

УДК 693.547

СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТВЕРДЕНИЯ МОНОЛИТНОГО БЕТОНА С КОМПЛЕКСНЫМИ ХИМИЧЕСКИМИ ДОБАВКАМИ

Ж.Л. Зеленковская, В.В. Бабицкий

Белорусский национальный технический университет, Минск

e-mail: zhannazelenaya@yandex.by

Предложена модель расчета параметров бетона, учитывающая как его состав, так и температурно-временные условия твердения. Исследовано изменение характеристик цементного камня (степень гидратации цемента, капиллярная пористость, предел прочности на сжатие) с различным начальным водоцементным отношением без и с химическими добавками. Предложен программный продукт для расчета параметров твердения монолитного бетона.

Ключевые слова: монолитный бетон, химические добавки, твердение бетона, математическая модель.

STRUCTURAL AND MECHANICAL SIMULATION OF THE SOLIDITY OF MONOLITHIC CONCRETE WITH INTEGRATED CHEMICAL ADDITIVES

Z. Zelenkovskaya, V. Babitsky

Belarusian National Technical University, Minsk

e-mail: zhannazelenaya@yandex.by

A model is proposed for calculating concrete parameters, taking into account both its composition and temperature-time hardening conditions. The change in the characteristics of cement stone (degree of cement hydration, capillary porosity, compressive strength) with a different initial water-cement ratio without and with chemical additives was investigated. A software product for calculating the hardening parameters of monolithic concrete is proposed.

Keywords: monolithic concrete, chemical additives, concrete hardening, mathematical model.

Введение. С развитием в Республике Беларусь монолитного строительства инженеру–технологу на практике приходится сталкиваться с трудностями учета климатических факторов и условий ведения строительных работ, которые сказываются на качестве бетона. Это происходит из-за крайней неоднородности структурных и физико–механических свойств бетона монолитных бетонных и железобетонных конструкций.

Методы бетонирования монолитных конструкций в целом отработаны, оптимизированы после многочисленных проб и ошибок, причем обычно применительно к какому-то определенному поставщику цемента, постоянно применяемым химическим добавкам и пр.

Однако использование, например, какой-либо новой химической добавки ставит инженера-технолога перед необходимостью проводить большой объем работы, примерно назначая по имеющимся разнообразным таблицам, графикам, собственным данным варианты режимов твердения монолитного бетона с их последующей экспериментальной проверкой.

Целесообразнее параметры режима твердения монолитного бетона не получать в результате экспериментальной проверки вариантов, а проектировать, для чего, естественно, необходимы соответствующие инструменты.

Для улучшения эксплуатационных характеристик бетона широко используются самые разнообразные добавки. Соответственно необходимы методики для проектирования составов бетона с такими добавками.

Основная задача в данном случае заключается в получении математической модели, которая взаимно учитывает технологическую (кинетика изменения характеристик бетона) и теплотехническую (текущая температура окружающей среды и способы подвода тепла) стороны процесса.

Необходимость такой увязки несомненна, но на практике реализуется недостаточно, в основном по причине отсутствия формул, позволяющих связать многочисленные влияющие факторы в единый комплекс.

В данной статье представлено доступное программное обеспечение, позволяющее комплексно оптимизировать состав бетона и рассчитать требуемые теплотехнические характеристики опалубки с целью получения в проектный срок заданных свойств бетона.

Структурообразование цементного камня. В основе предлагаемой методики проектирования режима твердения бетона лежит представление о том, что его свойства, формирующиеся в процессе твердения, определяются кинетикой изменения степени гидратации цемента, которая, в свою очередь, зависит от следующих основных факторов:

- минералогический состав, тонкость помола и активность цемента;
- водоцементное отношение бетонной смеси;
- температурно-влажностные условия и время твердения;
- вид и дозировка химических добавок;
- особенности технологии производства изделий.

Следовательно, знание величины степени гидратации цемента в данный момент времени, позволяет рассчитывать прочность твердеющего бетона. Весь период твердения разбивается на равные интервалы.

