

УДК 666.97.035.5:69.05

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА ТЕРМОСНОГО ВЫДЕРЖИВАНИЯ БЕТОННОГО МАССИВА**Ж. Л. Зеленковская¹, С. Н. Ковшар²**¹ Старший преподаватель кафедры «Технология строительства и строительные материалы», Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: zelenkovskaya@bntu.by² К. т. н., доцент, доцент кафедры «Технология строительства и строительные материалы», Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: kovsharsn@bntu.by**Реферат**

Высокое качество бетонных изделий, конструкций и сооружений является результатом комплекса мероприятий: правильного выбора материалов, рационального подбора состава бетонной смеси, надлежащей организации и пооперационного контроля бетонных работ, использования обоснованных технологических приёмов приготовления, транспортирования, укладки бетонной смеси и режимов твердения бетона.

Рациональный подбор состава и оптимальные условия твердения бетона определяют не только его высокую прочность, водонепроницаемость, морозостойкость, коррозионную стойкость, но и, что особенно важно, себестоимость конструкции. Потребность в снижении расходов и экономии энергоресурсов при возведении бетонных и железобетонных конструкций привела к необходимости решения проблемы расчета параметров бетона, твердеющего в переменном температурном режиме, которая остается достаточно актуальной, несмотря на наработанный к настоящему времени существенный научный и практический опыт. Для решения данной проблемы нами ведется разработка новых аналитических зависимостей, связывающих температуру и время твердения с формированием структурно-механических характеристик бетона.

Моделирование процессов твердения бетона с помощью ЭВМ – развивающееся перспективное направление в технологии бетона и производстве строительных работ. Это направление имеет особую значимость при расчете режимов твердения бетона как для массивных сооружений различного назначения, так и для бетонирования конструкций сложных архитектурных форм, трудно поддающихся традиционным аналитическим методам расчета режима твердения бетона.

Использование представленного в статье программного обеспечения позволит проектировать состав бетона и выбирать режим его твердения, который обеспечит достижение требуемых структурных и физико-механических характеристик. Это избавит инженера-технолога от необходимости проводить большой объем работы для экспериментальной проверки подобранных составов бетона и режимов его твердения.

Авторами ведется дальнейшая апробация математической модели, взаимно увязывающей технологическую (кинетика изменения характеристик бетона) и теплотехническую (текущая температура окружающей среды и способы подвода тепла) стороны процесса твердения бетона.

Ключевые слова: бетон, состав бетона, термосное выдерживание, влияющие факторы, совершенствование метода, режим твердения, математическая модель, программное обеспечение.

SIMULATION OF CONCRETE MASS THERMAL HOLDING MODE**Zh. L. Zelenkovskaya, S. N. Kovshar****Abstract**

High quality of concrete products, structures and buildings is the result of a set of measures: correct choice of materials, rational selection of concrete mix composition, proper organization and step-by-step control of concrete works, use of reasonable technological methods of preparation, transportation, laying of concrete mix and concrete hardening modes. Rational selection of composition and optimal conditions of concrete hardening determine not only its high strength, water resistance, frost resistance, corrosion resistance, but also, what is especially important, the cost of the structure. The need to reduce costs and save energy resources when erecting concrete and reinforced concrete structures has led to the need to solve the problem of calculating the parameters of concrete hardening in a variable temperature regime, which remains quite relevant, despite the significant scientific and practical experience accumulated to date. To solve this problem, we are developing new analytical dependencies linking the temperature and time of hardening with the formation of structural and mechanical characteristics of concrete.

Computer-aided modeling of concrete hardening processes is a developing promising area in concrete technology and construction work. This area is of particular importance in calculating concrete hardening modes for both massive structures of various purposes and for concreting structures of complex architectural forms that are difficult to calculate using traditional analytical methods of calculating concrete hardening mode. Using the software presented in the article will allow designing the concrete composition and selecting its hardening mode, which will ensure the achievement of the required structural and physical-mechanical characteristics. This will relieve the process engineer from the need to carry out a large amount of work for experimental verification of the selected concrete compositions and its hardening modes. The authors are conducting further testing of the mathematical model, which mutually links the technological (kinetics of changes in concrete characteristics) and heat engineering (current ambient temperature and methods of heat supply) aspects of the concrete hardening process.

Keywords: concrete, concrete composition, thermal exposure, influencing factors, method improvement, hardening mode, mathematical model, software.

Введение

Ранее нами было разработано программное обеспечение для расчёта параметров предварительного электроразогрева бетонной смеси и соответствующего метода подбора состава бетона [1]. В процессе расчетов, задавая значения объема разогреваемой бетонной смеси, начальную и конечную температуры, а также время разогрева, конструктивные особенности бункера, напряжение в сети, производительность установки получают информацию о конструктивных особенностях бункера для разогрева смеси. Выбор наиболее подходящего

трансформатора, а также сечение подводящих кабелей оператор производит по расчетной мощности трансформатора и силе тока.

Кроме того, в данном приложении нами представлена опция, предназначенная для расчета модуля поверхности колонны и балок прямоугольного и квадратного сечений, куба, отдельно стоящего и прилегающего к массиву параллелепипеда, плит и стен, а также цилиндра. Значения температуры наружного воздуха, скорости ветра и времени транспортирования бетонной смеси, а также модуля поверхности бетонируемой конструкции позволяют оптимизировать

параметры последующего твердения бетона, а справочная система приложения предоставляет инженеру-технологу информацию об оптимальных параметрах электронагрева, характеристиках комплексов трансформаторных подстанций и трансформаторов.

Дальнейшие разработки ведутся в области моделирования режима выдерживания бетонного массива. Основные сложности, на наш взгляд, заключаются в имеющем место разрыве теплотехнической и бетоноведческой стороны проблемы, т. е. в теплотехнике рассматриваются вопросы переноса тепла в бетонном массиве, а в бетоноведении упор делается на прочностные и структурные характеристики бетона. Поэтому особое внимание уделяется решению следующих задач.

