

Оценка прочности монолитного бетона по температурно-временным зависимостям

Д.Н.Коротких^{1,2}, В.А. Дорф², Д.Е. Капустин^{1,2}

¹*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва*

²*Акционерное общество «Институт «Оргэнергострой», Москва*

Аннотация: Рассмотрена проблема контроля прочности бетона при использовании несъемной опалубки. Приведены результаты анализа опыта использования для прогнозирования и оценки прочности бетона в процессе его твердения зависимостей прочности бетона от температурно-временных параметров, включая пределы применения предлагаемых зависимостей. Установлено, что методы оценки прочности бетона в конструкции по его зрелости позволяют эффективно контролировать прочность бетона конструкций, бетонируемых в несъемной опалубке, когда нет доступа к поверхности бетона для осуществления неразрушающего контроля. Даются рекомендации по использованию температурно-временных зависимостей для прогнозирования прочности бетона и используемой аппаратуре для реализации метода, представленной на отечественном рынке.

Ключевые слова: неразрушающие методы контроля прочности бетона, температурно-временные параметры, прогнозирование прочности, зрелость.

В проектах атомных электростанций (АЭС) нового поколения для ускорения процесса строительства и снижения трудоемкости предусмотрено бетонирование железобетонных конструкций в несъемной опалубке – сталефибробетонной и металлической [1, 2]. Контроль прочности укладываемого в эти конструкции монолитного бетона по контрольным образцам не позволяет получить его адекватную оценку из-за существенных различий в условиях твердения бетона в образце и в конструкции, а использование стандартизованных методов неразрушающего контроля затруднено из-за отсутствия доступа к поверхности бетона [3].

В такой ситуации для контроля и оценки прочности бетона возможно использование температурно-временных зависимостей. Использование такого подхода достаточно широко распространено за рубежом [4-6]. Такие зависимости применяются и в отечественном строительстве [7], в том числе, и при строительстве АЭС (Руководящие указания по контролю качества

строительно-монтажных работ при строительстве АЭС с блоками ВВЭР-1000).

При описании температурно-временных зависимостей используют комплексный температурно-временной параметр, называемый «зрелостью» (Maturity), который оценивают в градусо-часах или в градусо-сутках. Разработку этого подхода связывают, прежде всего, с именами американских специалистов Карино, Нёрса и Сола [5]. Предложенная ими зависимость (1) для определения температурно-временного параметра включена в ASTM C1074–19 (Методика оценки прочности бетона методом зрелости):

$$M(t) = \sum_0^t (T - T_o) \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где $M(t)$ – температурно-временной фактор (индекс зрелости) в возрасте t , градусо-часы или градусо-сутки;

T – средняя температура бетона в интервале времени Δt , °С;

T_o – опорная температура (прекращение гидратации цемента), °С;

t – время твердения бетона, ч или сут;

Δt – интервал времени, внутри которого температуру принимают постоянной, час или сут.

Прочность на основании показателя зрелости рассчитывают, как и при любом косвенном методе, по заранее построенной градуировочной зависимости. Использование зависимости (1) предполагает, что рост прочности бетона пропорционален температуре с момента его схватывания. Если температура твердения бетона варьируется в широких пределах, то это предположение становится не совсем верным. Тем не менее, зависимость (1) применяется на практике в силу ее простоты и приемлемой точности. В работе [8] описано применение этой зависимости в дорожном строительстве Австралии. Установлено, что ошибка предсказания прочности данным методом, как правило, не превышала 10 %.

В работе [9] рассмотрены варианты для случаев, когда прочность бетона связывается с показателем зрелости логарифмической, гиперболической или, оптимально, экспоненциальной зависимостью. Для большинства экспериментов коэффициент детерминации, характеризующий тесноту связи для нелинейной зависимости, превышал 0,8. Кроме того, модель хорошо описывала прочность бетона в раннем возрасте.