Процесс проектирования режима заключается в выполнении для каждого последующего интервала времени следующих основных операций:

- 1) применительно к концу текущего интервала времени, в зависимости от всего комплекса влияющих факторов и температуры бетона изделия к концу предыдущего интервала времени определяется степень гидратации цемента;
- 2) рассчитывается прочность бетона в изделии;
- 3) в зависимости от степени гидратации и минералогического состава цемента рассчитывается тепловыделение цемента;
- 4) рассчитываются температуры поверхности и центра изделия, а также бетона изделия в целом;
- 5) определяется баланс прихода и расхода теплоты, теплотехнические параметры процесса.

Для экспериментального исследования влияния комплексных химических добавок на кинетику изменения степени гидратации цемента (и соответственно структурных характеристик цементного камня и бетона) использована достаточно простая и в то же вре-

мя вполне достоверная методика, заключающаяся в нахождении химически связанной воды в предварительно высушенной, а затем прокаленной навеске гранул цементного камня [1]. Капиллярная пористость рассчитывалась по общеизвестным формулам с учетом водоцементного отношения цементного теста и степени гидратации цемента. Предел прочности цементного камня на сжатие исследовался на образцах с ребром 2 см.

Составы цементного теста выбирались таким образом, чтобы варьировать относительное водосодержание (по И.Н. Ахвердову) [3] в пределах от 0,876 до 1,65 без добавок, а также с добавками сульфата натрия (СН на рисунках), аналог С-3 суперпластификатор СП-1 (СП), микропоран (МП). Результаты представлены на рис. 1-8.

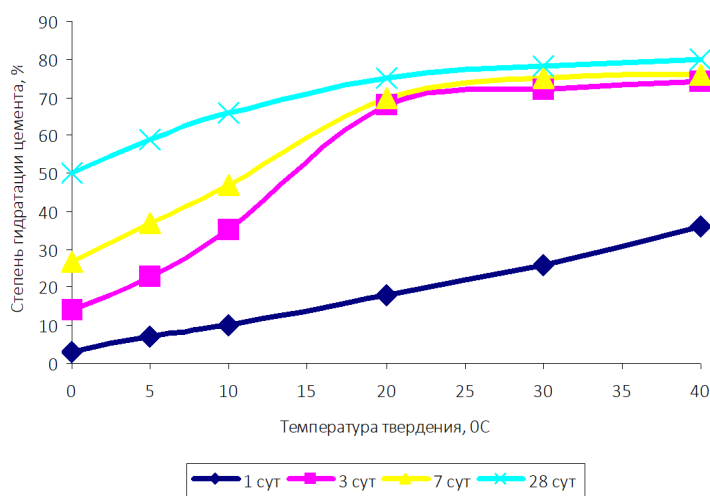


Рисунок 1. – Зависимость степени гидратации цемента от температуры твердения цементного камня без добавок при относительном водосодержании цементного теста, равном 1,2, в различные сроки твердения

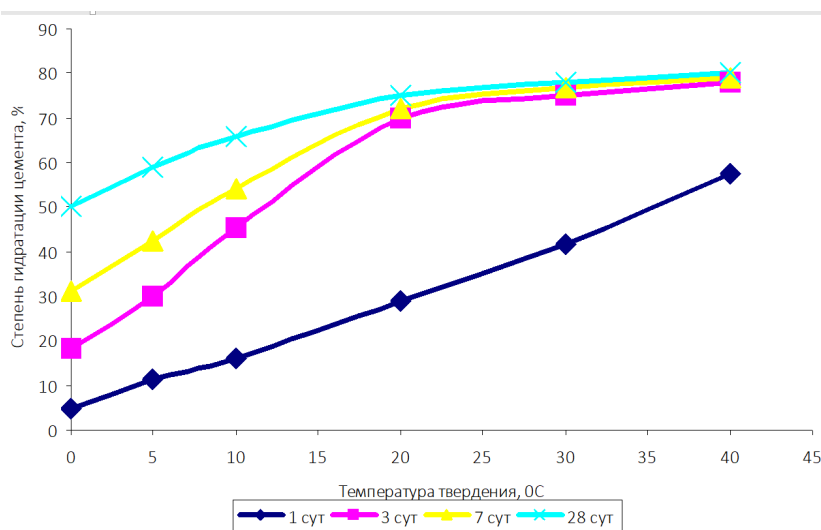


Рисунок 2. – Зависимость степени гидратации цемента от температуры твердения цементного камня с добавкой СН при относительном водосодержании цементного теста, равном 1,2, в различные сроки твердения

