

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

УДК 693.547.3:620.9

DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-3-159-168

*ДУГЕРСУРЭН ЭНХБААТАР, М.М. ТИТОВ,
Новосибирский государственный
архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗИМНЕГО БЕТОНИРОВАНИЯ В СОВРЕМЕННОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

С целью оперативного технологического проектирования и управления процессом зимнего бетонирования разработан способ оперативного расчета параметров прогрева по фактической погоде и реальным условиям теплообмена, а также программное средство для его реализации, доступное для рядовых линейных работников. В результате повышается качество, экономятся энергоресурсы при реализации зимнего бетонирования.

Ключевые слова: потребляемая электрическая мощность; прогнозируемое время выхода на изотермический режим; контроль прочности, набираемой бетоном.

Для цитирования: Дугерсурэн Энхбаатар, Титов М.М. Совершенствование технологического проектирования зимнего бетонирования в современном строительстве // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 3. С. 159–168.

*DUGERSUREN ENKHBAATAR, M.M. TITOV,
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering*

WINTER CONCRETING PROCESS DESIGN IMPROVEMENT IN MODERN CONSTRUCTION

The paper presents the on-line computation of heating parameters for engineering design and control for winter concreting taking into consideration actual weather conditions and heat exchange. The authors propose a software for the implementation of this method available to ordinary users. As a result, during winter concreting the quality and energy consumption increase.

Keywords: consumed electric power; isothermal temperature; strength control; concrete.

For citation: Dugersuren Enkhbaatar, Titov M.M. Sovershenstvovanie tekhnologicheskogo proektirovaniya zimnego betonirovaniya v sovremennom stroitel'stve

[Winter concreting process design improvement in modern construction]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2018. V. 20. No. 3. Pp. 159–168. (rus)

Введение

Проблемой современного строительства в области зимнего бетонирования, в частности, является то, что по сравнению с 70–80-ми гг. прошлого века, когда была в основном создана вся научная база и на ее основе разработаны нормативные требования к этой технологии, сама технология и конструктивы зданий из монолитного бетона сильно изменились как в РФ, так и во всех странах ЕвразЭС. Монолитные железобетонные среднемодульные конструкции для нулевого цикла трансформировались в массивные плитные фундаменты с $M_n \leq 3$ или в тонкостенные вертикальные и горизонтальные конструкции каркаса с $M_n \geq 10$. Класс используемого бетона увеличился с B15-17 до B25-30. Широкое применение супер- и гиперпластификаторов, необходимое для использования бетононасосов, приводит совсем к другой кинетике набора прочности бетоном, но нормы 1985 г. разработки этого не учитывают. Вместе с тем реальная конкуренция вынуждает строить быстро, и на производстве часто не удается выполнить все требования ГОСТов, СП и ЕН в силу как вышеперечисленных, так и других обстоятельств. С одной стороны, отказ от инженерной подготовки объективно снизил уровень квалификации линейного персонала, а с другой – методика расчета массивных и тонкостенных конструкций, ранее редко используемых, недостаточно проработана как с научной, так и, соответственно, с нормативной стороны. Порой это приводит к возникновению аварийных ситуаций. А, например, в Республике Монголия после ряда серьезных аварий и совсем запретили бетонировать зимой.

В нормативных документах по вопросам зимнего бетонирования научной основой являются разработки таких российских ученых, как А.Д. Киреев, Б.Г. Скрамтаев, С.А. Миронов, А.С. Арбеньев, Б.А. Крылов, А.В. Лагойда, А.И. Гныря, В.И. Зубков, В.П. Лысов, С.Г. Головнев, Н.Н. Данилов, Ю.А. Попов и др. Зарубежные ученые также внесли свой вклад в развитие учения о бетонировании в холодную погоду – Hiroshi Yokota, Kazumi Kodama, Isao Masukawa, Osamu Nishijo и др., среди монгольских ученых это Б. Батцагаан, Я. Дуйнхэржав, Ж. Гэрэлхуу, Р. Хишгээ и др.

