

Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]

ISSN 0585-430X (Print)

ISSN 2658-6991 (Online)

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ[®] № 11



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1955 г. WWW.RIFSM.RU WWW.JOURNAL-CM.RU НОЯБРЬ 2023 г. (819)



Третья всероссийская научная конференция
«Строительное материаловедение:
настоящее и будущее»



Учредитель: ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»,
Адрес: 125319, г. Москва, ул. Черняховского,
д. 9, корп. 1, кв. 1

Издатель: ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»
Адрес: 125319, г. Москва, ул. Черняховского,
д. 9, корп. 1, кв. 1

Свид. о регистрации ПИ № 77-1989
ISSN 0585-430X (Print) ISSN 2658-6991 (Online)

Входит в Перечень ВАК, РИНЦ,
Russian Science Citation Index

Адрес редакции: Россия, 127434, г. Москва,
Дмитровское ш., д. 9, стр. 3

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ®

№ 11

Основан в 1955 г.

(819) Ноябрь 2023 г.

Тел.: (499) 390-87-17 mail@rifsm.ru; www.rifsm.ru; www.journal-cm.ru

Огнезащита строительных материалов и конструкций

С.В. ФЕДОСОВ, А.А. ЛАЗАРЕВ, Д.Е. ЦВЕТКОВ, В.Г. КОТЛОВ, А.Ю. КОМЛЕВ

Оценка качества пропитки древесины неорганическими антипиренами при автоклавировании..... 5

Ю.Н. КОВАЛЬ, А.С. АНДРЕЕВ, Н.З. АГАФОНОВА

Анализ применения огнезащитной композиции для деревянных конструкций..... 10

М.Г. БРУЯКО, П.А. ЛИПКА, М.С. КАЛИНИНА

Теплоизоляционные изделия на основе модифицированного пенополиуретана с огнезащитным покрытием 14

Современные бетоны

В.Г. СОЛОВЬЕВ, Е.В. МАТЮШИН, Л.И. ЕФИШОВ

Влияние вида и объемного содержания стальной фибры на прочность сверхвысокопрочного сталефибробетона при сжатии..... 20

С.С. КАПРИЕЛОВ, А.В. ШЕЙНФЕЛЬД, В.И. ТРАВУШ, Н.И. КАРПЕНКО, С.Б. КРЫЛОВ

Оценка прочностных и деформационных характеристик высокопрочных бетонов в конструкциях и динамики их изменения во времени 28

ЧОНГ ЧЫК НГУЕН, ВАН ЛАМ ТАНГ, Б.И. БУЛГАКОВ

Определение адиабатической температуры в твердеющем бетоне по разным стандартам 39

А.М. БАХРАХ, О.А. ЛАРСЕН, С.В. САМЧЕНКО

Влияние количества токопроводящего компонента на удельное электрическое сопротивление мелкозернистого электропроводного бетона 46

Н.С. СОКОЛОВ, С.Н. СОКОЛОВ, А.Н. СОКОЛОВ

Геотехническая технология строительства инженерных сооружений на структурно-неустойчивых склонах 52

Отходы в производстве строительных материалов

С.В. САМЧЕНКО, М.Г. БРУЯКО, А.М. ЕРГЕНЯН, В.А. ШВЕЦОВА

Строительный композит на основе гипсового вяжущего и гидрофобизированного борщевика Сосновского 56

ТАНГ ВАН ЛАМ, ФАМ ДЫК ЛЫОНГ, НГУЕН БА БИНЬ, Б.И. БУЛГАКОВ, С.И. БАЖЕНОВА

Газобетоны на геополимерном вяжущем из техногенных отходов 63

Founder of the journal: «STROYMATERIALY»
Address: 1, 9 Bldg. 1, Chernyakhovskogo Street,
Moscow, 125319, Russian Federation
Publisher: «STROYMATERIALY»
Advertising-Publishing Firm, OOO
Address: 1, 9 Bldg. 1, Chernyakhovskogo Street,
Moscow, 125319, Russian Federation
Registration certificate PI № 77-1989
ISSN 0585-430X (Print) ISSN 2658-6991 (Online)
Included in the list of journals of the Higher
Attestation Commission (Russia),
Russian Science Citation Index
Editorial address: 9/3 Dmitrovskoye Highway,
127434, Moscow, Russian Federation

Monthly scientific-technical and industrial journal

STROITEL'NYE MATERIALY®

№ 11

Founded in 1955 (819) November 2023

Tel.: (499) 390-87-17 mail@rifsm.ru; www.rifsm.ru; www.journal-cm.ru

Fire protection of building materials and structures

- S.V. FEDOSOV, A.A. LAZAREV, D.E. CVETKOV, V.G. KOTLOV, A.Yu. KOMLEV
Evaluation of the Quality of Wood Impregnation with Inorganic Fire Retardants During Autoclaving. 5
- Yu.N. KOVAL, A.S. ANDREEV, N.Z. AGAFONOVA
Analysis of the Application of Fire Protective Composition for Wooden Structures 10
- M.G. BRUYAKO, P.A. LIPKA, M.S. KALININA
Thermal Insulation Products Based on Modified Polyurethane Foam with Fire-Resistant Coating 14

Modern concretes

- V.G. SOLOVIEV, E.V. MATIUSHIN, L.I. EFISHOV
**Influence of Type and Volume Content of Steel Fiber on the Compressive Strength
of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete. 20**
- S.S. KAPRIELOV, A.V. SHEYNFELD, V.I. TRAVUSH, N.I. KARPENKO, S.B. KRYLOV
**Assessment of Strength and Deformation Characteristics of High-Strength Concrete
in Structures and the Dynamics of Their Changes over Time. 28**
- T.C. NGUYEN, V.L. TANG, B.I. BULGAKOV
**Determination of Adiabatic Temperature in Hardening Concrete According
to Different Standards. 39**
- A.M. BAKHRAH, O.A. LARSEN, S.V. SAMCHENKO
**Influence of the Amount of Conductive Component on the Electrical Resistivity
of Fine-Grained Electrically Conductive Concrete 46**
- N.S. SOKOLOV, S.N. SOKOLOV, A.N. SOKOLOV
**Geotechnical Technology for the Construction of Engineering Structures
on Structurally Unstable Slopes 52**