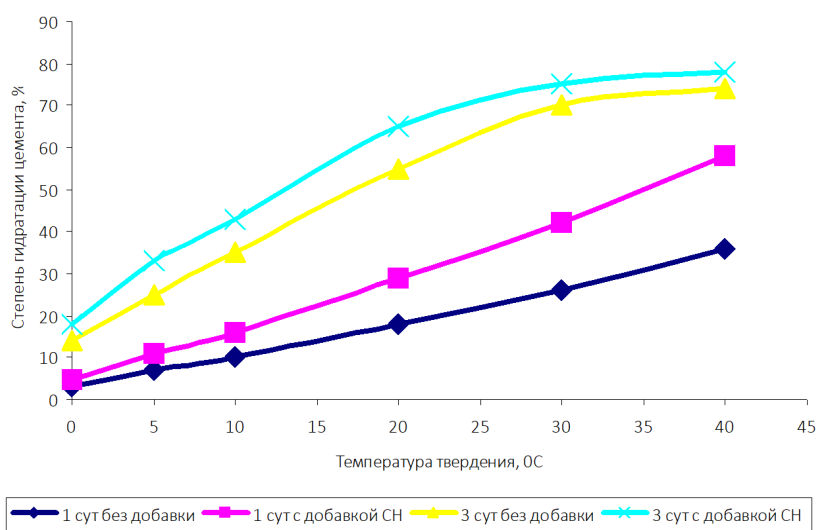


Рисунок 3. – Зависимость степени гидратации цемента от температуры твердения цементного камня при относительном водосодержании цементного теста, равном 1,2, в различные сроки твердения

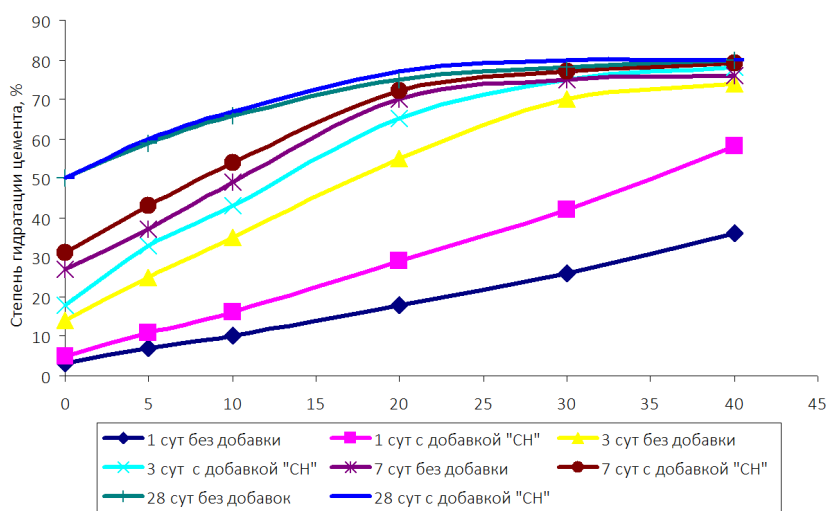


Рисунок 4. – Зависимость степени гидратации цемента от температуры твердения цементного камня при относительном водосодержании цементного теста, равном 1,2, в различные сроки твердения