Система расчета должна в каждый момент времени взаимно связывать внешние погодные условия с температурой массива, а также с особенностями конструкции, техническими характеристиками теплоизоляции опалубки и составом бетона. Математическая модель и созданная на ее основе компьютерная программа должны быть реализованы так, чтобы в режиме реального времени, варьируя составом бетона или конструкцией опалубки, возможно было бы получать проектные характеристики бетона в заданные сроки твердения с минимальными ресурсными и энергетическими затратами.

Правильное назначение режима твердения может быть реализовано только с учетом многочисленного количества влияющих факторов (например, состав бетона, вид конструкции, температура наружного воздуха, начальная температура бетонной смеси, вид опалубки и т. д.), что ставит инженера-технолога перед необходимостью проводить большой объем работы по назначению на основе экспериментальных данных, таблиц и графиков (весьма условно) времени выдерживания и остывания бетона в опалубке, начальной температуры, температуры разогрева [2–8]. Именно поэтому целесообразно оптимальный режим твердения в каждом конкретном случае проектировать, а не получать в результате экспериментальной переборки вариантов. Осуществить это невозможно без соответствующих алгоритмов расчета.

Для достижения бетонным массивом прочности, требуемой проектом, самым простым и экономичным является метод термоса, основанный на принципе использования тепла, введенного в бетон путем прогрева материалов или бетонной смеси, до укладки её в опалубку или экзотермического тепла, выделяемого цементом в процессе его гидратации [9]. Поэтому термосное выдерживание рекомендуется применять в первую очередь при возведении монолитных конструкций. Возможность и целесообразность применения метода термоса устанавливается теплотехническим расчетом и технико-

экономическим обоснованием. Сочетание метода термоса с другими способами интенсификации твердения бетона позволяет расширить границы его применения для производства строительных работ при возведении монолитных конструкций. Следует учесть, что при всём многообразии методов тепловой обработки выбор каждого из них в отдельности или рациональное сочетание их с методом термоса в каждом конкретном случае должны осуществляться строителями и технологами совместно с строительной лабораторией, для чего необходимы актуальные и практичные математические системы расчётов, а так же соответствующие программные приложения.

Разработка элементов прогнозирования структурно-механических характеристик цементного камня и бетона при переменном температурном воздействии

При выполнении работ методом термоса, задача технолога – создать благоприятные условия твердения бетона, используя теплоту в его объеме, и поддерживать за этот счет положительную температуру бетона в течение времени выдерживания. Общий запас тепла в бетоне должен соответствовать его потерям при остывании конструкции (при соответствующем утеплении) до набора бетоном заданной прочности. Продолжительность выдерживания определяется временем, достаточным для достижения бетоном критической прочности.

В принципе, если известна температура самого бетонного массива, параметры теплоизоляции и прогноз погоды на предстоящий период, то теплотехнические расчеты изменения температуры массива можно осуществить по общеизвестным зависимостям [9, 10], как показано на рисунке 1.

Как известно, температура твердения бетона влияет на его прочность. Однако практически все предложенные для инженеров-технологов аналитические зависимости имеют один общий недостаток – они привязаны к проектному сроку твердения бетона, а именно 28 суткам. Температурно-влажностные условия и время твердения учитываются весьма усредненно. А как учесть влияние разнообразных химических добавок (пластифицирующих, воздухововлекающих, ускорителей твердения, противоморозных), без которых создание бетона, обеспечивающего проектную долговечность бетонных конструкций, весьма затруднительно? К сожалению, зависимости, учитывающие все влияющие факторы, либо отсутствуют, либо пока не доведены до практической реализации.

Следует отметить, что бетонный массив не инертен. В силу продолжающихся процессов гидратации его свойства непрерывно изменяются. Изменяется структура материала, физико-механические характеристики, тепловыделение цемента.

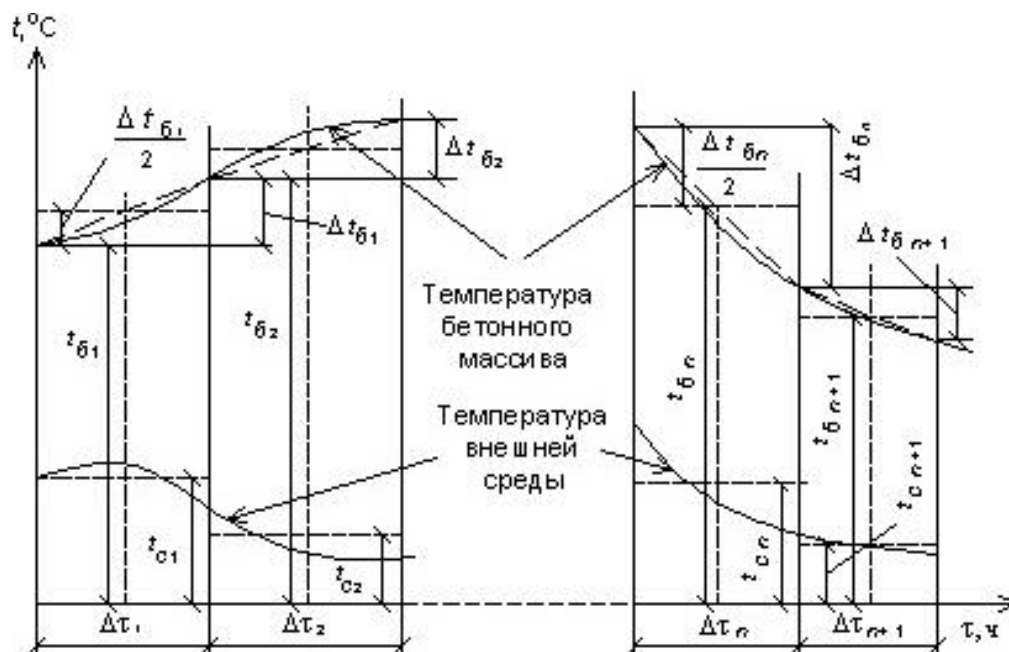


Рисунок 1 — Процессы изменения температуры бетонного массива $t_{бi}$ и внешней среды t_{ci} во времени τ

Тепловыделение является одной из важнейших характеристик, поскольку позволяет прогнозировать весь процесс твердения бетона. Обычно при его расчетах прибегают к использованию традиционных графиков или таблиц, увязывающих удельное тепловыделение с маркой и видом цемента, температурой и временем твердения бетона. На основании анализа и обработки данных, представленных в таблицах и графиках, авторами получены и обобщенные аналитические зависимости [11].