Waste in production of building materials

- S.V. SAMCHENKO, M.G. BRUYAKO, A.M. ERGENYAN, V.A. SHVETSOVA
Building Composite Based on Gypsum Binder and Sosnovsky's Hogweed 56
- TANG VAN LAM, PHAM DUC LUONG, NGUYEN BA BINH, B.I. BULGAKOV, S.I. BAZHENOVA
Aerated Concrete with Geopolymer Binder from Technogenic Waste 63
- G.R. BUTKEVICH
Integrated Development of Technogenic Resources. 70

ЧОНГ ЧЫК НГУЕН¹, канд. техн. наук, преподаватель-исследователь (trongchuc.nguyen@lqdtu.edu.vn);
 ВАН ЛАМ ТАНГ², канд. техн. наук, преподаватель-исследователь (tangvanlam@hmg.edu.vn);
 Б.И. БУЛГАКОВ³, канд. техн. наук, доцент (BulgakovBI@mgsu.ru)

¹ Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куй Дона (236 Хоанг Куок Вьет, Ханой, Вьетнам)

² Ханойский горно-геологический университет (18 Фо Виен, Дык Тханг, Бак Ту Лиём, Ханой, Вьетнам)

³ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

Определение адиабатической температуры в твердеющем бетоне по разным стандартам

Проблема термического растрескивания в массивных бетонных конструкциях до сих пор остается нерешенной. Существует много факторов, влияющих на тепловой режим в указанных бетонных конструкциях, основными из которых являются тип и содержание цемента в бетонной смеси, толщина бетонного слоя и температура окружающей среды. Однако наиболее важным фактором является причина выделения тепла. В настоящее время существует большое количество стандартов и эмпирических формул для определения происхождения источника тепла с помощью адиабатических уравнений. В данной работе приведено сравнение формул для определения адиабатической температуры в твердеющем бетоне как основы для определения теплового режима в крупногабаритных бетонных конструкциях.

Ключевые слова: бетонный массив, температурный режим твердения бетона, термонапряженное состояние, термическое трещинообразование.

Для цитирования: Нгуен Ч.Ч., Танг В.Л., Булгаков Б.И. Определение адиабатической температуры в твердеющем бетоне по разным стандартам // *Строительные материалы*. 2023. № 11. С. 39–45. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-39-45>

T.C. NGUYEN¹, Candidate of Sciences (Engineering), Lecturer-Researcher (trongchuc.nguyen@lqdtu.edu.vn);

V.L. TANG², Candidate of Sciences (Engineering), Lecturer-Researcher (tangvanlam@hmg.edu.vn);

B.I. BULGAKOV³, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor (BulgakovBI@mgsu.ru)

¹ Le Quy Don Technical University (236 Hoang Quoc Viet Street, Ha Noi, Vietnam)

² Hanoi University of Mining and Geology (18 Pho Vien, Duc Thang, Bac Tu Liem, Hanoi, Vietnam)

³ National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

Determination of Adiabatic Temperature in Hardening Concrete According to Different Standards

The problem of thermal cracking in mass concrete structures still remains unsolved. There are many factors that influence the thermal regime in these concrete structures, the main ones being the type and content of cement in the concrete mixture, the thickness of the concrete layer, and the ambient temperature. However, the most important factor is the cause of the heat generated. Currently, there are a large number of standards and empirical formulas for determining the origin of a heat source using adiabatic equations. This paper provides a comparison of formulas for determining the adiabatic temperature in hardening concrete as the basis for determining the thermal regime in large-sized concrete structures.

Keywords: mass concrete, temperature regime of concrete hardening, thermally stressed state, thermal cracking.

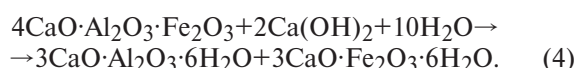
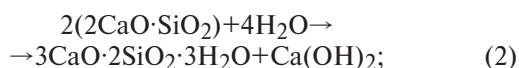
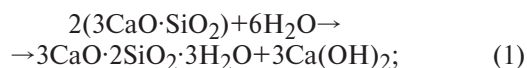
For citation: Nguyen T.C., Tang V.L., Bulgakov B.I. Determination of adiabatic temperature in hardening concrete according to different standards. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 11, pp. 39–45. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-819-11-39-45>

Выделение тепла в твердеющей бетонной смеси происходит в результате гидратации цемента или другого минерального вяжущего. В начальный период подвижная бетонная смесь находится в пластическом состоянии, имеет однородную температуру и практически не имеет прочности. В дальнейшем температура в твердеющем бетоне повышается, причем наружная поверхность бетонного массива, контактирующая с окружающей средой, остывает быстрее, чем его средняя часть, и в результате этого в твердеющем бетоне возникает перепад температуры. Средняя часть бетонного блока имеет более высокую температуру, чем его внешний слой, и поэтому локально расширяется. При этом внешний слой бетона, менее подверженный расширению, образует оболочку, которая сдерживает расширение внутреннего бетонного ядра, что приводит к возникновению термических напряжений. В массивных бетонных блоках тепловыделение может быть настолько боль-

шим, что разница температуры между средней частью и поверхностью бетона создает растягивающие напряжения, превышающие его предел прочности при растяжении в раннем возрасте, в результате чего на их поверхности появляются трещины, которые имеют тенденцию дальнейшего распространения внутрь. Возникновение трещин в бетоне нарушает целостность конструкций, снижает несущую способность, способствует коррозии арматуры, что в конечном итоге сокращает срок их службы. Поэтому определение теплоты гидратации цемента и с помощью этого прогнозирование роста температуры и появления термических напряжений в бетонных конструкциях в раннем возрасте твердения бетона необходимы для оценки опасности возникновения трещин и вызываемой ею необходимостью корректировки состава бетонной смеси, а также правильного выбора мероприятий по уходу за твердеющим бетоном [1–3].

