, поэтому перед испытаниями на сжатие их необходимо выровнять, залить цементным раствором и подшлифовать. Подготовленные цилиндры испытывают на сжатие на гидравлическом прессе. Для определения марки бетона полученную прочность цилиндров размером умножают на коэффициент 0,8. Однако этот метод нельзя применять для испытания бетона некоторых сборных железобетонных конструкций из-за малой толщины и высокого процента армирования.

Такие конструкции надо испытывать неразрушающими методами [2].

Методы определения прочности бетона

Существует ряд механических и физических методов, позволяющих определить прочность бетона в различных местах железобетонных изделий и конструкций без их разрушения. В этих методах используются различные приборы, основанные на принципе получения пластической деформации поверхности бетона путем заглубления в него бойка (шарика) при ударе с определенной силой, а также на принципе упругого отскока от поверхности бетона и получения значения упругой деформации [3].

К физическим относят акустические методы и проникающих излучений. Их принципиальное отличие от рассмотренных ранее заключается в том, что они позволяют судить о качестве бетона и других строительных материалов не только по поверхностному слою, но и по внутренней структуре. В акустических методах косвенной характеристикой прочности и однородности является скорость распространения по материалу волн упругих колебаний. Ультразвуковой метод заключается в регистрации скорости прохождения УЗ волн. По технике проведения испытаний можно выделить сквозное УЗ прозвучивание, когда датчики располагают с разных сторон тестируемого образца, и поверхностное прозвучивание, когда датчики расположены, с одной стороны [4].

Наиболее важной является проблема нахождения градуировочных зависимостей, потому что без этих зависимостей все данные, полученные ультразвуковым методом не являются наглядными и доказательными. Градуировочную зависимость между скоростью распространения ультразвука и прочностью бетона на сжатие определяют предварительно для конкретного состава бетона. Это связано с тем, что применение градуировочных зависимостей для бетонов других или неизвестных составов может привести к ошибкам в определении прочности. На зависимость «прочность бетона - скорость ультразвука» влияют следующие факторы, колебания кото-

рых нужно учитывать при применении ультразвукового метода контроля [4]:

- количество и зерновой состав заполнителя;
- изменение расхода цемента более чем на 30%;
- способ приготовления бетонной смеси;
- степень уплотнения бетона;
- напряженное состояние бетона.

Ультразвуковой метод позволяет осуществлять массовые испытания изделий любой формы многократно, вести непрерывный контроль нарастания или снижения прочности. Недостатком метода является погрешность при переходе от акустических характеристик к прочностным. При использовании ультразвукового метода определения прочности бетона на результаты оказывают влияние слишком много факторов, которые необходимо учесть с помощью градуировочных зависимостей. Например, учет влажности.

В последние годы отмечается значительный рост применения прогнозирования прочности бетона, основанные на современных технологиях, таких как встроенные датчики и сенсоры, машинное обучение и искусственный интеллект. Эти методы особенно эффективны в случае нелинейной взаимосвязи между различными параметрами системы, как и в поведении параметров бетона [5–7].

Наиболее адаптированным для этой цели в настоящее время является метод температурно-прочностного контроля, базирующегося на взаимосвязи температуры бетона и времени его выдерживания (температуро-часы). Превышение нормы уровня температурного напряжения могут вызвать появление трещин, что крайне недопустимо.

Стандарты по методам температурно-прочностного контроля бетона

Температура бетонной смеси – один из важных технологических показателей качества бетонной смеси. При контроле прочности бетона различными измерительными системами передача информации о текущей температуре идет в измерительный прибор. Полученные значения температур бетона и времени их замеров используют для расчета

текущей прочности бетона. Расчеты могут быть выполнены следующими методами [8]:

- 1) по температурным графикам;
- 2) по зрелости;
- 3) по аналитическим зависимостям.

Методы температурно-прочностного контроля бетона регламентированы в нормах и стандартах, принятых в разных странах, представленных в таблице 1.

Таблица 1. Стандарты по методам температурно-прочностного контроля бетона [9]

Стандарт		Страна
ASTM C1074	Standard Practice for Estimating Concrete Strength by Maturity Method	USA
ASTM C918	Standard Test Method for Measuring Early-Age Compressive Strength and Projecting Later-Age Strength	
ACI 318- 6.2	Building Code Requirement for Structural Concrete and Commentary	
ACI 228.1R	In-place Methods to Estimate Concrete Strength	
ACI 306R	Guide to Cold Weather Concreting	
AASHTO T325	Standard Method of Test for Estimating the Strength of Concrete in Transportation Construction by Maturity Tests.	
CSA A23.1/A23.2	Concrete Materials and Methods of Concrete Construction/Test Methods and Standard Practice for Concrete	Канада
NCH 170	Hormigon- Requisitos generales (Concrete- General requirements	Южная Африка
EN 206-1: 2002	Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity	Европа
BS EN 1367	Execution of concrete structures	
NEN 5970	Determination of Strength of Fresh Concrete with the Method of Weighted Maturity	
СТ-НП СРО ССК-04-2013	Температурно-прочностной контроль бетона при возведении монолитных конструкций в зимний период	Россия

Стандарт ASTM регламентирует, что выделяют 4 этапа использования метода расчета текущей прочности бетона по его зрелости [10]:

- 1) Установление зависимости зрелость-прочность (в лабораторных условиях);
- 2) Встраивание датчиков зрелости внутрь опалубки (на строительной площадке);
- 3) Считывание датчиками показателей зрелости бетона (на строительной площадке);
- 4) Анализ данных.