На практике же использование таблиц не позволяет учесть все многообразие возникающих ситуаций. Существенно облегчается расчет, если предположить, что тепловыделение цемента определяется степенью гидратации цемента. То есть каждый процент прогидратированного цемента определенного минералогического состава дает соответствующее количество выделенного тепла. В этом случае нет необходимости прибегать к существующим таблицам, в которых удельное тепловыделение находится в зависимости от активности и вида цемента. Достаточно применить соответствующие формулы и зависимости (1–4), где в процессе твердения учитываются и взаимно увязываются многочисленные влияющие внутренние и внешние факторы [14].

На основании вышеизложенного, а также учитывая предложенную ранее математическую модель для описания процесса гидратации цемента [12], как функцию внутренних (минералогический состав и марка цемента, водоцементное отношение, вид и количество химических добавок) и внешних (температура, время) факторов, используем предположение, что величина степени гидратации вяжущего определяет удельное тепловыделение цемента. Со степенью гидратации цемента увязывается также и текущая прочность бетона твердеющего массива. Таким образом, обеспечивается бетоноведческая часть общего процесса твердения – расчет общего количества тепла, выделяемого бетонным массивом в единицу времени.

$$q_u = (0,01668 \cdot C_3 S + 0,00251 \cdot C_2 S + 0,02808 \cdot C_3 A + 0,00238 \cdot C_4 AF) \cdot \alpha_\tau, \text{ кДж/кг.} \quad (1)$$

В результате получено аналитическое выражение (2) [15] для количественной оценки интенсивности гидратационных процессов цемента, где относительная степень гидратации цемента (α_τ в долях от значения в возрасте 28 суток) определяется временем (τ) и температурой (коэффициент k_t) твердения цементного камня (бетона),

$$\alpha_\tau = \frac{1 - \frac{C_3 S}{100} \cdot \exp(-\beta_1 \cdot \tau \cdot k_{\text{общ}}) - \left(1 - \frac{C_3 S}{100}\right) \cdot \exp(-\beta_2 \cdot \tau \cdot k_{\text{общ}})}{1 - \frac{C_3 S}{100} \cdot \exp(-\beta_1 \cdot 28 \cdot k_{\text{общ}}) - \left(1 - \frac{C_3 S}{100}\right) \cdot \exp(-\beta_2 \cdot 28 \cdot k_{\text{общ}})}, \text{ д. ед.} \quad (2)$$

При этом удалось расширить число влияющих факторов, включив коэффициент, зависящий от вида и дозировки противоморозных добавок ($k_{\text{пм}}$). Таким образом, общая оценка влияющих факторов ($k_{\text{общ}}$) может быть представлена в виде произведений указанных коэффициентов:

$$k_{\text{общ}} = k_t \cdot k_m \cdot k_s \cdot k_{\text{so}_3} \cdot k_w \cdot k_{dp} \cdot k_{du} \cdot k_{\text{пм}}. \quad (3)$$

Все коэффициенты находятся в функциональной связи с соответствующими факторами и рассчитываются по достаточно сложным зависимостям. Универсальность выражения (2) заключается в том, что оно позволяет включать в себя дополнительные влияющие факторы.

Статистическая проверка предложенной модели расчета степени гидратации цемента показала, что коэффициент вариации отклонений рассчитываемых величин степени гидратации цемента от фактических, полученных различными исследователями, не превышает 12 % [8], что подтверждает практическую приемлемость данной системы расчетов и не требует дополнительных исследований.

Прочность бетона на любой стадии твердения (f_6) может быть рассчитана в зависимости от свойств используемого заполнителя (k_s), активности цемента ($f_{\text{ц}}$), водоцементного отношения бетонной смеси (В/Ц) и соотношения текущего значения степени гидратации (α_τ) и степени гидратации цемента, твердеющего 28 суток в нормальновлажных условиях ($\alpha_{\text{нв}}$) (4) [14]:

Включение в модель и теплотехнических характеристик (конструктивные особенности опалубки, температура наружного воздуха) позволяет рассчитывать эмиссию тепла. Разность же величин поступившего и ушедшего тепла определяет температуру бетона. В свою очередь, температура бетона изменяет процесс гидратации цемента и тепловыделения и т. д. Таким образом, если непрерывно отслеживать процессы твердения, то по нашему мнению это позволит повысить точность вычислений. Важным представляется и то, что в данном случае можно учитывать и текущую температуру окружающего воздуха, а не некое ее усредненное значение на предстоящий период времени.

Нами ведётся работа над усовершенствованием математической модели, отражающей кинетику изменения прочности бетона. На основе предыдущих предположений о том, что при прочих равных условиях прочность бетона на любой стадии твердения является функцией степени гидратации цемента (или, что в принципе одно и то же, – количества химически связанной цементной воды) и, следовательно, если знать степень гидратации цемента, можно рассчитать как прочность бетона, так и иные параметры – например, его морозостойкость, водонепроницаемость, коррозионную стойкость [14].

Руководствуясь предположением о том, что количество выделенного при твердении бетона тепла прямо пропорционально степени гидратации вяжущего, можно прогнозировать величину тепловыделения бетонного массива. Основанием для такого предположения послужил анализ известных формул расчета относительной прочности бетона [13–20]. Анализ и статистическая обработка этих данных дала возможность получить зависимость, связывающую удельное тепловыделение цемента (q_u в кДж/кг) с величиной текущей степени его гидратации (α_τ в %) на конкретном этапе твердения цементного камня (1) [14]:

видом (коэффициент β_1), активностью (k_m), тонкостью помола (k_s) и минералогическим составом цемента (содержание C_3A – учитывается коэффициентом β_2 , гипса – k_{so_3}), начальным плодосодержанием цементного теста (k_w), видом и количеством пластифицирующих добавок (k_{dp}), добавок ускорителей твердения (k_{du}):

$$f_6 = \frac{0,3 \cdot k_s \cdot f_{\text{ц}}}{В/Ц - 0,1} \cdot \left(\frac{\alpha_\tau}{\alpha_{\text{нв}}}\right)^{1,7}, \text{ МПа.} \quad (4)$$

Данная зависимость – основа для количественной оценки прочности бетона как функции степени гидратации цемента.