В большинстве случаев лучшие результаты для прогнозирования прочности по сравнению с формулой (1) дает зависимость (2), базирующая на известном в физической химии законе Аррениуса, в которой зрелость определяется на основе эквивалентного возраста. Эта зависимость также включена в ASTM C1074–19:

$$t_e = \sum_0^t e^{\left(-\frac{E}{R}\right) \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s}\right)} \cdot \Delta t ,$$

(2)

где: t_e – эквивалентный возраст бетона при температуре T_s , ч или сут;

T - средняя абсолютная температура бетона в интервале времени Δt , К;

T_s – опорная температура, К;

E - энергия активации, Дж/моль;

R - универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К ($R=8,314$ Дж/моль·К);

Для получения более точных значений параметров T_0 в формуле (1) и $\frac{E}{R}$ в формуле (2) в стандарте ASTM C1074-2019 предусмотрено их экспериментальное определение путем испытания образцов-кубов из мелкозернистого бетона, изготовленного на том же вяжущем, с тем же В/Ц и добавками, как и в бетоне, укладываемом в конструкцию. Испытания кубов в ASTM C1074-2019 предлагается проводить в возрасте 0,5; 1; 2; 4; 8; 16 и 32 суток при твердении при трех значениях температуры, например, 12, 23 и 32 °С. Полученные результаты необходимо обработать достаточно сложной

программой на базе метода наискорейшего спуска для нахождения констант, используя формулу (3):

$$S = S_u \left(\frac{k \cdot (t - t_0)}{1 + k \cdot (t - t_0)} \right),$$

(3)

где S – расчетная прочность кубов на сжатие в возрасте t , МПа;

S_u – предельная прочность, МПа;

t_0 – возраст, в котором бетон начинает набирать прочность, сут;

k – константа скорости набора прочности, 1/сут.

Точность оценки прочности бетона зависит, прежде всего, от температурного режима твердения бетона в раннем возрасте.

Шиндлер [10] предложил рассчитывать энергию активации на основе данных о химико-минералогическом составе цемента. Для бетонов на цементе без минеральных добавок он дал формулу (4):

$$E = 22,100 \cdot p_{C_3A}^{0,30} \cdot p_{C_4AF}^{0,25} \cdot S^{0,35},$$

(4)

где: p_{C_3A} – доля минерала C_3A в цементе по массе;

p_{C_4AF} – доля минерала C_4AF в цементе по массе;

S – удельная поверхность цемента по Блейну, м²/кг.

В случае применения цементов с добавками золы-уноса и молотого гранулированного доменного шлака значение энергии активации, рассчитанное по формуле (4), следует умножить на поправочный коэффициент f_E , рассчитываемый по формуле (5):

$$f_E = 1 - 1,05 \cdot p_{FA} \left(1 - \frac{p_{FACao}}{0,40} + 0,40 \cdot p_{slag} \right)$$

(5)

где: p_{FA} – массовая доля замены клинкера золой – уноса;

p_{FACao} – массовая доля CaO в золе-уноса;

p_{slag} - массовая доля замены клинкера молотым гранулированным доменным шлаком.

Для прогнозирования прочности бетона в раннем возрасте рекомендуется использовать стандарт ASTM C918/C918M–20 (Стандартный метод испытаний для определения прочности на сжатие в раннем возрасте и прогнозирования прочности в более позднем возрасте), в котором дана формула (6):

$$S_M = S_m + b (\log M - \log m) \quad (6)$$

где: S_M – расчетная прочность бетона при индексе зрелости M ;

S_m – измеренная прочность при индексе зрелости m ;

b – угловой коэффициент, устанавливаемый экспериментально по регрессионной зависимости;

M – индекс зрелости при стандартных условиях твердения;

m – индекс зрелости при испытании бетона в раннем возрасте.

Согласно имеющимся сведениям [10], внутрилабораторный коэффициент вариации для этого метода составляет 3,6 %.

В голландских нормах NEN 5970 (nl) (Определение прочности свежего бетона методом взвешенной зрелости) введено понятие взвешенной зрелости в течение одного часа и предложено учитывать для определения зрелости содержание в бетоне портландцементного клинкера. Для этого используется эмпирическая формула (7):

$$R_g = 10 \cdot \left(C^{(0,1 \cdot T - 1,245)} - C^{-2,245} \right) / l_n C \quad (7)$$

где: R_g – взвешенная зрелость в течение одного часа, °С·ч;

T – средняя температура в течение этого часа, °С;

C –коэффициент, учитывающий содержание цементного клинкера, принимаемый по Таблице 1.