В дальнейшем развитием теории и методов бетонирования зимой, а также разработкой технологии расчета занимались российские ученые С.А. Миронов, Б.А. Крылов, С.Г. Головнев, А.Б. Вальт, Л.М. Кольчеданцев, С.В. Коробков, В.В. Молодин, М.М. Титов и др.

Первым методом зимнего бетонирования был метод так называемого термоса. А научной основой его было уравнение баланса, т. е. равенство величины запасенного в бетоне тепла и скорости расхода этого тепла, умноженных на время расхода:

$$c \cdot \gamma \cdot \Delta t + Q \cdot \Pi = K_t \cdot M_n (t_{б,ср} - t_b) \tau. \quad (1)$$

Но формула при ее физической адекватности значительно упрощает реальное протекание процесса охлаждения конструкции. Аналитически точное

решение дает (без учета краевых эффектов охлаждения) дифференциальное уравнение скорости охлаждения нагретого тела, полученное еще Ньютоном:

$$V_{\text{охл}} = k(t_{\text{тела}} - t_{\text{воздуха}}).$$

Но и в этом случае при практическом применении возникает ряд проблем, решением которых занимались Г.М. Кондратьев, С.Г. Головнев и др. [2, 3].

В случае прогревных методов зимнего бетонирования с использованием электроэнергии практически все известные методы расчета электротехнических и технологических параметров основаны на использовании закона Джоуля – Ленца

$$P = I^2 \cdot R \quad (2)$$

для расчета потребляемой электрической мощности, закона сохранения энергии при переходе её из требуемой электрической в тепловую в режиме подъема температуры бетона

$$P \cdot \eta = c \cdot m \cdot v_{\text{нагрева}} \quad (3)$$

и закона Фурье в записи требуемой мощности для компенсации потерь тепла при изотермическом прогреве через поверхность F [4]:

$$P = K_t \cdot F(t_{\text{тела}} - t_{\text{воздуха}}). \quad (4)$$

Проблема

Однако эти три уравнения, в той или иной форме используемые во всех руководствах и рекомендациях по электропрогреву, не дают ответа на ряд вопросов. Первое – когда наступит режим стационарного прогрева. Уравнение (2), описывающее режим подъема температуры, содержит величину η , т. е. к.п.д. За время подъема температуры она меняется от единицы (в самый первоначальный момент) до нуля с момента выхода на изотермический режим, т. к. вся подведенная энергия тратится в окружающее пространство без повышения температуры тела. Второе – вообще говоря, заранее точно неизвестно, каким будет режим выхода, т. к. температура воздуха, фактический коэффициент теплопередачи и теплоотдачи, а также фактическая потребляемая мощность, как правило, значительно отличаются от заранее рассчитанных в технологических картах. При этом, если теплотери больше расчетных, изотермический режим наступит быстро, но бетон может или долго набирать требуемую прочность, или даже замерзнуть. Если наоборот, тогда температура все время будет расти, и крайне важно знать, когда следует выключить нагрев и какая при этом будет достигнута прочность.

Противоречие

Это можно сделать, решая известное дифференциальное уравнение прихода и расхода тепловой энергии [5]

$$dQ = C_0 \cdot dt = c \cdot \varphi(\tau) d\tau - \beta(t - t_0) d\tau. \quad (5)$$

В результате его довольно сложного решения искомая траектория температурной кривой для тела цилиндрической формы, к примеру, определится выражением

$$t = \frac{V \cdot \omega \cdot \ln r_2 / r_1}{\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot h} \left(1 - e^{-\frac{\lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot h}{m \cdot C_0 \cdot \ln r_2 / r_1} \tau} \right). \quad (6)$$

Для его решения надо знать некую обобщенную теплопроводность бетона и опалубки λ и объемную мощность тепловыделения в бетоне w , хотя для реальной конструкции это всегда условные величины, которые заранее затруднительно определить точно. И это только для тела цилиндрической формы.