Тогда расчеты параметров твердеющего бетонного массива можно производить в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2 [2].

С учетом удельного тепловыделения цемента, степени его гидратации и содержания в бетонном массиве рассчитывают общее количество выделяемого тепла. Количество же тепла, потерянного бетонным массивом, определяется конструктивными особенностями опалубки, габаритами конструкции, текущей температурой окружающего воздуха, скоростью ветра и характером контакта бетонируемой конструкции с окружающей средой. Разность тепла, выделенного в результате гидратационных процессов (а также привнесенного извне в случае применения внешнего нагревателя) и тепла, ушедшего в окружающее пространство и на нагрев арматуры, опалубки, компонентов бетона, определяет текущую температуру твердеющего бетонного массива. В свою очередь, новое значение температуры (большее или меньшее предыдущей) вызывает и соответствующее изменение скорости гидратации, тепловыделения и т. д. Таким образом, разбив весь времен-

ной процесс твердения на достаточно малые равные отрезки, можно постоянно отслеживать изменение температуры бетонного массива и прочности бетона, отражая кинетику твердения в виде графиков. В этом случае достигается достаточная точность вычислений, поскольку устраняется усреднение внешней температуры за определенный период времени – ее изменение непрерывно учитывается. В модель легко вводится долгосрочный прогноз погоды.

Мы пришли к многофакторной математической модели, позволяющей при переменных температурных условиях, в зависи-

мости от интенсивности тепловыделения бетонного массива, рассчитывать конструкционные и теплотехнические параметры опалубки и режима выдерживания, а также параллельно корректировать состав бетона для получения массива с требуемыми характеристиками.

На практике использование программной реализации данной модели не потребует большого опыта технолога и исключит ошибки, которые могут возникнуть из-за громоздких вычислений, постоянного обращения к справочным материалам, таблицам и графикам.



Рисунок 2 – Схема расчётов температуры бетонного массива и прочности бетона

Реализация математической модели в программном обеспечении

Компьютерная программа, реализованная на последних версиях языка программирования C#, параллельно решает задачу оптимизации состава бетона и конструкции опалубки, учитывая свойства компонентов бетонной смеси и прогноз погоды на период твердения бетонного массива. Ввод цифровой и текстовой информации посредством ручного набора на клавиатуре сведен к минимуму так как реализуется только слайдерами и комбинированными списками, что существенно ускоряет выбор параметров и практически исключает возможные ошибки и сбои в работе программы. Проект включает три основных модуля для проектирования состава бетона и параллельного определения оптимального режима твердения. Интерфейс этих модулей размещён на трёх вкладках:

- «Общие характеристики»;
- «СОСТАВ БЕТОНА»;
- «Режим твердения».

Вкладка «Общие характеристики» предназначена для ввода исходных данных (рисунок 3).

Интерфейс оформлен таким образом, чтобы пользователю было интуитивно понятно, как выбрать нужные значения. Форма разделена на области по группам параметров.

Раздел «Прогноз погоды на период твердения» содержит два слайдера для ввода температуры наружного воздуха и скорости ветра.

В разделе «Характеристики конструкции» задают геометрические размеры конструкции, а из комбинированного списка выбирают вид конструкции. После чего автоматически запускается расчёт модуля теплоотдающей поверхности, результат отображается в текстовом окне.

Далее указывают характеристики опалубки в разделе «Конструкция опалубки». Количество и номера слоёв выбирают посредством переключателей. Толщина каждого слоя устанавливается слайдером. Из раскрывающегося списка выбирают соответствующий материал слоя опалубки и получают его основные свойства для дальнейших расчётов.

Вкладка «СОСТАВ БЕТОНА» позволяет открыть ещё три вкладки для подбора материалов, установления требований и расчёта состава бетона (рисунок 4).

Моделирование режима твердения бетона

Файл Общие характеристики СОСТАВ БЕТОНА Предварительный разогрев Режим твердения Графики Раздел находится в разработке

Прогноз погоды на период твердения

Температура воздуха, град.С: -5

Скорость ветра, м/с: 5

Характеристики конструкции

Толщина, м: 2.4

Длина, м: 1.8

Ширина, м: 1.8

Вид конструкции: Массивный фундамент

Модуль теплоотдающей поверхности, 1/м: 4.6

Конструкция опалубки

Верх опалубки

№ слоя: 1 2 3 4 5 6 7

Толщина, мм: 20+100

Материал (плотность кг/м куб.; теплопроводность, Вт/(м град. С)): Доска + опилки

Стенки опалубки

№ слоя: 1 2 3 4 5 6 7

Толщина, мм: 50+100

Материал (плотность кг/м куб.; теплопроводность, Вт/(м град. С)): А1 профиль + минвата

Днище опалубки

№ слоя: 1 2 3 4 5 6 7

Толщина, мм: 0

Материал (плотность кг/м куб.; теплопроводность, Вт/(м град.С)):

Рисунок 3 – Вкладка «Общие характеристики» (окно ввода исходных данных)

Моделирование режима твердения бетона

Файл Общие характеристики СОСТАВ БЕТОНА Предварительный разогрев Режим твердения Графики Раздел находится в разработке

Подбор материалов для бетона Требования к бетону Состав бетона

Цемент

Производитель цемента: ОАО "Красносельскстройматериалы"

$f_{ц}$, МПа: 50

НГ, %: 25

Группа по коэффициенту эффективности при тепловой обработке: ☒ 1 ☐ 2 ☐ 3

Минералогический состав

Алит: 54 %

Белит: 21 %

Алюминат: 7 %

Браунмиллерит: 14 %

Заполнители

Крупный заполнитель

Вид:

- ☒ гранитный щебень
- ☐ известняковый щебень
- ☐ базальтовый щебень
- ☐ гравий
- ☐ щебень из гравия

Крупность:

- ☐ 10 мм
- ☒ 20 мм
- ☐ 40 мм
- ☐ 70 мм

Мелкий заполнитель

- ☒ стандартный
- ☐ дробленый

Модуль крупности: 2

Рисунок 4 – Вкладка «СОСТАВ БЕТОНА» (Подбор материалов для бетона)

Если используется цемент известного завода-поставщика, то при выборе завода из комбинированного списка в разделе «Цемент» автоматически заполняются поля его основных характеристик: активность, нормальная густота, группа по коэффициенту эффективности при тепловой обработке, минералогический состав. В противном случае все поля заполняются с помощью соответствующих слайдеров. Затем в разделе «Заполнители» в группе «Крупный заполнитель», используя переключатели, выбирают вид и крупность крупного заполнителя, а в группе «Мелкий заполнитель» – разновидность и модуль крупности мелкого заполнителя.

На вкладке «Требования к бетону» (рисунок 5) реализован интерфейс программного модуля, позволяющего установить, какой бетон мы должны получить в результате проектирования и выбрать химиче-

ские добавки, которые разделены на группы по назначению. В программный продукт введены пластифицирующие добавки, ускорители твердения и противоморозные добавки (Стахемент 3000, Хидетал-ГП-9альфа, FRAME GIPER S-SB, Стахемент C3, FRAME C3, Темп Ж45, Стахемент NS, Криопласт Премиум, Зимняя-П-3-НК и др.).

В разделе «Проектные характеристики бетона и бетонной смеси» задают класс бетона и марку бетонной смеси по удобоукладываемости. Указывают требуемое значение относительной прочности бетона. Справочно приводится значение средней прочности бетона применительно к нормативному коэффициенту вариации. В области «Химические добавки», варьируя слайдерами, подбирают количество каждой добавки в % от массы цемента. Результаты вычислений можно посмотреть на вкладке «Состав бетона» (рисунок 6).

Моделирование режима твердения бетона

Файл Общие характеристики СОСТАВ БЕТОНА Предварительный разогрев Режим твердения Графики Раздел находится в разработке

Подбор материалов для бетона Требования к бетону Состав бетона

Проектные характеристики бетона и бетонной смеси

Класс бетона: C50/60 Относительная прочность бетона: 70 % Коэффициент вариации: 13.5 % Средняя прочность бетона: 53.98 МПа

Марка бетонной смеси по удобоукладываемости: ПЗ (ОК=10-15см)

Химические добавки

Пластификатор

Добавка: Хидетал-ГП-9 альфа Дозировка по массе цемента: 0.6 %

Ускоритель твердения

Добавка: Стахемент NS (CrNS) Дозировка по массе цемента: 1 %

Противоморозная добавка

Добавка: Дозировка по массе цемента: 0 %

Рисунок 5 – Вкладка «СОСТАВ БЕТОНА» (Требования к бетону)

Моделирование режима твердения бетона

Файл Общие характеристики СОСТАВ БЕТОНА Предварительный разогрев Режим твердения Графики Раздел находится в разработке

Подбор материалов для бетона Требования к бетону Состав бетона

Расход материалов, кг/м куб.

	Первичный подбор состава:	Откорректированный состав с учётом условий твердения:
Цемент	341	340
Вода	172	150
В/Ц	0.5	0.44
Песок	710	717
Щебень	1195	1195

Химические добавки в бетон:

Пластификатор	Хидетал-ГП-9 альфа	0.6	0.5
Ускоритель твердения	Стахемент NS (CrNS)	1	1.2
Противоморозная добавка	-	0	0

Рисунок 6 – Вкладка «СОСТАВ БЕТОНА» (Состав бетона)

Существует возможность в производственных условиях производить корректировку состава с учетом технологических требований. Данный модуль обеспечивает реализацию основной цели проектирования состава бетона с комплексными химическими добавками – получение требуемых свойств бетонной смеси и бетона (заданная удобоукладываемость бетонной смеси, характеризующая подвижностью или жесткостью и требуемый класс бетона).

Вкладка «Режим твердения» позволяет рассчитывать температурные условия твердения бетона, обеспечивающие получение заданной прочности при минимальных затратах, и отображает результаты графически (рисунок 7).

Непосредственно на вкладке «Режим твердения» в соответствующих текстовых окнах выводятся параметры режима твер-

дения, полученные в результате расчетов: предположительное время твердения бетонного массива, требуемая температура бетонной смеси в момент укладки, температура бетона в начальный момент времени твердения, удельная мощность источника подогрева, если осуществляется подвод тепла. Примеры выбора режимов твердения и конструкций опалубок для фундамента приведены в таблице 1.

Полученные результаты можно просмотреть в виде графиков, наглядно иллюстрирующих максимально эффективный режим (рисунок 8, 9). Если результаты первичного расчета показали, что данный состав или режим твердения не позволяют обеспечить заданные свойства бетона, то по нажатию на соответствующую командную кнопку можно пересчитать состав или изменить режим.

Моделирование режима твердения бетона

Файл Общие характеристики СОСТАВ БЕТОНА Предварительный разогрев **Режим твердения** Графики Раздел находится в разработке

Температура бетонной смеси 25 град.С

Режим твердения

Температура бетона 21 град. С

Время твердения 3 суток 5 часов

Удельная мощность источника тепла 0 кВт/м куб.