Таблица № 1

Величина коэффициента C по формуле (7)

Содержание портландцементного клинкера, %	C
Свыше 65	1,3
50 - 64	1,4
35 - 49	1,5
20 - 34	1,6

Предлагаемые зависимости достаточно широко исследовались для оценки пределов их применения и использовались на практике в различных областях строительства.

В работе [11] были приведены результаты исследований использования зависимостей (1) и (2) и еще ряда описанных в литературе формул для бетона класса В50 на портландцементе и портландцементе с минеральными добавками при температуре до +50 °С. На основе этих опытов оценивалась точность формул. Наихудшие результаты были получены для линейной формулы (1). Наличие повышенной температуры в раннем возрасте отрицательно сказывалось на точности всех формул.

В работе [12] даны рекомендации по адаптации ASTM C1074-19 к строительству шоссежных дорог. Авторы показали, что для дорожного строительства применимы расчеты с использованием формул (1) и (2), но первая формула предпочтительней в силу ее большей простоты. Опорную температуру T_o следует выбирать с учетом скорости набора бетоном прочности. Для ответственных случаев необходимо выполнение лабораторных экспериментов, а также испытание образцов, изготовленных на месте бетонирования. Полученные зависимости прочности от зрелости следует проверять по экспериментальным данным. Расчет этих зависимостей рекомендуется выполнять в логарифмической шкале, используя программу Excel.

В опубликованном техническом отчете [13] убедительно продемонстрирована возможность оценки прочности бетона по его зрелости. Показана наибольшая эффективность применения при прогнозировании прочности бетона гиперболической функции для градуировочной зависимости.

В Руководящих указаниях по контролю качества строительно-монтажных работ при строительстве АЭС с блоками ВВЭР-1000, разработанных АО «Институт «Оргэнергострой», температурно-временная зависимость прочности бетона дана в табличной форме для конкретных цементов, что упрощает методику контроля, но сужает сферу ее эффективного применения.

В ГОСТ 22783-2022 (Бетоны. Методы прогнозирования прочности на сжатие) использована логарифмическая зависимость прочности бетона от зрелости, построенная для нормальных условий твердения, на которую накладываются поправки на зрелость бетона при его прогреве до 40 °С, что делает подход далеким от универсальности.

В работе [14] на основе теоретического анализа и экспериментальных исследований показано, что энергия активации, вопреки закону Аррениуса, меняется при изменении температуры твердения бетона, причем степень изменения зависит от водоцементного отношения, типа вяжущего и наличия химических и минеральных добавок. Поэтому предложено энергию активации рассчитывать на основе регрессионного анализа экспериментальных данных.

В работе австралийских специалистов [8] акцентировано, что место измерения температуры бетона зависит от целей контроля. Для оценки распалубочной прочности и сроков окончания термообработки бетона датчики температуры следует устанавливать вблизи поверхности блока

бетонирования. Для оценки прочности бетона предварительно напряженных конструкций датчики температуры следует устанавливать в анкерной зоне.

Основная информация о применимости зависимостей прогнозирования прочности бетона по его зрелости сведена в таблицу 2. Отмечена хорошая сходимость результатов численного прогнозирования прочности бетона с ее фактическим значением. Следовательно, рассмотренный метод прогнозирования прочности бетона можно рекомендовать к применению, однако требуется разработка соответствующих нормативных документов.

Таблица № 2

Основные характеристики температурно-временных зависимостей

Формула	Наличие нормативного документа	Рекомендации по применению, преимущества и недостатки	Значение входящих в формулу величин*	Погрешность*
(1)	ASTM C1074-19	Дает хорошие результаты в раннем возрасте. Преимущество – простота. Формула (1) предпочтительнее формулы (2) в силу простоты; имеется опыт применения в дорожном строительстве [9]	$T_o = -10$ °C [5]; $T_o = -5$ °C для возраста 28 сут и -10 °C для возраста 7 сут [15]; $T_o \geq 4$ °C [12];	$R^2 = 0,976$ [6] бетон В25 в возрасте до 28 сут; $R^2 \geq 0,8$ [9]; $R^2 = 0,9-1,0$ [13]; Ошибка прогнозирования не более 10 % [8]
(2)	ASTM C1074-19	Дает хорошие результаты при возрасте бетона не менее 1 суток [1], в более раннем возрасте имеет существенную погрешность	$T_s = 293$ К в Европе, $T_s = 296$ К в Северной Америке [5]; $E = 33500$ Дж/моль при T_c не ниже 20 °C и $E = 33500 + 1,47(20 - T_c)$ при $T_c > 20$ °C [12]	$R^2 = 0,9-0,99$ [16] для мелкозернистых бетонов В25, В35, В45