Выделение тепла при твердении бетона в результате гидратации цемента можно контролировать и измерять [4, 5]. Изменение интенсивности тепловыделения при гидратации портландцемента показано на рис. 1.

Реакции взаимодействия с водой четырех основных минералов портландцементного клинкера описываются уравнениями [6]:

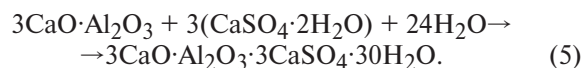


Взаимодействие с водой белита $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_2S) протекает медленнее, чем алита $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_3S), и сопровождается меньшим выделением тепла и портландита — свободного гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (CH), поэтому белит способствует росту прочности цементного камня на более поздней стадии твердения бетона. При этом продукты взаимодействия с водой алита и белита имеют сходный химический состав и состоят по массе соответственно на 61 и 82% из гидросиликатов кальция (CSH) и на 39 и 18% из гидроксида кальция [6].

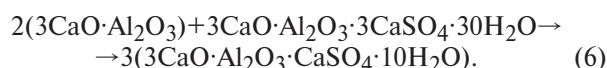
Гидросиликаты кальция имеют аморфную структуру, занимают 50–60% общего объема твердых веществ в гидратированном цементе, образуя непрерывные связи и являясь основными компонентами, придающими прочность цементному камню бетона, в то время как CH является кристаллическим, с гексагональным видом симметрии и не образует связей с другими твердыми фазами. Следовательно, свободный гидроксид кальция не сильно влияет на общую прочность цементного камня и бетона в целом.

Трехкальциевый алюминат $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) очень быстро и бурно реагирует с водой, тем самым вызывая быстрый рост температуры — термическое развитие. Реакция замедляется добавлением двуводного гипса $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, что также способствует устранению явления ложного схватывания. В резуль-

тате добавления гипса при достаточном количестве свободного гидроксида кальция в водной среде образуется эттрингит $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot (30-32)\text{H}_2\text{O}$ — трехсульфатная форма гидросульфалюмината кальция, который способствует набору прочности цементным камнем бетона. Реакцию образования эттрингита в результате взаимодействия C_3A с достаточным количеством гипса можно представить уравнением [6]:



C_3A будет продолжать реагировать с гипсом до тех пор, пока весь гипс не будет израсходован, затем начнет реагировать с эттрингитом с образованием моносульфатной формы гидросульфалюмината кальция по уравнению:



Период 1 (прединдукционный период, или стадия растворения и первичной гидратации).

Химическая реакция происходит сразу после контакта цемента с водой и его частичного растворения и приводит к образованию пленки на поверхности цементных частиц, состоящей из эттрингита и кристаллов портландита, после чего скорость реакции гидратации резко снижается из-за затруднения проникновения молекул воды под образовавшуюся пленку. Эта стадия гидратации цемента очень мало влияет на рост прочности.

Период 2 (индукционный период, или стадия покоя).

В течение этой стадии из-за экранирующего влияния образовавшейся на поверхности клинкерных частиц пленки их взаимодействие с водой будет хотя и значительно медленнее, но все-таки происходить. Это вызывает увеличение в объеме частиц клинкера, гидратируемых с поверхности внутрь, что в сочетании с ростом кристаллов эттрингита и их постепенным переходом из мелких чешуек, покрывающих поверхность частиц сплошной пленкой, в вытянутые иглообразные кристаллы, приводящим к превращению пленки в сетку, способствует надрыву этой сетки и тем самым облегчает доступ воды под надорванную сетку в глубь цементных частиц для их дальнейшей гидратации. При этом цементное тесто еще сохраняет свое пластичное состояние, что имеет решающее значение для сохранения удобоукладываемости бетонной смеси, позволяя транспортировать ее на строительную площадку и укладывать в опалубку с необходимым уплотнением. Эта стадия также не способствует росту прочности.

Период 3 (стадия ускоренной вторичной гидратации).

В цементе начинают гидратироваться и выделять тепло алит и белит. На этом этапе начинается схватывание бетонной смеси, при этом тепловыделение в результате протекания экзотермических реакций происходит быстро и с большим количеством тепла. Прочность в течение этого периода, во время кото-

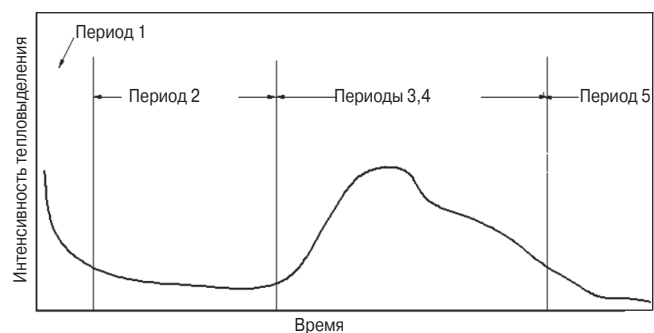


Рис. 1. Изменение интенсивности тепловыделения при гидратации портландцемента

Fig. 1. Change in heat release intensity during hydration of Portland cement

рого заканчивается схватывание бетонной смеси и начинается твердение бетона, нарастает ускоренно. Поэтому эта стадия играет очень важную роль в процессе структурирования бетона.