Прочность бетона 55 %

Изменить режим Пересчитать Графики

Рисунок 7 – Вкладка «Режим твердения»

Таблица 1 – Режимы твердения и конструкции опалубок для фундамента

Способы выдерживания			Соответствующие конструкции опалубки (количество, толщина слоев, материал)		
Режимы твердения	Применение предварительного разогрева смеси	Химические добавки	Верх опалубки	Стенки опалубки	Днище опалубки
Режим твердения № 1	нет	нет	Доска 20 мм	Сталь 5 мм	нет
Режим твердения № 2	нет	Ускоритель твердения	Доска 20 мм Опилки 100 мм	Сталь 5 мм утеплитель минвата 100 мм	нет
Режим твердения № 3	Предварительный разогрев смеси	нет	Доска 20 мм Опилки 100 мм	Доска 20 мм	нет
Режим твердения № 4	Предварительный разогрев смеси	Ускоритель твердения	Доска 20 мм Опилки 100 мм	Доска 20 мм минвата 100 мм	нет
Режим твердения № 5	Предварительный разогрев смеси	Ускоритель твердения + пластифицирующая добавка	Доска 20 мм Опилки 100 мм	Алюминиевый профиль 50 мм минвата 100 мм	нет

Полученные результаты можно просмотреть в виде графиков, наглядно иллюстрирующих максимально эффективный режим (рисунки 8, 9). Если результаты первичного расчёта показали, что данный состав или режим твердения не позволяют обеспечить заданные свойства бетона, то необходимо пересчитать состав или изменить режим.

Программа позволяет в случае получения неудовлетворительных результатов для обеспечения более интенсивного и экономичного режима твердения бетона применить цемент с другим минералогическим составом и активностью, изменить вид и (или) количество добавки ускорителя твердения, использовать пластифицирующие и другие виды добавок, подобрать состав бетона с большей

фактической прочностью, изменить начальную температуру бетонной смеси. Для оптимизации можно изменить конструкцию опалубки, назначая другие значения толщины и материала теплоизолирующего слоя.

Предложенная программа продолжает тестироваться авторами с целью её усовершенствования. Рассматривается возможность разработки приложения с введением других влияющих факторов, оценочной стоимости реализации различных вариантов режима твердения, включение в выходные текущие характеристики не только температуры и прочности, но иных важных параметров – морозостойкости, водонепроницаемости, коррозионной стойкости и модуля упругости бетона.

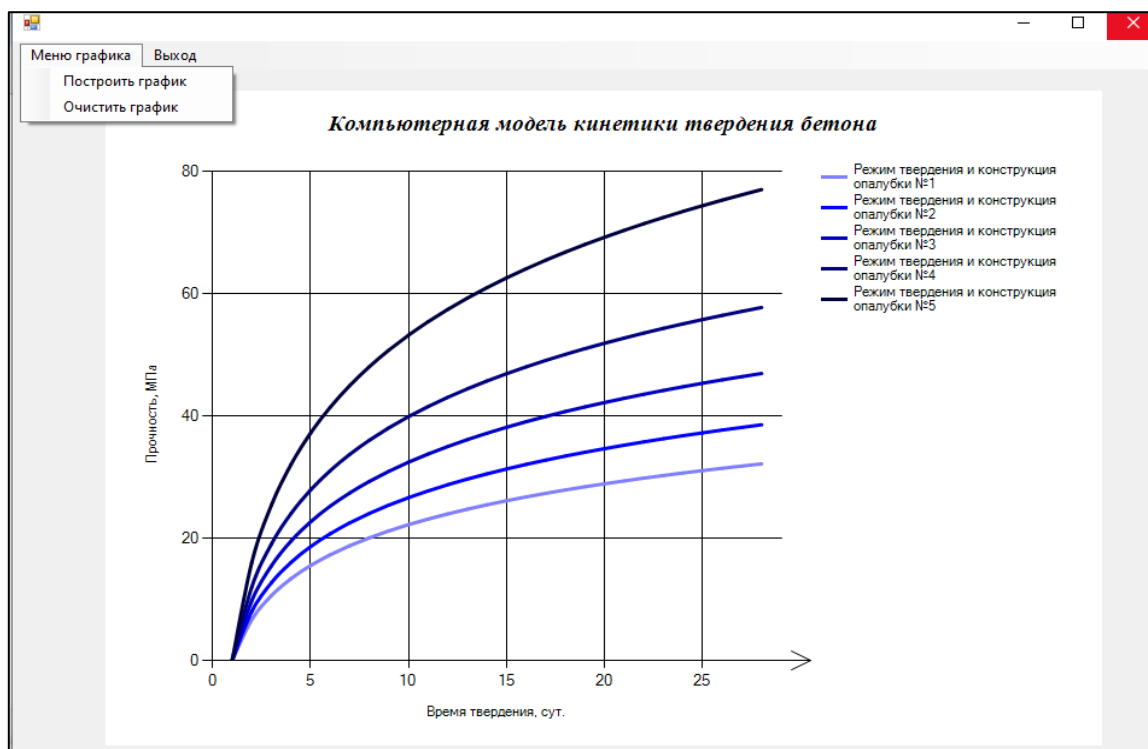


Рисунок 8 – Зависимость прочности бетона от времени твердения для различных режимов и конструкций опалубки