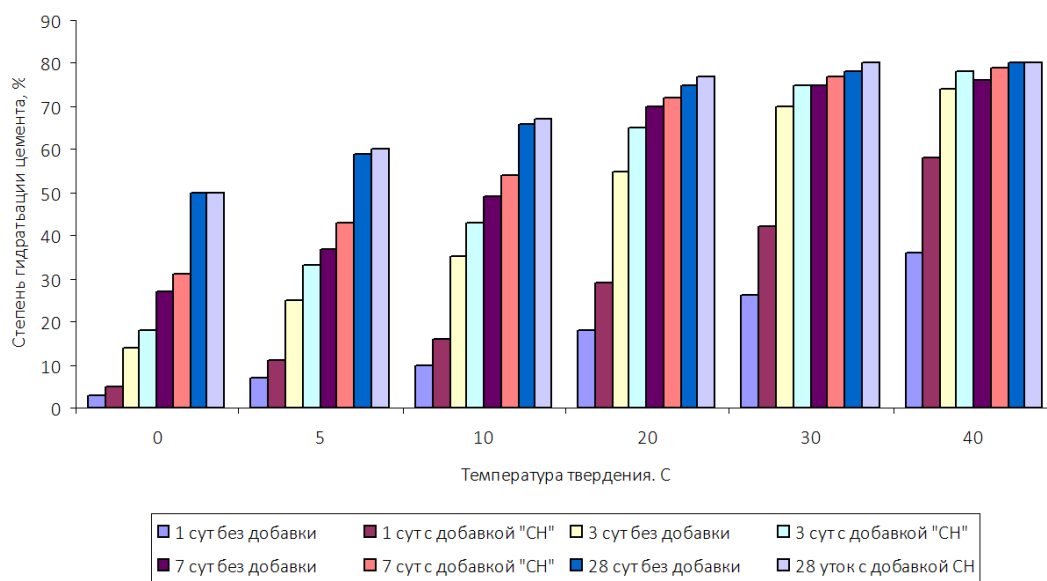


Рисунок 5. – Изменение степени гидратации цемента при повышении температуры в 1, 3, 7, 28 сутки твердения без добавок и с добавкой СН

Кинетика изменения характеристик цементного камня с комплексными химическими добавками в возрасте 3 суток нормально-влажностного твердения представлена на рис. 6–8.

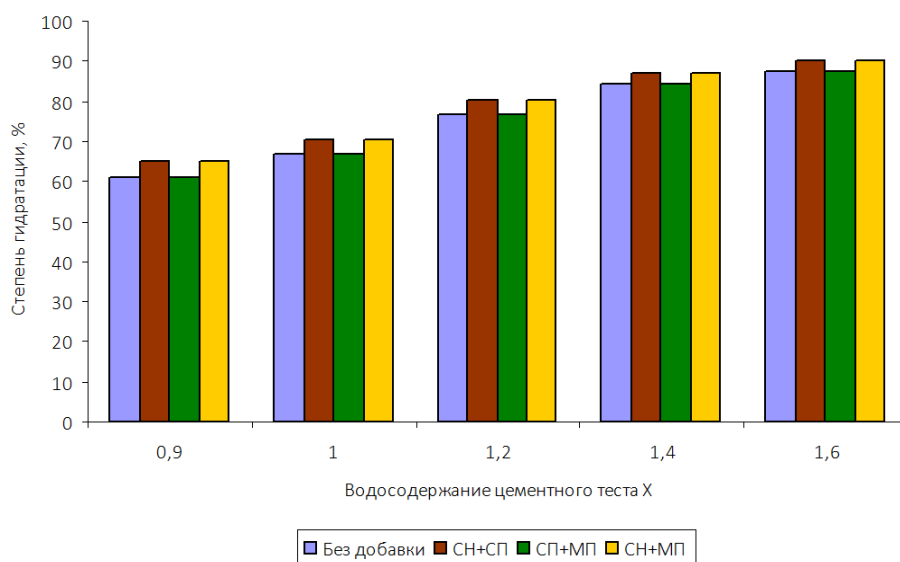


Рисунок 6. – Влияние химических добавок и относительного водосодержания цементного теста на изменение степени гидратации цемента