Формула	Наличие нормативного документа	Рекомендации по применению, преимущества и недостатки	Значение входящих в формулу величин*	Погрешность*
(6)	ASTM C918/C918 M-20	Используется для прогнозирования прочности только в раннем возрасте	-	Внутрिलाбораторный коэффициент вариации 3,6 %

* T_o - опорная температура в °С, T_s - то же в К;
E – энергия активации
 R^2 - коэффициент детерминации

Резюмируя результаты проведенного анализа методов прогнозирования и оценки прочности бетона в конструкциях по его зрелости, можно отметить следующее:

– рассмотренные методы позволяют оценить и контролировать в реальном времени прочность бетона в конструкции при отсутствии доступа к поверхности бетона;

– использование методов зрелости, как и других косвенных методов, требует построения градуировочной зависимости для каждого состава бетона и при этом для более точной формулы (2) нахождение констант градуировочной зависимости требует использования достаточно сложной компьютерной обработки [17, 18];

– точность оценки зависит от диапазона температуры твердения, особенно при высоких температурах, что не учитывается при построении градуировочной зависимости;

– для практических целей наиболее подходит относительно простой метод ASTM C918/C918M–20, пригодный для оценки прочности бетона в достаточно раннем возрасте;

– использование для определения зрелости метода ASTM C1074-19 на основе эквивалентного возраста дает более точную оценку прочности, за

исключением раннего возраста, но метод на основе температурно-временного фактора более прост в применении.

Средства измерения и мониторинга температуры

Реализация методов контроля прочности бетона по температурно-временным зависимостям требует измерять температуру в большом количестве точек конструкции в течение достаточно длительного времени. Современные средства измерения и их программное обеспечение позволяют осуществлять онлайн мониторинг температуры по температурным датчикам, установленным в конструкцию до ее бетонирования.

Для измерения и мониторинга температуры в настоящее время достаточно широко применяются отечественные приборы Терем-3.2, КТБ-1 (НПП «Интерприбор») и система мониторинга ConcreteOn (ООО «Эталон»), в которых температура измеряется термодатчиками, установленными заранее в конструкцию. Отличием системы ConcreteOn является то, что связь датчиков с регистрирующим модулем беспроводная, тогда как в двух других устройствах они подключаются к регистрирующему блоку с помощью кабеля.

Терем-3.2 предназначен для регистрации температуры и позволяет передавать сохраненные данные из прибора в персональный компьютер при помощи специальной программы связи.

КТБ-1 снабжен смартфоном, в программу которого заложена функция вычисления индекса зрелости бетона в соответствии с ASTM C1074-19 (по формуле (1)) с использованием истории изменения температуры бетона во времени, зарегистрированной прибором. Для оценки прочности в память прибора вводится градуированная зависимость прочности R от индекса зрелости M , устанавливаемая заранее на образцах по методике ASTM C1074-19 как линейная функция $R=f(\ln M)$. Можно также ввести значение опорной температуры (по умолчанию принятой равной $0\text{ }^{\circ}\text{C}$).

В систему ConcretON также заложен алгоритм расчета прочности бетона по ASTM C1074-19 (по формуле (1)) с использованием заранее построенной на основании контрольных испытаний бетона в лаборатории градуировочной зависимости и определённой в лаборатории опорной температуры. Для удобства восприятия данных в системе реализован процесс визуализации графиков набора прочности, изменения температуры и показателя влажности бетона для каждой точки контроля с обозначением ее места расположения в бетонируемой зоне. Кроме того, реализована система оповещения пользователя в случаях выявления отклонений от требований по выдерживанию бетона в конструкциях – при возникновении отклонений от требований по выдерживанию бетона система предупреждает пользователя о наличии таковых и дает возможность принять оперативные корректирующие меры. Система ConcretOn позволяет дополнительно оценивать температурные напряжения в различных участках железобетонной конструкции, что ценно с точки зрения обеспечения температурной трещиностойкости бетона.