Период 4 (стадия замедленной вторичной гидратации).

Скорость гидротермального тепловыделения снижается, и тепловыделение переходит в управляемый диффузионный процесс. В течение этого периода увеличивается объем гидратированных цементных частиц и уменьшается площадь их негидратированной поверхности. При этом гидратированный слой действует как диффузионная поверхность и играет важную роль для дальнейшего проникновения воды, а этрингит переходит в моносульфатную форму гидросульфата алюмината кальция.

Период 5 (стадия стабилизации структуры бетона).

Гидратированный слой на поверхности цементных частиц утолщается, что значительно снижает скорость гидротермального тепловыделения, и дальнейшая гидратация цемента полностью контролируется диффузией воды.

После укладки и уплотнения бетонной смеси температура в твердеющем бетонном блоке будет постоянно повышаться из-за гидратации вяжущего, а из-за плохой теплопроводности бетона выделяющееся тепло концентрируется в центральной части бетонного блока, повышая ее температуру и вызывая возникновение разницы температуры внутри бетонного блока и на его поверхности, где температура ниже. При этом постепенно температура внутри бетонного блока будет снижаться до стабильного уровня.

Используемые материалы и методы

Определение начальной температуры бетонной смеси

Начальная температура бетонной смеси определяется с учетом температуры и содержания ее компонентов по формуле [7, 8]:

$$T_{con} = \frac{C_s(T_g \cdot W_g + T_c \cdot W_c) + T_m \cdot W_m}{C_s(W_g + W_c) + W_m}, \quad (7)$$

где T_{con} – температура бетона после смешивания с сырьевыми материалами, охлажденными до 0°C ; C_s – отношение удельных теплоемкостей цемента и заполнителя, принимаемое равным 0,2; W_g , T_g – соответственно масса в $\text{кг}/\text{м}^3$ и температура в $^\circ\text{C}$ заполнителя; W_c , T_c – то же цемента; W_m , T_m – то же воды.

Фактическая температура может быть выше рассчитанной по формуле (7) из-за влияния теплоты гидратации цемента, теплоты трения при перемешивании сырьевых материалов и механического нагрева смесителя.

Выделение тепла и адиабатическое повышение температуры бетона

Уравнение теплообмена выражается уравнением [9, 10]:

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (8)$$

где k – коэффициент проводимости теплоты в единице объема бетона, $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; q_v – скорость выделения тепловой энергии за счет гидратации цемента в единице объема, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C})$; c – удельная массовая теплоемкость, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; τ – возраст бетона на определенный момент времени, сут.

Портландцемент в основном состоит из клинкерных минералов: C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF , при взаимодействии которых с водой происходят реакции их гидролиза и гидратации, сопровождающиеся выделением тепла. В зависимости от содержания цемента в бетонной смеси и содержания в нем указанных минералов скорость протекания реакций и количество выделяемого тепла будут различны. Поскольку бетон является материалом с низкой теплопроводностью, то тепло, выделяемое в результате гидратации цемента аккумулируется в твердеющем бетонном блоке. С другой стороны, поскольку скорость тепловыделения пропорциональна отношению площади поверхности рассеивания тепла к объему бетона, скорость рассеивания тепла у массивных бетонных блоков намного ниже, чем у обычных бетонных конструкций. Поэтому можно считать, что процесс теплообмена в массивном бетонном блоке при протекании реакции гидратации цемента и твердения бетона является адиабатическим процессом. Количество теплоты, выделяющееся в результате реакции гидратации цемента, является энергией этого процесса, или, другими словами, источником тепла процесса теплообмена в бетоне. В этом случае параметр q_v в формуле (8) можно считать источником тепловыделения в единице объема твердеющего бетона. На прошедшей в 1985 г. в Японии, в г. Токио научной конференции по анализу железобетонных конструкций методом конечных элементов Танабэ предложил формулу для определения источника тепла q в твердеющем массивном бетонном блоке и математическое выражение закона повышения температуры в его сегменте (уравнения (9) и (10)), которые в 1986 г. были признаны Американским обществом инженеров-строителей (ASCE) [11–13]:

$$q = \frac{1}{24} \cdot \rho \cdot C \cdot K \cdot e^{-\frac{\alpha x \tau}{24}}; \quad (9)$$

$$T_{ad} = K \cdot (1 - e^{-\alpha x \tau}), \quad (10)$$

где q – тепловыделение в единице объема твердеющего бетона, $\text{кДж}/\text{м}^3$; ρ – средняя плотность бетона, $\text{кг}/\text{м}^3$; C – удельная массовая теплоемкость бетона, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; τ – время, сут; α – коэффициент, показывающий степень гидратации цемента; K – максимальная температура бетона в адиабатических условиях, $^\circ\text{C}$; T_{ad} – температура бетона в адиабатическом состоянии в возрасте τ сут, $^\circ\text{C}$.

Таким образом, если знать значения K и α , можно рассчитать удельное объемное тепловыделение q и исходя из этого определить температурное поле в твердеющем бетонном блоке. Однако расчет K и α затруднен, так как выделение тепла происходит

Таблица 1
Table 1

Коэффициенты для расчета
адиабатической температуры
Coefficients for calculating adiabatic temperature

Вид вяжущего	Температура бетонной смеси, °С	$T(t) = K(1 - e^{-at})$			
		$K(C) = aC + b$		$\alpha(C) = gC + h$	
		a	b	g	h
Портландцемент	10	0,12	11	0,0015	0,135
	20	0,11	13	0,0038	-0,036
	30	0,11	12	0,004	0,337
Портландцемент с частичной заменой золой-уноса ТЭС	10	0,15	-3	0,0007	0,141
	20	0,12	8	0,0028	-0,143
	30	0,11	11	0,003	0,059

Примечания: C – содержание цемента в 1 м^3 бетонной смеси; a, b, g и h – экспериментально определенные коэффициенты.