Можно ту же задачу решить численными методами, например с помощью одного из программных комплексов SolidWorks: Simulation, Heat 3, ELCUT. Но ни первый, ни второй способ оперативно применить линейному работнику буквально на каждой стройке в реальности не представляется возможным.

А на объекте мастеру или прорабу необходимо уже сразу после включения рубильника, измерив фактическую потребляемую электрическую мощность прогреваемой конструкции, оценив реальную конструкцию утепления бетона, начальную температуру бетона и температуру воздуха, быстро узнать, как будет расти температура и, соответственно, прочность бетона [1, 6]. Таким образом можно получить графики этих процессов с большей долей вероятности путем оперативного введения в расчет реальных исходных величин. Это необходимо как для планирования работ, так и для определения времени вызова служб по определению прочности бетона в конструкциях в соответствии с ГОСТ 18105–2010 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности» и СТО 066 НОСТРОЙ 2.6.54-2012 «Конструкции монолитные бетонные и железобетонные. Технические требования к производству работ. Правила и методы контроля».

Гипотеза

В связи с этим был совместно рассмотрен процесс прогрева бетона в конструкции и процесс теплопотерь от начала прогрева и до установления изотермического состояния, когда приход тепла равен его потерям в окружающую среду. Для вычисления мощности прогрева бетонной смеси, при которой установится стационарный температурный режим, необходимо воспользоваться уравнениями (7) и (8):

$$P \cdot \Delta \tau = \frac{c \cdot m \cdot \Delta t}{\Delta \tau} - K_T \cdot F \cdot \Delta t, \quad (7)$$

$$P \cdot \Delta \tau = K_T \cdot F \cdot \Delta t. \quad (8)$$

Физический смысл такой системы состоит в следующем: вся энергия, передающаяся телу, способствует изменению его внутренней энергии. Электроэнергия, целиком и полностью поглощаемая массой вещества, трансформируется в тепловую, часть которой идет на увеличение температуры вещества, а другая часть теряется во внешней среде. И эта часть будет тем больше, чем больше будет разница температур воздуха и нагреваемого бетона. Таким образом, первое уравнение системы (7) соответствует режиму нагрева, а второе уравнение (8) – режиму изотермического прогрева, когда скорость нагрева становится равной нулю. Но из двух уравнений (7) и (8) нельзя определить Δt , за которое подъем температуры прекратится и наступит стационарный (изотермический) режим. И наступит ли вообще, и не будет ли конструкция осты-

вать, подсчитать сразу не представляется возможным, т. к. неизвестен к.п.д. процесса нагрева.

Описание модели

Но можно методом кусочно-линейной аппроксимации, задавшись шагом Δt , построить кривую роста температуры и тем самым определить время выхода на изотермический режим, сам факт выхода и в любом случае набранные градусочасы и соответствующую им прочность, достигнутую бетоном. Для этого было составлено уравнение баланса для каждого отрезка времени Δt , по которому рассчитать процесс нагрева тела уже представляется возможным:

$$P \cdot \Delta t = c \cdot m \cdot \Delta t - K_t \cdot F \cdot \Delta t (t_n + \Delta t/2 - t_{\text{возд}}). \quad (9)$$

Покажем на примере, как по уравнению (9) можно рассчитать траекторию температурной кривой от начальной температуры до изотермической.

Исходные данные:

1. Начальная температура $t_n = +10^\circ\text{C}$.
2. Температура воздуха $t_{\text{в}} = -20^\circ\text{C}$.
3. Прирост температуры без теплопотерь Δt ($^\circ\text{C}$).
4. Площадь охлаждения конструкции F (м^2).
5. Удельная теплоемкость материала c ($\text{Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}$).
6. Масса тела m (кг).
7. Коэффициент теплопередачи средний по поверхности конструкции K_t ($\text{Вт/м}^2\cdot^\circ\text{C}$).
8. Электрическая удельная мощность P (Вт).
9. Выбранный интервал времени Δt (с).
10. Интервал нагрева Δt за Δt ($^\circ\text{C}$).