Для расчета индекса зрелости применяется такое выражение, как функция зрелости.

Функция зрелости - математическое выражение, которое использует измеренную историю температуры цементной смеси в течение периода твердения для расчета индекса, указывающего на зрелость в конце этого периода. Используя рассчитанный индекс зрелости и соотношение прочности и зрелости, оценивается прочность бетона [10] .

Есть две альтернативные функции для вычисления индекса зрелости на основе измеренной температурной истории бетона. Одна

функция зрелости используется для вычисления температурно-временного коэффициента, следующим образом по формуле [10]:

$$M(t) = \sum (T_c - T_0) \Delta t \quad (1)$$

Где $M(t)$ - температурно-временной фактор при возрасте t , градус-дни или градус-часы;

Δt - временной интервал, дни или часы;

T_c - средняя температура бетона за промежуток времени, Δt , ° C;

T_0 - базовая температура.

Этот подход предполагает, что скорость развития прочности является линейной функцией температуры. Чтобы вычислить температурно-временной коэффициент, необходимо знать соответствующее значение базовой температуры для конкретных материалов и условий.

Базовая температура представляет собой температуру, ниже которой не происходит реакция гидратации цемента, от чего сильно зависит набор прочности. Базовая температура может зависеть от типа цемента, типа и дозировки примесей или других добавок,

влияющих на скорость гидратации, а также от температурного диапазона, который будет испытывать бетон при твердении.

Результатом использования формулы 1 является график зависимости прочности от температурно-временного показателя.

Другая функция зрелости предполагает, что скорость развития прочности подчиняется экспоненциальному уравнению Аррениуса, которая используется для вычисления эквивалентного возраста при указанной температуре следующим образом [10]:

$$t_e = \sum e^{-Q(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_3})\Delta t} \quad (2)$$

t_e - эквивалентный возраст при указанной температуре T_3 , дней или час,

Q - энергия активации, деленная на газовую постоянную, К

T_c - средняя температура бетона за промежуток времени, Δt ,

T_3 - заданная температура, К,

Δt - временной интервал, дни или часы.

Эквивалентный возраст - количество дней или часов при заданной температуре, необходимых для достижения зрелости, равной зрелости, достигаемой за время твердения при температуре, отличающейся от заданной.

Предположение о том, что скорость развития прочности подчиняется уравнению Аррениуса, приводит к функции зрелости, приведенной в уравнении (2), которая используется для вычисления эквивалентного возраста при заданной температуре. Для вычисления эквивалентного возраста необходимо знать энергию активации для конкретных материалов и условий. Показано, что энергия активации зависит от типа цемента, вида и дозировки примесей, влияющих на скорость развития прочности, а также от соотношения воды и цементных материалов. Для других условий и когда требуется максимальная точность оценка прочности, соответствующее значение Q может быть определено экспериментально.

В зарубежной практике из-за сложности расчета эквивалентный возраст используется реже по сравнению с температурно-временным показателем.

Некоторые типы инструментов зрелости,

которые вычисляют температурно-временной фактор, могут не использовать соответствующую базовую температуру и, следовательно, не указывать истинное значение этого фактора. Значение температурно-временного коэффициента, отображаемого прибором, может быть скорректировано для базовой температуры следующим образом [11]:

$$M_c = M_d - (T_0 - T_d)t \quad (3)$$

M_c - скорректированный температурно-временной коэффициент, градус-дни или градус-часы;

M_d - температурно-временной коэффициент, отображаемый прибором, градус-дни или градус-часы;

T_0 - соответствующая исходная температура для бетона, °С;

T_d - базовая температура, заложенная в прибор;

t - время, прошедшее с момента включения прибора до момента снятия показаний, дни или ч.

После использования метода расчета прочности бетона по его зрелости, следующий этап осуществляется следующим образом: когда зрелость достигает значения, которое равно или больше требуемого, значение записывается, при необходимости проверяется правильность его значения. Перед выполнением критических операций, таких как снятие опалубки или последующее натяжение, необходимо дополнительно определить зрелость бетона с помощью других тестов, чтобы убедиться, что бетон в конструкции имеет достаточную прочность.

Российский стандарт СТ-НП СРО ССК-04-2013 [8] содержит требования по контролю с использованием термопар, термометров, пирометров или термодатчиков с передачей информации о текущей температуре бетона в измерительный прибор. Полученные значения температур бетона и времени их замеров используют для расчета текущей прочности бетона. Расчеты могут выполняться по нескольким методам: по температурным графикам (Рисунок 1), по зрелости бетона, по аналитическим зависимостям.