Таблица 2
Table 2

Расчетные формулы при изменении содержания цемента от 250 до 400 кг/м³
Calculation formulas for changing cement content from 250 kg/m³ to 400 kg/m³

Функции	250 кг/м ³ $X \leq 400 \text{ кг/м}^3$	
$T_{\infty} = a_{AT} + b_{AT} T_a$	$a_{AT} = 17,5 + 0,113X$	$b_{AT} = -0,146 + 3,08 \cdot 10^{-4} X$
$r_{AT} = a_{AT} + b_{AT} T_a$	$a_{AT} = -0,426 + 2,07 \cdot 10^{-3} X$	$b_{AT} = 0,0471 + 1,88 \cdot 10^{-5} X$
$s_{AT} = 1$		
$\tau_{0,Q} = a_{AT} \exp(-b_{AT} T_a)$	$a_{AT} = 0,832 - 5,31 \cdot 10^{-4} X$	$b_{AT} = 0,0482 + 6,8 \cdot 10^{-5} X$

Примечание. T_a – начальная температура бетонной смеси, °С.

Таблица 3
Table 3

Расчетные формулы при изменении содержания цемента от 400 до 550 кг/м³
Calculation formulas for changing cement content from 400 kg/m³ to 550 kg/m³

Функции	400 кг/м ³ <math>W_c < 550 \text{ кг/м}^3</math>	
$T_{\infty} = a_{AT} + b_{AT} T_a$	$a_{AT} = 40 + 0,057 W_c$	$b_{AT} = -0,146 + 3,08 \cdot 10^{-4} W_c$
$r_{AT} = a_{AT} + b_{AT} T_a$	$a_{AT} = -0,426 + 2,07 \cdot 10^{-3} W_c$	$b_{AT} = 0,0471 + 1,88 \cdot 10^{-5} W_c$
$s_{AT} = 1$		
$\tau_{0,Q} = a_{AT} \exp(-b_{AT} T_a)$	$a_{AT} = 0,832 - 5,31 \cdot 10^{-4} W_c$	$b_{AT} = 0,0482 + 6,8 \cdot 10^{-5} W_c$

в течение длительного времени и зависит от многих факторов. Результаты многих экспериментальных исследований показали, что значения K и α напрямую зависят от содержания цемента, его минерального состава и температуры бетонной смеси при ее укладке. При одинаковом цементе, с ростом его содержания в бетонной смеси и температуры смеси, значения K и α также увеличиваются. Таким образом, для снижения температуры в твердеющем бетонном блоке необходимо уменьшить содержание цемента и понизить начальную температуру бетонной смеси.

Экспериментально получены значения K и α , в зависимости от вида и содержания цемента в 1 м^3 бетонной смеси и ее температуры, можно найти в корейском стандарте [7].

Таблица 4
Table 4

Составы бетонных смесей
Compositions of concrete mixtures

Маркировка состава	Содержание сырьевых материалов, кг/м ³				
	Портландцемент	Зола-уноса ТЭС	Вода	Кварцевый песок	Щебень
M ₁	440	0	189	770	1022
M ₂	297	143	194	774	968

Таблица 5
Table 5

Расчетная адиабатическая температура бетона из смеси M₁
Calculated adiabatic temperatures of concrete from mixture M₁

$\tau, \text{ч}$	При $T_a = 10^\circ\text{C}$		При $T_a = 20^\circ\text{C}$		При $T_a = 30^\circ\text{C}$	
	По корейскому стандарту	По японскому стандарту	По корейскому стандарту	По японскому стандарту	По корейскому стандарту	По японскому стандарту
0	10	10	20	20	30	30
12	20,93	13,59	34,3	29,14	38,97	39,71
24	34,99	34,41	49,44	48,75	52,63	56,2
36	44,44	46,79	56,12	57,6	57,42	61,84
48	50,79	54,15	59,07	61,59	59,09	63,76
60	55,06	58,54	60,37	63,39	59,68	64,42
72	57,92	61,14	60,95	64,2	59,89	64,65
84	59,85	62,7	61,2	64,57	59,96	64,73
96	61,15	63,62	61,31	64,73	59,99	64,75
108	62,02	64,17	61,36	64,81	59,99	64,76
120	62,61	64,5	61,38	64,84	59,99	64,76
132	62,99	64,69	61,39	64,86	59,99	64,77
144	63,26	64,81	61,3	64,86	59,99	64,77
156	63,44	64,87	61,4	64,87	59,99	64,77
168	63,56	64,92	61,4	64,87	59,99	64,77
180	63,64	64,94	61,4	64,87	59,99	64,77
192	63,69	64,95	61,4	64,87	60	64,77
204	63,73	64,96	61,4	64,87	60	64,77
216	63,75	64,97	61,4	64,87	60	64,77
228	63,77	64,97	61,4	64,87	60	64,77
240	63,78	64,97	61,4	64,87	60	64,77

По данным Японского института бетона, температура в центре твердеющего бетонного массива в адиабатическом режиме рассчитывается по формуле (11) на основе полученных экспериментальных результатов [11, 14]:

$$T_{\tau} = T_{\infty} \cdot \left[1 - e^{-r_{AT} \cdot (\tau - \tau_{0,Q})^{s_{AT}}} \right], \quad (11)$$

где T_{τ} – адиабатическая температура бетона в возрасте τ сут, °С; T_{∞} – максимальная температура бетона в адиабатических условиях, °С; r_{AT} , s_{AT} – параметры, показывающие скорость изменения температуры;