$P = 3000 \text{ Вт/м}^3$; $m = 2500 \text{ кг}$; $\Delta t = 3600 \text{ с}$; $K_t = 6,67 \text{ Вт/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})}$; $c = 1050 \text{ Дж/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})}$; $F = 6,71 \text{ м}^2$.

Первый цикл расчета:

1. Затраты энергии за час, $P \cdot \Delta t = 3000 \cdot 3600 = 10\,800\,000 \text{ Дж}$.
2. Без учета теплопотерь подъем температуры составит $4,11^\circ\text{C}$:

$$\Delta t = \frac{3000 \cdot 3600}{1050 \cdot 2500} = 4,11^\circ\text{C}.$$

Рассчитаем потери энергии на остывание (здесь $t_{\text{нач}} + \Delta t/2$ – это средняя за Δt температура бетона):

$$\begin{aligned} K_t \cdot F \cdot \tau (t_{\text{нач}} + \frac{t_{\Delta}}{2} - t_{\text{воз}}) = \\ = 6,67 \cdot 6,71 \cdot 3600 (10 + \frac{4,11}{2} - (-20)) = 5164718,26 \text{ Дж}. \end{aligned}$$

Реальное поступление тепла на подъем температуры: от $10\,800\,000 \text{ Дж}$ отнимаем теплопотери $5\,164\,718,26$ и получаем $10\,800\,000 - 5\,164\,718,26 = 5\,635\,281,74 \text{ Дж}$.

Находим реальный прирост температуры. Реальное поступление тепла (реальный прирост) делим на $c \cdot m$ и получаем реальный прирост температуры:

$$\frac{5635281,74}{(1050 \cdot 2500)} = 2,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

(реальный прирост с учетом теплопотерь), т. е. $10 + 2,15 = 12,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Второй цикл расчета: $t_{\text{н}} = +12,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$; все остальные действия повторяются. Каждый новый цикл отличается от предыдущего величиной $t_{\text{н}}$. Расчет ведется до тех пор, пока разница в величине $t_{\text{н}}$ от цикла к циклу не станет меньше установленной, например $0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. В данном случае расчет, проведенный с часовым интервалом, показал, что через 48 ч температура достигнет величины $42,9 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. прогрев выйдет на изотермический режим. График на рис. 1, построенный таким «ручным» расчетом, иллюстрирует процесс выхода температуры на стационарный режим.