Выводы

1) Методы оценки прочности бетона в конструкции по его зрелости по ASTM C1074-19 и его аналогам позволяют эффективно контролировать бетон конструкций, бетонируемых в несъемной опалубке, когда нет доступа к поверхности бетона для осуществления неразрушающего контроля.

2) Методы оценки прочности бетона в конструкции по его зрелости обладают приемлемой для практических целей точностью при низкой трудоемкости. Коэффициент детерминации градуировочных зависимостей во всех публикациях был, в основном, не ниже 0,9. Для оценки зрелости можно использовать оба метода, регламентированных ASTM C1074-2019, базирующихся на формулах (1) и (2).

3) Для приближенной оценки прочности бетона при известном составе цемента можно использовать значения энергии активации, рассчитанные по методу Шиндлера [10] - формулы (3) и (4). Для более точной оценки прочности бетона следует экспериментально определять энергию активации по методу ASTM C1074-19, однако это определение достаточно трудоемкое и требует сложной машинной обработки результатов.

Для контроля прочности бетона в производственных условиях можно рекомендовать автоматизированные системы, в частности, приборы Терем-3.2 и КТБ-1 или систему мониторинга бетона ConcretON.

Литература

1. Коротких Д.Н., Корнев О.А., Белов В.В., Силантьев А.С., Капустин Д.Е. Обзор опыта возведения АЭС с применением модульных конструкций с внешним листовым армированием // Вестник МГСУ. – Том 19. – Выпуск 10. – 2024. – с. 1696-1712. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1696-1712

2. Красновский Р.О., Капустин Д.Е., Зейд Килани Л.З. Верификация расчетной модели железобетонных конструкций с комбинированным армированием при работе на осевое сжатие // Инженерный вестник Дона, 2022, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2022/8061/.

3. Абрашитов В.С., Капустин Д.Е., Капустин А.Е. Статистический подход к определению количества измерений при проведении инструментального обследования строительных конструкций // Инженерный вестник Дона, 2021, №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7101.

4. Mohammed S. Ibrahim, Mohamed A. Moustafa. Assessment and Development of the Maturity Method as a Quality Control Method for Ultra High-Performance Concrete. Third International Interactive Symposium on Ultra High-Performance Concrete 2023. Paper No: 68, pp.1-8.

5. Carino N.J., Lew H.S. The maturity method: from theory to application. Proceedings of 2001 Structures Congress & Exposition, May 21-23, 2001, Washington, D.C. ASCE, Reston, Virginia, 2001, 19 p.
 6. Utepov Y., Aniskin A., Tulebekova A., Aldungarova I., Zharassov S., Sarsembayeva A.. Complex maturity method for estimating the concrete strength based on curing temperature and relative humidity. Applied Sciences, 2021, 11, 7712. doi.org/10.3390/app11167712
 7. Миронов С.А. Теория и методы зимнего бетонирования. М., Стройиздат, 1975. 700 с.
 8. Papworth F., Thomas T., Gardiner D., Cousin R. Proposed recommended practice on maturity measurement for insitu strength assessment as a means to indicate times for curing cessation, stressing, stripping and loading, 2018, p.12. URL: academia.edu.
 9. James Wilde W. Development of a concrete maturity test protocol, Center for transportation research and implementation Minnesota State University, Mankato 342 Trafton Science Ctr N Mankato, MN 56001. URL: lrrb.org/pdf/201310.pdf
 10. Schindler A.K. Effect of temperature on hydration of cementitious materials. ACI Materials Journal, v.101, No.1, 2004, pp.72-81.
 11. Soutsos M., Canavaris F., Hatzitheodorou A. Critical analysis of strength estimates from maturity functions. Case studies in construction materials, 9, 2018, e00183, pp.1-19.
 12. Wade S. A., Schindler A. A., Barnes R.W., Nixon J. M. Evaluation of maturity method to estimate concrete strength. Alabama department of transportation, ALDOT Research Project, 930-590, 2006, 307 p.
 13. Tikalsky P., Tepke D., Camisa S., Soltesz S. Maturity method demonstration, Oregon Department of Transportation Federal Highway
-

Administration Research Unit, Report No. FHWA-OR-DF-04-01, 2003, URL: odot.state.or.us/tddresearch.

14. Zhang J.Y., Cusson D., Monteriro P., Harvey J. New perspective of maturity method and innovative approach for high performance concrete application. *Journal of cement and concrete research* 38, 12, pp. 1438-1446, 2008-12-01.