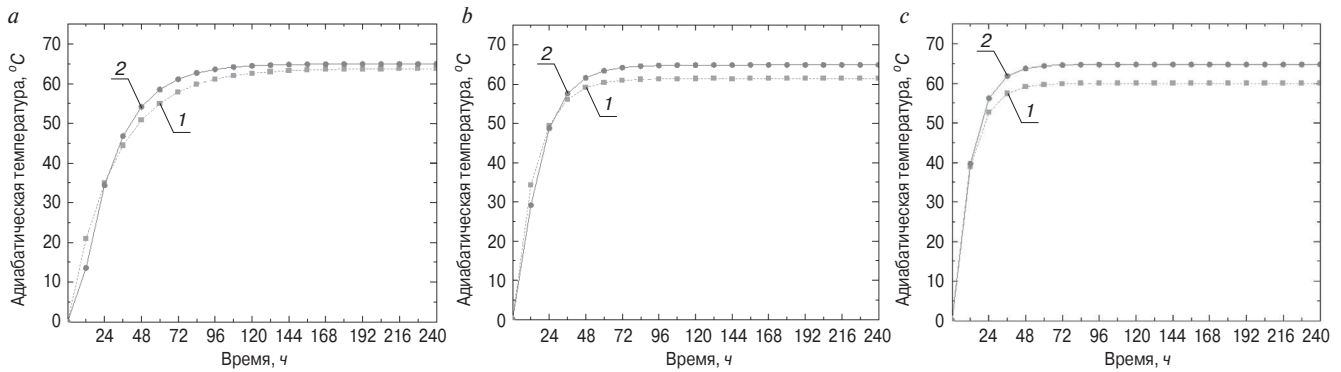


Рис. 2. Повышение адиабатической температуры бетона из смеси M1, рассчитанное по корейскому (1) и японскому (2) стандартам: *a* – при $T_a=10^\circ\text{C}$; *b* – при $T_a=20^\circ\text{C}$; *c* – при $T_a=30^\circ\text{C}$
Fig. 2. Increase in adiabatic temperature of concrete from M1 mixture, calculated according to Korean (1) and Japanese (2) standards: *a* – at $T_a=10^\circ\text{C}$; *b* – at $T_a=20^\circ\text{C}$; *c* – at $T_a=30^\circ\text{C}$

τ – возраст бетона, сут; $\tau_{0,Q}$ – время начала тепловыделения в адиабатических условиях, сут.

Величины T_∞ , r_{AT} , s_{AT} , $\tau_{0,Q}$ в формуле (11) устанавливаются в зависимости от температуры бетонной смеси при укладке и при изменении расхода цемента рассчитываются по формулам, приведенным в табл. 2 и 3.

Кроме того, в настоящее время существует множество других методов определения величины адиабатической температуры. В данной работе для определения данной величины были использованы две эмпирические формулы из корейского и японского стандартов [7, 11, 15].

Результаты и обсуждение

Для изучения адиабатического процесса с помощью расчетных формул Корейского и Японского институтов бетона, приведенных выше, рассмотрим две бетонные смеси, составы которых приведены в табл. 4: с золой-уноса ТЭС, заменяющей часть портландцемента в составе вяжущего, и без нее. Начальная температура указанных бетонных смесей T_a составляла 10, 20 и 30°C. Изготовленные из них бетонные образцы имели форму кубов размером 150×150×150 мм.

Повышение адиабатической температуры в процессе схватывания бетонной смеси состава M1 и твердения получаемого из нее бетона

Результаты расчета по корейскому и японскому стандартам повышения адиабатической температуры в процессе схватывания бетонной смеси M1 и твердения полученного из нее бетона приведены в табл. 5.

Из полученных результатов изменения адиабатической температуры во времени можно сделать следующие выводы.

Адиабатические температурные кривые бетона, полученного из бетонной смеси M1, зависят от вида и содержания вяжущего и начальной температуры бетонной смеси. При этом кривая адиабаты, рассчитанная по корейской эмпирической формуле, с ростом возраста бетона располагается ниже кривой

Таблица 6
Table 6

Расчетная адиабатическая температура бетона из смеси M2
Calculated adiabatic temperatures of concrete from mixture M2

$\tau, \text{ч}$	При $T_a=10^\circ\text{C}$		При $T_a=20^\circ\text{C}$		При $T_a=30^\circ\text{C}$	
	По корейскому стандарту	По японскому стандарту	По корейскому стандарту	По японскому стандарту	По корейскому стандарту	По японскому стандарту
0	10	10	20	20	30	30
12	11,6	18	20,52	30,91	30,81	38,35
24	16,07	27,18	26,68	39,06	31,86	44,08
36	19,84	33,68	31,12	43,49	35,81	46,48
48	23,01	38,27	34,3	45,9	38,3	47,48
60	25,69	41,52	36,59	47,22	39,88	47,9
72	27,95	43,81	38,24	47,93	40,87	48,08
84	29,85	45,43	39,42	48,32	41,49	48,15
96	31,45	46,58	40,27	48,53	41,89	48,18
108	32,8	47,39	40,88	48,64	42,14	48,19
120	33,94	47,97	41,32	48,7	42,3	48,2
132	34,9	48,37	41,63	48,74	42,4	48,2
144	35,71	48,66	41,86	48,76	42,46	48,2
156	36,39	48,86	42,02	48,77	42,5	48,2
168	36,97	49,01	42,14	48,77	42,53	48,2
180	37,45	49,11	42,22	48,78	42,54	48,2
192	37,86	49,18	42,29	48,78	42,56	48,2
204	38,2	49,23	42,33	48,78	42,56	48,2
216	38,49	49,27	42,36	48,78	42,56	48,2
228	38,74	49,29	42,38	48,78	42,57	48,2
240	38,81	49,3	42,39	48,78	42,57	48,2

адиабаты, рассчитанной по японской формуле (рис. 2). Однако характер этих кривых сходный и максимальное расхождение, соответствующее случаю, когда начальная температура бетонной смеси была 10°C, составляет 7,34°C после ее 12-часового твердения (табл. 5).