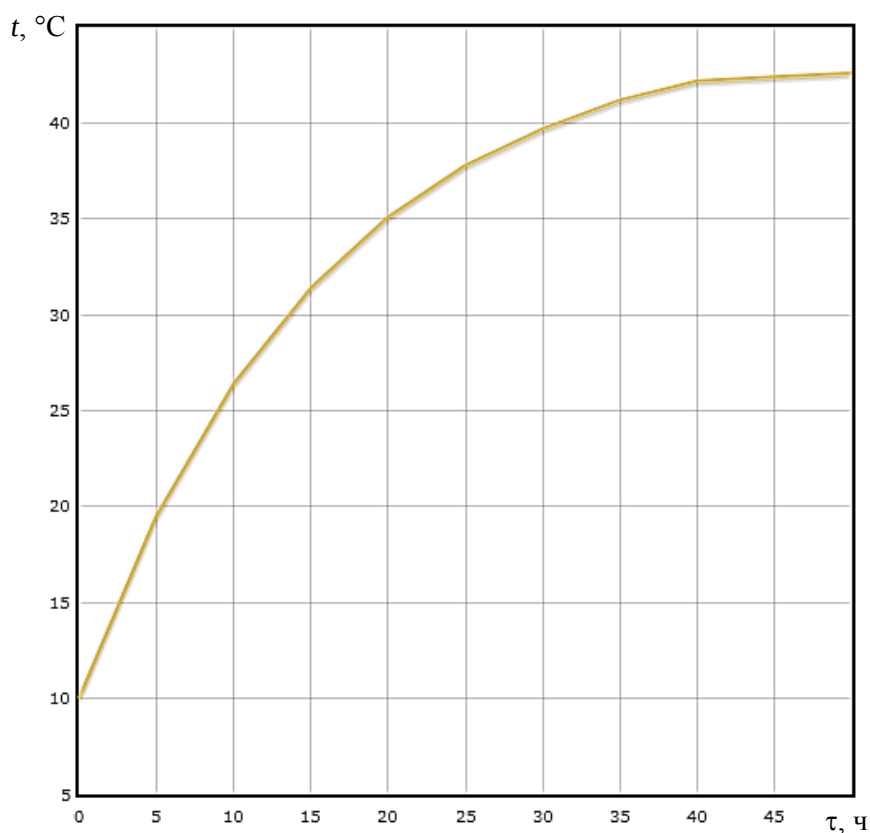


Рис. 1. Кинетика выхода температуры прогрева на изотермический режим по предлагаемому методу расчета

Если шаг времени взять меньше, график получится ближе к реальности. Для реализации подобных расчетов был разработан алгоритм для создания мобильного приложения к платформе Андроид (рис. 2). Он позволяет задавать любой шаг времени Δt и все необходимые начальные параметры прогрева для построения графика. Возможность получать на смартфоне такие графики

в оперативном режиме линейным работникам позволит поднять качество процесса электротермообработки монолитного бетона, реально экономить электроэнергию.