15. Ebensperger L., Oyarzún J. C., Torres R. Determination of the datum temperature for applying maturity in cold weathers. *Rev. ing. constr.* vol.35 no.1 Santiago abr. 2020. URL: [dx.doi.org/10.4067/S0718-50732020000100084](https://doi.org/10.4067/S0718-50732020000100084)

16. Pehlivan A. O., Yazgan A. U. Testing of maturity methods for concrete quality cured using various temperatures. *International Journal of Engineering Technologies - IJET* Pehlivan and Yargan, vol.7, No.1, 2021, pp.1-8.

17. Carufel S., Fahim A., Ghods P., Alizadeh A. *Concrete Maturity - From Theory to Application*. E-book, Giatec, Ottawa, 2018, 68 p.

18. Brooks A.G., Schindler A. K., Barnes R.W. Maturity Method Evaluated for Various Cementitious Materials, *Journal of Materials in Civil Engineering* © ASCE / December 2007 / pp.1017-1025

References

1. Korotkih D.N., Kornev O.A., Belov V.V., Silant'ev A.S., Kapustin D.E. *Vestnik MGSU*. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1696-1712

2. Krasnovskij R.O., Kapustin D.E., Zejd Kilani L.Z. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2022. №12 .URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2022/8061/.

3. Abrashitov V.S., Kapustin D.E., Kapustin A.E. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2021. №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7101.

4. Mohammed S. Ibrahim, Mohamed A. Moustafa. *Third International Interactive Symposium on Ultra High-Performance Concrete 2023*. Paper No: 68, pp.1-8.

5. Carino N.J., Lew H.S. Proceedings of 2001 Structures Congress & Exposition. May 21-23. 2001. 19 p.
 6. Utepov Y., Aniskin A., Tulebekova A., Aldungarova I., Zharassov S., Sarsembayeva A. Applied Sciences. 2021. 11. 7712. URL: doi.org/10.3390/app11167712
 7. Mironov S.A. Teoriya i metody zimnego betonirovaniya [Theory and methods of winter concreting]. M., Strojizdat, 1975. 700 p.
 8. Papworth F., Thomas T., Gardiner D., Cousin R. Proposed recommended practice on maturity measurement for insitu strength assessment as a means to indicate times for curing cessation, stressing, stripping and loading, 2018, p.12 URL: academia.edu.
 9. James Wilde W. Development of a concrete maturity test protocol, Center for transportation research and implementation Minnesota State University, Mankato 342 Trafton Science Ctr N Mankato, MN 56001. URL: lrrb.org/pdf/201310.pdf
 10. Schindler A.K. ACI Materials Journal, v.101, No.1, 2004, pp.72-81.
 11. Soutsos M., Canavaris F., Hatzitheodorou A. Case studies in construction materials, 9, 2018, e00183, pp.1-19.
 12. Samuel A. Wade, Anton A. Schindler, Robert W. Barnes, Jeffery M. Nixon. Evaluation of maturity method to estimate concrete strength. Alabama department of transportation. ALDOT Research Project. 930-590. 2006. 307 p.
 13. Tikalsky P., Tepke D., Camisa S., Soltesz S. Maturity method demonstration, Oregon Department of Transportation Federal Highway Administration Research Unit. Report No. FHWA-OR-DF-04-01. 2003. URL: odot.state.or.us/tddresearch.
 14. Zhang J.Y., Cusson D., Monteriro P., Harvey J. Journal of cement and concrete research. 38. 12. pp. 1438-1446.
-



15. Ebersperger L., Oyarzún J. C., Torres R. Rev. ing. constr. vol.35 no.1 Santiago abr. 2020. URL: dx.doi.org/10.4067/S0718-50732020000100084
16. Pehlivan A. O., Yazgan A. U. International Journal of Engineering Technologies - IJET Pehlivan and Yargan, vol.7. No.1. 2021. pp.1-8.
17. Carufel S., Fahim A., Ghods P., Alizadeh A. Concrete Maturity - From Theory to Application. E-book. Giatec. Ottawa. 2018. 68 p.
18. Brooks A.G., Schindler A. K., Barnes R.W. Journal of Materials in Civil Engineering. 2007. pp.1017-1025.

Дата поступления: 14.10.2024

Дата публикации: 27.11.2024