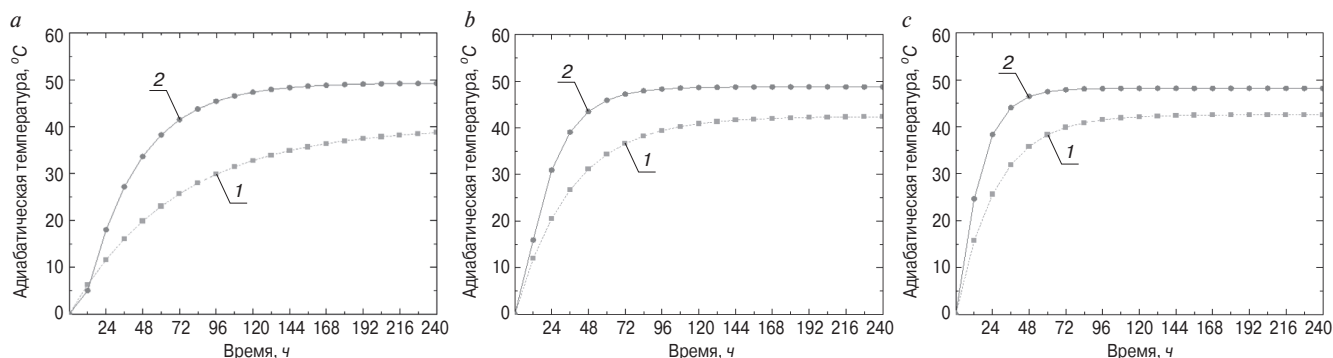


Рис. 3. Повышение адиабатической температуры бетона из смеси M_2 , рассчитанное по корейскому (1) и японскому (2) стандартам: а – при $T_a=10^\circ\text{C}$; б – при $T_a=20^\circ\text{C}$; с – при $T_a=30^\circ\text{C}$

Fig. 3. Increase in adiabatic temperature of concrete from M_2 mixture, calculated according to Korean (1) and Japanese (2) standards: а – at $T_a=10^\circ\text{C}$; б – at $T_a=20^\circ\text{C}$; с – at $T_a=30^\circ\text{C}$

Рост адиабатической температуры в ходе схватывания бетонной смеси состава M_2 и твердения получаемого из нее бетона

Результаты расчета по корейскому и японскому стандартам роста адиабатической температуры в ходе схватывания бетонной смеси M_2 и твердения полученного из нее бетона приведены в табл. 6.

Из полученных результатов изменения адиабатической температуры во времени, вычисленных по эмпирическим формулам корейского и японского стандартов, можно сделать следующие выводы.

Значения адиабатической температуры бетона, полученного из бетонной смеси M_2 , содержащей меньше портландцемента в составе вяжущего вещества за счет частичной замены цемента золой-уноса ТЭС, при всех исследованных начальных температурах бетонных смесей существенно ниже, чем у бетона из бетонной смеси M_1 , содержащей в составе вяжущего только портландцемент.

Адиабатические температурные кривые бетона, полученного из бетонной смеси M_2 , так же как и в случае бетона, полученного из бетонной смеси M_1 , зависят от вида и содержания вяжущего и начальной температуры бетонной смеси, и также кривая адиабаты, рассчитанная по корейской эмпирической формуле, ниже кривой адиабаты, рассчитанной по японской формуле при сходном характере этих кривых (рис. 3). При этом максимальное расхождение составляет $15,83^\circ\text{C}$ и наблюдается при начальной температуре бетонной смеси 10°C , в возрасте бетона 3 и 3,5 сут (соответственно 72 и 84 ч) (табл. 6).

Выводы

На основе полученных результатов проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Содержание и состав вяжущего, а также начальная температура бетонной смеси определяют адиабатическую температуру в твердеющем бетоне. При этом максимальная температура достигается к 72–96 ч твердения бетона.

2. Расчетная адиабатическая температура, определенная по корейскому и японскому стандартам, имеет отличия. Причем разница между значениями

температуры уменьшалась с возрастом твердения бетона. Также установлено, что при использовании вяжущего, в котором часть портландцемента заменена золой-уноса ТЭС, указанная разница более существенна и этот факт следует учитывать на практике при выборе расчетной методики.

Список литературы / References

1. Нгуен Чонг Чык. Термонапряженное состояние бетонных гравитационных плотин: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2020. 159 с.
1. Nguyen Trong Chuc. Thermal stress state of concrete gravity dams. Diss... Candidate of Sciences (Engineering). Moscow. 2020. 159 p. (In Russian).
2. Нгуен Чонг Чык, Танг Ван Лам, Булгаков Б.И., Александрова О.В., Ларсен О.А., Булычева А.С., Макарова М.Н. Оценка возможности появления трещин в мостовой опоре автомобильной эстакады в раннем возрасте твердения бетона // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2018. № 10. С. 33–42. DOI: 10.12737/article_5bd95a725020e3.98104960
2. Nguyen Trong Chuc, Tang Van Lam, Bulgakov B.I., Alexandrova O.V., Larsen O.A., Bulycheva A.S., Makarova M.N. Assessment of the possibility of cracks in the bridge support of the road overpass in the early age concrete. *Vestnik of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018. No. 10, pp. 33–32. (In Russian). DOI: 10.12737/article_5bd95a725020e3.98104960
3. ACI Committee 207 – Mass and thermally controlled concrete. 2017. 34 p.
4. Лотов В.А. О взаимодействии частиц цемента с водой или вариант механизма процессов гидратации и твердения цемента // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018. Т. 329. № 1. С. 99–110.
4. Lotov V.A. Interaction of cement particles with water or mechanism of hydration and hardening of cement. *Vestnik of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018. Vol. 329. No. 1, pp. 99–110. (In Russian).
5. Разумейчик В.С. Структурно-химическое моделирование гидратации цементного композита // *Вестник Брестского государственного технического*