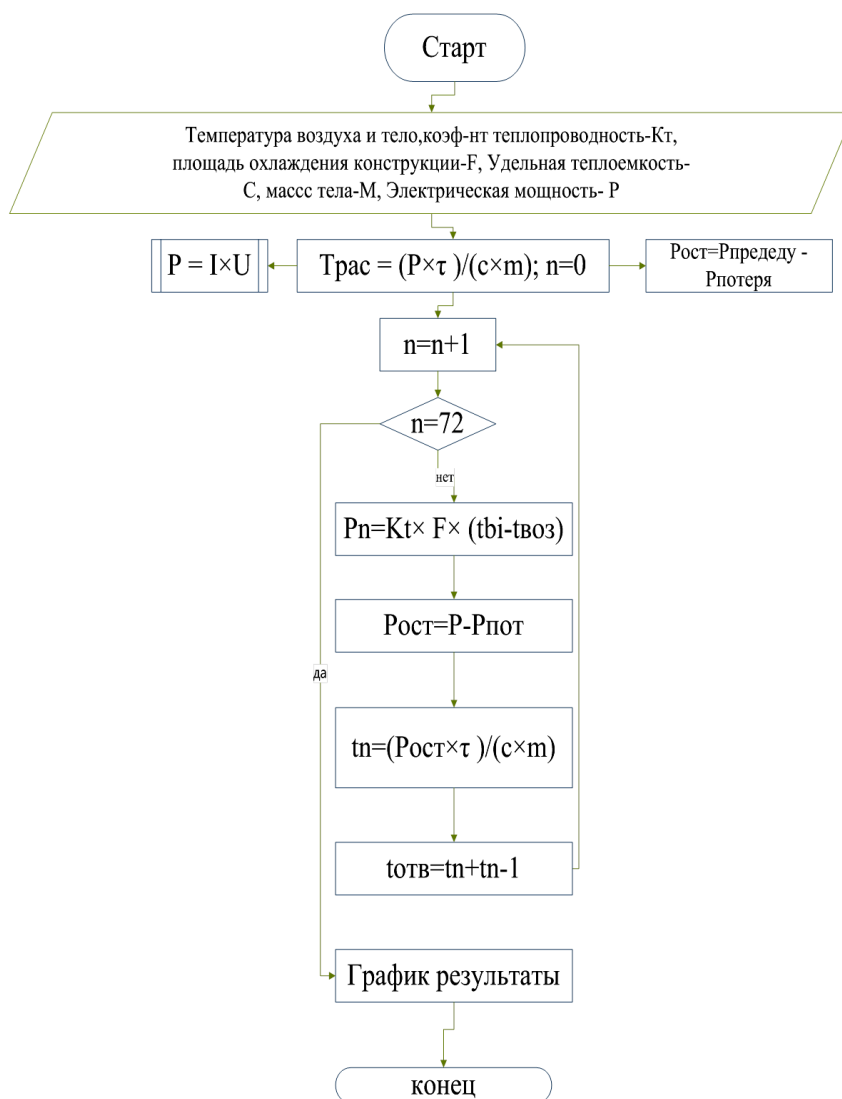


Рис. 2. Алгоритм для программной реализации предложенного метода

На данный алгоритм и разработанное программное приложение к Андроиду было получено «Авторское свидетельство на изобретение» № 8782 Монгольской Республики (по приказу А/672 от 28 июля 2017 г. начальника Управления интеллектуальной собственности и государственной регистрации Монголии). Ниже приведены скриншоты внешнего вида интерфейса для ввода в программу всех групп исходных данных и как результат расчета по программе график роста температуры во времени (рис. 3–5).

Method of balance

Rectangle

Height m

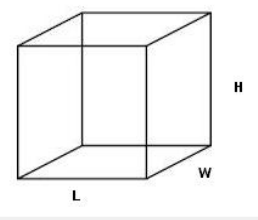
Width m

Length m

Densight kg/m³

Area m²

Volume m³



Calculation

☐ Check

Circle

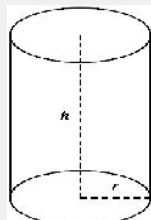
Height m

Radius m

Densight kg/m³

Area m²

Volume m³



Calculation

☒ Check

Рис. 3. Выбор геометрических характеристик для расчета в программе

Prof. Skramtaev B.G. equation

Required power, P : W

First calculation, P₁ : kW

Time, τ :

Specific heat, C : kJ/(kg°C)

Mass, m : kg

Increase temperature, t_Δ : C

First time temperature, t₁ : C

Coefficient of heat transfer formwork, K_f : watt/(m²*C)