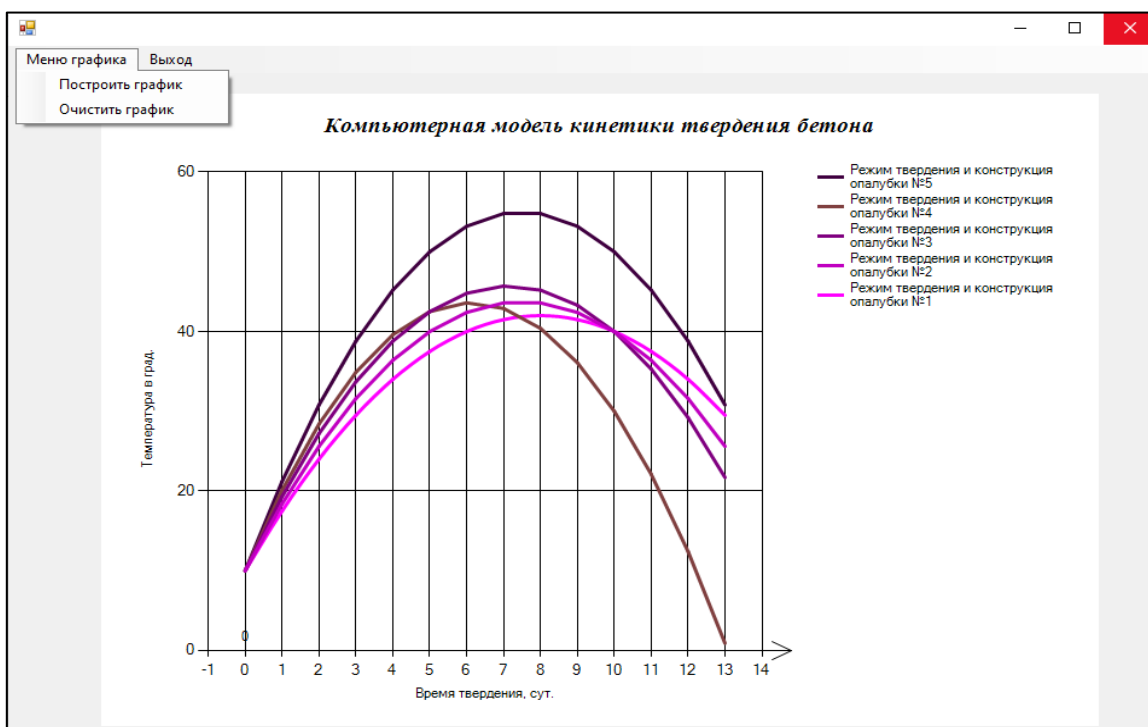


Рисунок 9 – Зависимость температуры бетона от времени твердения для различных режимов и конструкций опалубки

Заключение

Использование представленной математической модели и созданного на её основе программного продукта позволит проектировать состав бетона с химическими добавками и выбирать режим его твердения, обеспечивающие достижение требуемой прочности в интерактивном режиме. Это избавит инженера-технолога от необходимости проводить большой объем работы для экспериментальной проверки подобранных составов бетона и режимов его твердения.

Список цитированных источников

1. Бабицкий, В. В. Программное обеспечение расчетов параметров предварительного электронагрева бетонной смеси / В. В. Бабицкий, Ж. Л. Зеленковская // Современные проблемы внедрения европейских стандартов в области строительства : сборник трудов Междуна. науч.-техн. конф. – Минск, 2015. – С. 43–48.

2. Батяновский, Э. И. Технология зимнего монолитного бетонирования / Э. И. Батяновский, Н. М. Голубев, В. В. Бабицкий, М. Ф. Марковский. – Минск : БНТУ, 2005. – 237 с.
3. Михайлов, В. В. Новая технология тепловлажностной обработки конструкций / В. В. Михайлов, А. К. Караковский, В. С. Волков // Бетон и железобетон. – М. : Стройиздат. – 1988. – № 12. – С. 4–10.
4. Синякин, А. Г. Совершенствование режимов твердения бетонов с учетом неизо термического тепловыделения цемента : автореферат канд. техн. н. / А. Г. Синякин. – Харьков, 1995. – 18 с.
5. Мчедлов-Петросян, О. П. Тепловыделение при твердении вяжущих веществ и бетонов / О. П. Мчедлов-Петросян, А. В. Ушеров-Маршак, А. М. Урженко. – М. : Стройиздат, 1984. – 224 с.
6. Шифрин, С. А. Кинетика тепловыделения цемента и выбор эффективных режимов теплового воздействия на монолитный бетон : автореферат канд. техн. н. / С. А. Шифрин. – М., 1979. – 20 с.
7. Лысов, В. П. Формирование ресурсосберегающих технологических процессов возведения конструкций из монолитного бетона : автореферат доктора техн. н. / В. П. Лысов. – М., 1984. – 38 с.
8. Бобко, Ф. А. Обоснование режимов возведения бетонных и железобетонных конструкций на основе оптимизации энергетического потенциала технологических процессов. Результаты исследований, основы моделирования и прогнозирования : автореферат доктора техн. н. / Ф. А. Бобко. – Мн., 1998. – 39 с.
9. Дворкин, Л. И. Проектирование состава бетона при термосном выдерживании конструкции / Л. И. Дворкин, Ю. В. Гарницкий // Бетон и железобетон. – 2000. – № 6. – С. 9–15.
10. Лукьянов, В. С. Расчеты температурного режима бетонных и каменных конструкций при зимнем производстве работ / В. С. Лукьянов. – М. : НКПС Трансжелдориздат, 1934. – 91 с.
11. Запорожец, И. Д. Тепловыделение бетона / И. Д. Запорожец, С. Д. Окорков, А. А. Парийский. – Ленинград : Стройиздат, 1966. – 316 с.
12. Бабицкий, В. В. Температура, как фактор интенсивности роста прочности бетона / В. В. Бабицкий, Ж. Л. Зеленковская // Проблемы повышения качества и ресурсосбережения в дорожной отрасли : сборник трудов Международной научно-технической конференции. – Минск, 2013. – С. 82–86.
13. Попович, С. Кинетика прочности портландцементного камня / С. Попович // Бетон и железобетон. – 1972. – № 3. – С. 6–14.
14. Бабицкий, В. В. Прогнозирование кинетики твердения бетона при термосном выдерживании конструкций / В. В. Бабицкий // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века: информационный научно-технический журнал. – 2005. – № 4. – С. 66–67.
15. Бабицкий, В. В. Прогнозирование характеристик твердеющего тяжелого бетона / В. В. Бабицкий, С. Д. Семенюк, М. С. Бибик // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : збірник наукових праць. – Рівне, 2009. – Випуск 18. – С. 3–12.
16. Ушеров-Маршак, А. В. «Термобетон-М» – информационная технология монолитного бетона / А. В. Ушеров-Маршак, Ю. Б. Гиль, А. Г. Синякин // Бетон и железобетон. – 2000. – № 4. – С. 2–5.
17. Марцинкевич, В. Л. Энергосберегающая технология ускоренного твердения бетона / В. Л. Марцинкевич. – Минск : Наука и техника. – 1990. – 248 с.
18. Интенсификация теплообмена при ТВО изделий / В. П. Абрамов, В. В. Шмалько, В. П. Виноградов [и др.] // Бетон и железобетон. – 1988. – № 4. – С. 10–14.
19. Non-linear material modelling strategy for conventional and high-performance concrete assisted by testing / N. Pressmair, F. Brosch, M. Hammerl, B. Kromoser // Cement and Concrete Research. – 2022. – Vol. 161. – Paper 106933. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106933.
20. Сафаров, А. Р. Реализация численной модели бетона CSCM применительно к отечественным классам бетонов / А. Р. Сафаров, В. Б. Дорожинский, В. И. Андреев // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18, № 4. – С. 545–555. – DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.545-555.