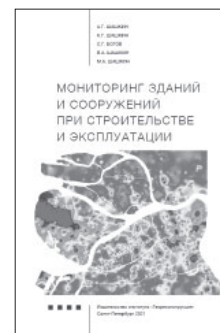
- ниверситета. Сер. Строительство и архитектура. 2006. № 1. С. 91–96.
5. Razumeychik V.S. Structural-chemical modeling of hydration of cement composite. *Vestnik of Brest State Technical University. Series: Construction and architecture*. 2006. No. 1, pp. 91–96. (In Russian).
 6. Фомина Н.Н., Кебедов М.Б. Применение методов калориметрии в исследовании процессов гидратации портландцемента // *Техническое регулирование в транспортном строительстве*. 2016. № 1 (15). С. 26–28.
 6. Fomina N.N., Kebedov M.B. Application by calorimetry in the study of cement hydration arts. *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve*. 2016. No. 1 (15), pp. 26–28. (In Russian).
 7. Korea Concrete Institute. Thermal crack control of mass concrete (Manual). 2010. 234 p.
 8. Barbara K., Maciej B., Maciej P., Aneta Z. Analysis of cracking risk in early age mass concrete with different aggregate types. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 193, pp. 234–241. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.209>
 9. Nikolay Aniskin, Nguyen Trong Chuc, Hoang Quoc Long. Influence of size and construction schedule of massive concrete structures on its temperature regime. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 251. 02014. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201825102014>
 10. Nguyen T.C., Bui A.K. Evaluation of the impact of parameter inputs of concrete mix on the distribution of temperature in the mass concrete structure. *Structural Integrity and Life*. 2019. Vol. 19. No. 1, pp. 8–12.
 11. Japan Concrete Institute. Guidelines for control of cracking of mass concrete. 2016. 302 p.
 12. Кузнецова Т.В., Талабер Й. Глиноземистый цемент. М.: Стройиздат, 1988. 272 с.
 12. Kuznetsova T.V., Talaber I. Glinozemisty tsement [Alumina cement]. Moscow: Stroizdat. 1988. 272 p.
 13. Panesar D.K., Zhang R. Performance comparison of cement replacing materials in concrete: Limestone fillers and supplementary cementing materials – A review. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 251. 118866. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118866>
 14. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: АСВ, 2011. 524 с.
 14. Bazhenov Yu. M. Tekhnologiya betona [Concrete technology]. Moscow: ASV. 2011. 524 p.
 15. Танг В.Л., Нгуен З.Т.Л., Самченко С.В. Влияние золошлакового отхода на свойства сульфатостойкого портландцемента // *Вестник МГСУ*. 2019. № 8. С. 991–1003. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.991-1003
 15. Tang V.L., Nguyen D.T.L., Samchenko S.V. The influence of the addition of ash and slag waste on the properties of sulfoaluminate Portland cement. *Vestnik of MSUCE*. 2019. No. 8, pp. 991–1003. (In Russian). DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.991-1003.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

МОНИТОРИНГ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

Авторы: А.Г. Шашкин, К.Г. Шашкин, С.Г. Богов, В.А. Шашкин, М.А. Шашкин
(практическое руководство под редакцией д.г.-м.н. Шашкина А.Г.)
Санкт-Петербург: Георекострукция, 2021. 640 с.

В монографии раскрывается содержание мониторинга механической безопасности при новом строительстве, реконструкции и эксплуатации зданий и сооружений. Показывается значение мониторинга не только как средства контроля за сохранностью городской застройки, но и как профилактического средства, позволяющего своевременно обнаружить и диагностировать негативные тенденции и принять адекватные меры по нормализации технического состояния сооружения. Отмечается необходимость построения мониторинга как интерактивного процесса, базирующегося на компьютерной модели взаимодействия сооружения и основания. Это позволяет корректно интерпретировать результаты мониторинга, а также выполнять обратные расчеты для совершенствования исходных расчетных схем и физических моделей материалов и грунтов.



По вопросам приобретения обращайтесь:
E-mail: geoconstruction@gmail.com WWW: geo-bookstore.ru

Учебное пособие «Промышленное и гражданское строительство. Введение в профессию»

Авторы: Грызлов В.С., Ворожбянов В.Н., Гендлина Ю.Б., Залипаева О.А., Каптюшина А.Г.,
Медведева Н.В., Петровская А.А., Поварова О.А., Чорная Т.Н.
Научный редактор – д-р техн. наук, проф. В.С. Грызлов
Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 276 с.

Дана общая характеристика профессии строитель. Приведены сведения из истории развития строительной отрасли. Предложено краткое описание видов строительной продукции, особенностей проектирования строительных объектов, технологии и порядка организации возведения зданий и сооружений; раскрыты вопросы менеджмента в строительстве. Подчеркнута важность строительной науки и цифровизации строительной деятельности. Отдельная глава посвящена особенностям организации инженерно-строительного обучения. Для студентов бакалавриата, начавших обучение по направлению «Строительство». Может быть использовано для профориентационной работы с выпускниками школ.



По вопросам приобретения обращайтесь в издательство «Инфра-Инженерия»