Squar cooling area, F ☒ Manual input m²

Enter the initial concrete temperature, T_{ini} : C

Enter the outside temperature, T_{out} : C

Graph counter

t_Δ/t_{2.05}

Рис. 4. Интерфейс для ввода исходных данных бетона и времени при прогреве

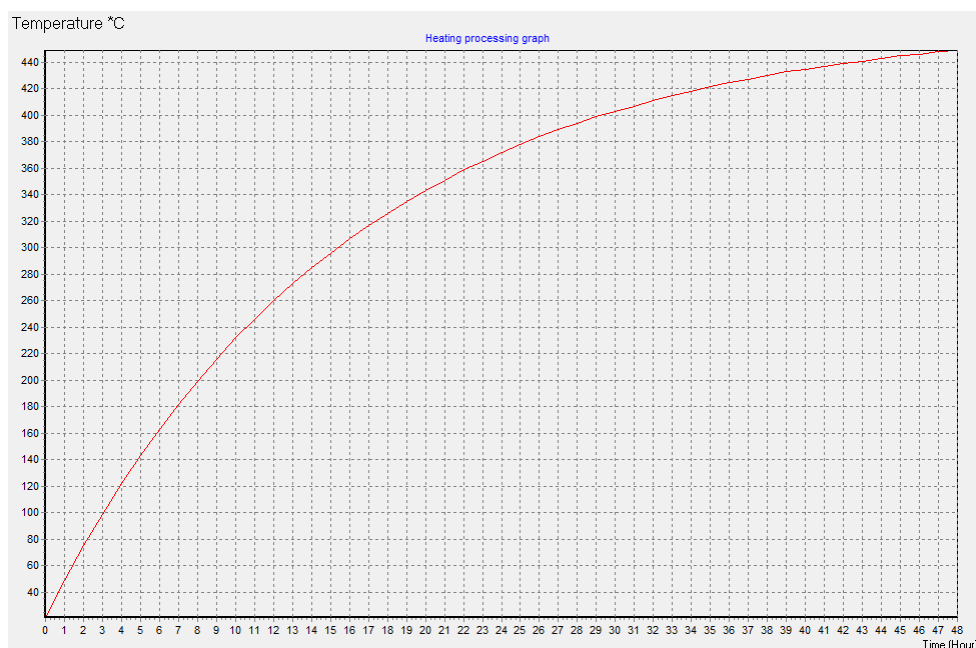


Рис. 5. Зависимость роста температуры от времени прогрева в программе приложения для смартфонов

Заключение

Сравнение графиков «ручного» расчета и по разработанной программе свидетельствует о хорошей сходимости результатов. Работа с приложением проста и позволяет линейному работнику на месте оперативно прогнозировать протекание процесса прогрева и набора прочности. В настоящее время программа доработана и позволяет в том же масштабе времени строить график набираемой бетоном прочности.

Полученные в программе результаты также сравнивались с результатами натурного полупроизводственного эксперимента на цилиндрической колонне в металлической опалубке. Полученные результаты также дали высокую сходимость. Это обстоятельство позволяет сделать вывод о перспективности дальнейшей работы над совершенствованием программы и расширением числа геометрий прогреваемых конструкций в интерфейсе программы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции / Минрегион России. М., 2012. 280 с.
2. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. М., 1954. С. 36–48.
3. Головнев С.Г. Технология зимнего бетонирования. Оптимизация параметров и выбор методов. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1999. 156 с.
4. Гныря А.И., Коробков С.В. Технология бетонных работ в зимних условиях. Томск, 2011. 412 с.
5. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы нестационарной теплопроводности. М.: Высшая школа, 1978. 328 с.

6. Колчеданцев Л.М., Васин А.П., Осипенкова И.Г., Ступакова О.Г. Технологические основы монолитного бетона. Зимнее бетонирование. СПб.: Лань, 2016. 278 с.

REFERENCES

1. SNiP 70.13330.2012. Nesushchie i ograbdayushchie konstruksii [Bearing and wall structures]. Moscow, 2012. 280 p. (rus)
2. Kondrat'ev G.M. Regul'yarnyi teplovoi rezhim [Regular thermal mode]. Moscow, 1954. Pp. 36–48. (rus)
3. Golovnev S.G. Tekhnologiya zimnego betonirovaniya. Optimizatsiya parametrov i vybor metodov [Winter concreting technology. Optimization of parameters and selection of methods]. Chelyabinsk: YuUrGU Publ., 1999. 156 p. (rus)
4. Gnyrya A.I., Korobkov S.V. Tekhnologiya betonnykh rabot v zimnikh usloviyakh [Concreting technology in winter conditions]. Tomsk, 2011. 412 p. (rus)
5. Belyaev N.M., Ryadno A.A. Metody nestatsionarnoi teploprovodnosti [Non-stationary thermal conductivity methods]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1978. 328 p. (rus)
6. Kolchedantsev L.M., Vasin A.P., Osipenkova I.G., Stupakova O.G. Tekhnologicheskie osnovy monolitnogo betona. Zimnee betonirovanie [Engineering basics of site concrete. Winter concreting]. St-Petersburg: Lan' Publ., 2016. 278 p. (rus)

Сведения об авторах

Дугерсүрэн Энхбаатар, аспирант, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, enkhbaatar1011@gmail.com

Титов Михаил Михайлович, докт. техн. наук, профессор, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, agd_tmm48@mail.ru

Authors Details

Dugersuren Enhbaatar, Research Assistant, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, enkhbaatar1011@gmail.com

Mikhail M. Titov, DSc, Professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, agd_tmm48@mail.ru