Рис. 1 – Схема расчета по температурным графикам

Заключение

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что наиболее стандартизированным является метод зрелости. История исследования эффективности его использования началась еще в 1950 году. Идея, состоявшая в том, чтобы разработать метод оценки эффективности «обработки паром» на развитие прочности, сегодня претерпела поправки и позволила модифицировать и повысить точность оценки прочности бетона.

Сегодня метод зрелости рассматривается как полезное и простое средство для определения влияния времени и температуры на развитие прочности. Однако, и другие методы имеют свои особенности и возможности. Поэтому формирование унифицированного подхода к ТПКБ является актуальным вопросом и позволит достигнуть высокое качество и долговечность бетонных и железобетонных конструкций.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант № AP08956209).

ЛИТЕРАТУРА

1. Malek J., Kaouthar M. Destructive and non-destructive testing of concrete structures // Jordan J. Civ. Eng. 2014. Vol. 8, № 4. P. 432–441.
2. Зубков В.А. Определение прочности бетона. 1998. № Москва. P. 120.
3. Улыбин А.В. О выборе методов контроля прочности бетона построенных сооружений // Инженерно-строительный журнал. 2011. Vol. 4. P. 10–15.
4. ГОСТ 17624-2012. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности. 2012.
5. N.J. Carino H.S.L. The maturity method: from theory to application // P.C. Chang. D.C. Washingt. (Eds.), Proc. 2001 Struct. Congr. 2001.
6. N.J. Carino, H.S. Lew C.K.V. Early age temperature effects on concrete strength prediction by the maturity method, // J. Am. Conc. Inst. 1982. Vol. 80, № 2. P. 93–101.
7. Rudeli N., Santilli A., Arrambide F. Striking of vertical concrete elements: An analysis using the maturity method // Eng. Struct. 2015. Vol. 95. P. 40–48.

8. СТ–НП СРО ССК–04–2013. Температурно–прочностной контроль бетона при возведении монолитных конструкций в зимний период. 2013. P. 25.
9. Giatec. The best concrete sensor in 2020 [Electronic resource]. 2020. URL: <https://www.giatecscientific.com/education/the-best-concrete-sensors-2020/> (accessed: 07.10.2020).
10. ASTM C918. Standard Test Method for Measuring Early–Age Compressive Strength and Projecting Later–Age Strength. 2019. P. 12.
11. ASTM C1074-17. Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method. 1998.

REFERENCES

1. Malek J., Kaouther M. Destructive and non-destructive testing of concrete structures // Jordan J. Civ. Eng. 2014. Vol. 8. № 4. P. 432–441.
2. Zubkov V.A. Opredeleniye prochnosti betona. 1998. № Moskva. P. 120.
3. Ulybin A.V. O vybere metodov kontrolya prochnosti betona postroyennykh sooruzheniy // Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal. 2011. Vol. 4. P. 10–15.
4. GOST 17624-2012. Betony. Ultrazvukovoy metod opredeleniya prochnosti. 2012.
5. N.J. Carino H.S.L. The maturity method: from theory to application // P.C. Chang, D.C. Washingt. (Eds.). Proc. 2001 Struct. Congr. 2001.
6. N.J. Carino. H.S. Lew C.K.V. Early age temperature effects on concrete strength prediction by the maturity method. // J. Am. Conc. Inst. 1982. Vol. 80. № 2. P. 93–101.
7. Rudeli N., Santilli A., Arrambide F. Striking of vertical concrete elements: An analysis using the maturity method // Eng. Struct. 2015. Vol. 95. P. 40–48.
8. ST–NP SRO SSK–04–2013. Temperaturno–prochnostnoy kontrol betona pri vozvedenii monolitnykh konstruktsiy v zimniy period. 2013. P. 25.
9. Giatec. The best concrete sensor in 2020 [Electronic resource]. 2020. URL: <https://www.giatecscientific.com/education/the-best-concrete-sensors-2020/> (accessed: 07.10.2020).
10. ASTM C918. Standard Test Method for Measuring Early–Age Compressive Strength and Projecting Later–Age Strength. 2019. P. 12.
11. ASTM C1074-17. Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method. 1998.

Information about authors:

1. Utepov Yelbek Bakhitovich – PhD, associate professor, Head of R&D Department, CSI Research & Lab LLP, Eurasian National University named after L.N. Gumilyov
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6723-175X>
Email: utepov-elbek@mail.ru
2. Tulebekova Assel Serikovna – PhD, Senior Researcher, R&D Department, CSI Research & Lab LLP, Eurasian National University named after L.N. Gumilyov
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8553-3081>
Email: krasavka5@mail.ru
3. Kazkeyev Alizhan Baurzhanuly – Master of Engineering, Junior Researcher, R&D Department, CSI Research & Lab LLP, Shakarim State University of Semey city
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6591-7440>
Email: alizhan7sk@gmail.com
4. Oshan Madina Maksatkyzy – Master student, Eurasian National University named after L.N. Gumilyov
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9736-4366>
Email: madina_16.96@mail.ru