References

1. Babickij, V. V. Programmnoe obespechenie raschetov parametrov predvaritel'nogo elektrorazogreva betonnoj smesi / V. V. Babickij, ZH. L. Zelenkovskaya // Sovremennye problemy vnedreniya evropejskikh standartov v oblasti stroitel'stva : sbornik trudov Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. – Minsk, 2015. – S. 43–48.
2. Batyanovskij, E. I. Tekhnologiya zimnego monolitnogo betonirovaniya / E. I. Batyanovskij, N. M. Golubev, V. V. Babickij, M. F. Markovskij. – Minsk : BNTU, 2005. – 237 s.
3. Mihajlov, V. V. Novaya tekhnologiya teplovlazhnostnoj obrabotki konstrukcij / V. V. Mihajlov, A. K. Karakovskij, V. S. Volkov // Beton i zhelezobeton. – M. : Strojizdat. – 1988. – № 12. – S. 4–10.
4. Sinyakin, A. G. Sovershenstvovanie rezhimov tverdeniya betonov s ucheto m neizotermicheskogo teplovydeleniya cementa : avtoreferat kand. tekhn. n. / A. G. Sinyakin. – Har'kov, 1995. – 18 s.
5. Mchedlov-Petrosyan, O. P. Teplovydelenie pri tverdenii vyazhushchih veshchestv i betonov / O. P. Mchedlov-Petrosyan, A. V. Ushero v-Marshak, A. M. Urzhenko. – M. : Strojizdat, 1984. – 224 s.
6. SHifrin, S. A. Kinetika teplovydeleniya cementa i vybor effektivnyh rezhimov teplovogo vozdeystviya na monolitnyj beton : avtoreferat kand. tekhn. n. / S. A. SHifrin. – M., 1979. – 20 s.
7. Lysov, V. P. Formirovanie resursosberegayushchih tekhnologicheskikh processov vozvedeniya konstrukcij iz monolitnogo betona : avtoreferat doktora tekhn. n. / V. P. Lysov. – M., 1984. – 38 s.
8. Bobko, F. A. Obosnovanie rezhimov vozvedeniya betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukcij na osnove optimizacii energeticheskogo potenciala tekhnologicheskikh processov. Rezul'taty issledovanij, osnovy modelirovaniya i prognozirovaniya : avtoreferat doktora tekhn. n. / F. A. Bobko. – Mn., 1998. – 39 s.
9. Dvorkin, L. I. Proektirovanie sostava betona pri termosnom vyderzhivanii konstrukcii / L. I. Dvorkin, YU. V. Garnickij // Beton i zhelezobeton. – 2000. – № 6. – S. 9–15.
10. Luk'yanov, V. S. Raschety temperaturnogo rezhima betonnyh i kamennyh konstrukcij pri zimnem proizvodstve rabot / V. S. Luk'yanov. – M. : NKPS Transzheldorizdat, 1934. – 91 s.
11. Zaporozhec, I. D. Teplovydelenie betona / I. D. Zaporozhec, S. D. Okorokov, A. A. Parijskij. – Leningrad : Strojizdat, 1966. – 316 s.
12. Babickij, V. V. Temperatura, kak faktor intensivnosti rosta prochnosti betona / V. V. Babickij, ZH. L. Zelenkovskaya // Problemy povysheniya kachestva i resursosberezheniya v dorozhnoj otrasli : sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. – Minsk, 2013. – S. 82–86.
13. Popovich, S. Kinetika prochnosti portlandcementnogo kamnya / S. Popovich // Beton i zhelezobeton. – 1972. – № 3. – S. 6–14.
14. Babickij, V. V. Prognozirovanie kinetiki tverdeniya betona pri termosnom vyderzhivanii konstrukcij / V. V. Babickij // Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka: informacionnyj nauchno-tekhnicheskij zhurnal. – 2005. – № 4. – S. 66–67.
15. Babickij, V. V. Prognozirovanie harakteristik tverdeyushchego tyazhelogo betona / V. V. Babickij, S. D. Semenyuk, M. S. Bibik // Resursoekonomni materialy, konstrukcii, budivli ta sporudi : zbirnik naukovih prac'. – Rivne, 2009. – Vipusk 18. – S. 3–12.
16. Ushero v-Marshak, A. V. «Termobeton-M» – informacionnaya tekhnologiya monolitnogo betona / A. V. Ushero v-Marshak, YU. B. Gil', A. G. Sinyakin // Beton i zhelezobeton. – 2000. – № 4. – S. 2–5.
17. Marcinkevich, V. L. Energosberegayushchaya tekhnologiya uskorenno go tverdeniya betona / V. L. Marcinkevich. – Minsk : Navuka i tekhnika. – 1990. – 248 s.
18. Intensifikaciya teploobmena pri TVO izdelij / V. P. Abramov, V. V. SHmal'ko, V. P. Vinogradov [i dr.] // Beton i zhelezobeton. – 1988. – № 4. – S. 10–14.
19. Non-linear material modelling strategy for conventional and high-performance concrete assisted by testing / N. Pressmair, F. Brosch, M. Hammerl, B. Kromoser // Cement and Concrete Research. – 2022. – Vol. 161. – Paper 106933. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106933.
20. Safarov, A. R. Realizaciya chislennoj modeli betona CSCM primenitel'no k otechestvennym klassam betonov / A. R. Safarov, V. B. Dorozhinskij, V. I. Andreev // Vestnik MGSU. – 2023. – T. 18, № 4. – S. 545–555. – DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.545-555.

Материал поступил 12.03.2025, одобрен 23.03.2025,
принят к публикации 28.03.2025