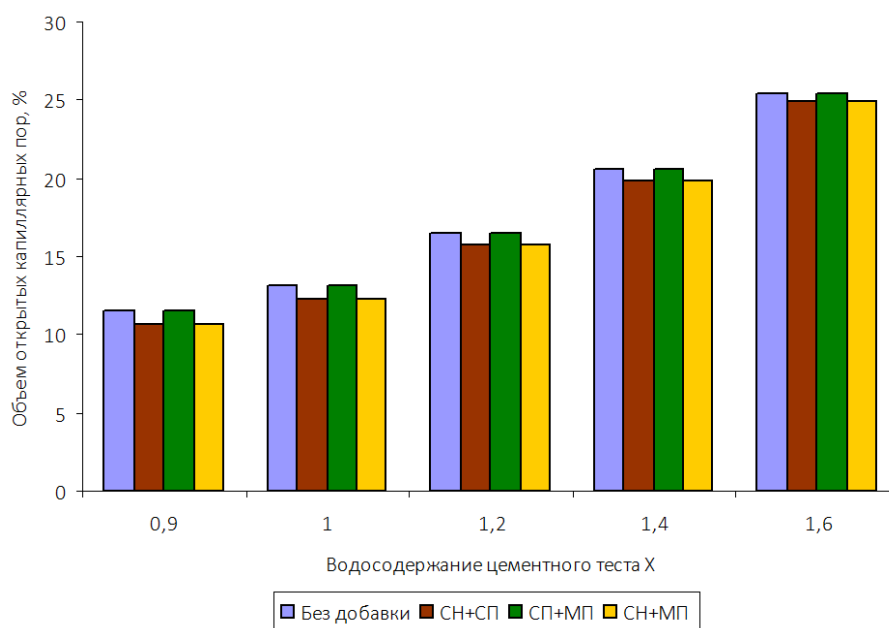


Рисунок 7. – Влияние химических добавок и относительного водосодержания цементного теста на изменение капиллярной пористости цементного камня

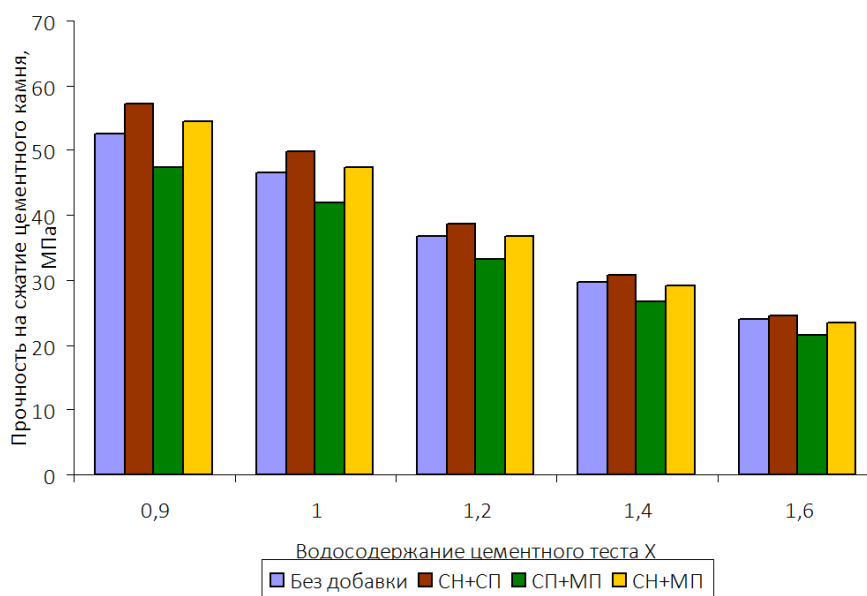


Рисунок 8. – Влияние химических добавок и относительного водосодержания цементного теста на изменение прочности на сжатие цементного камня

Полученные результаты использованы для пошагового расчета параметров твердеющего бетона и при разработке программного продукта.

Программный продукт. На рис. 9 приведен интерфейс программного обеспечения, позволяющего параллельно оптимизировать состав бетона, а также рассчитать требуемые теплотехнические характеристики опалубки с целью получения в проектный срок заданных свойств бетона. В программе реализован подбор состава тяжелого бетона (с

противоморозными, пластифицирующими, воздухововлекающими добавками, ускорителями твердения) и расчет параметров режима термосного выдерживания.

Бетонирование с применением метода термоса базируется на принципе использования тепла, введенного в бетон на стадии приготовления бетонной смеси (как пример – при ее электроразогреве в бункере перед укладкой в опалубку) и тепловыделения цемента в процессе гидратации (экзотермия цемента).

На рисунке 9 представлено окно программного модуля, отражающее исходные данные и результаты вычислений:

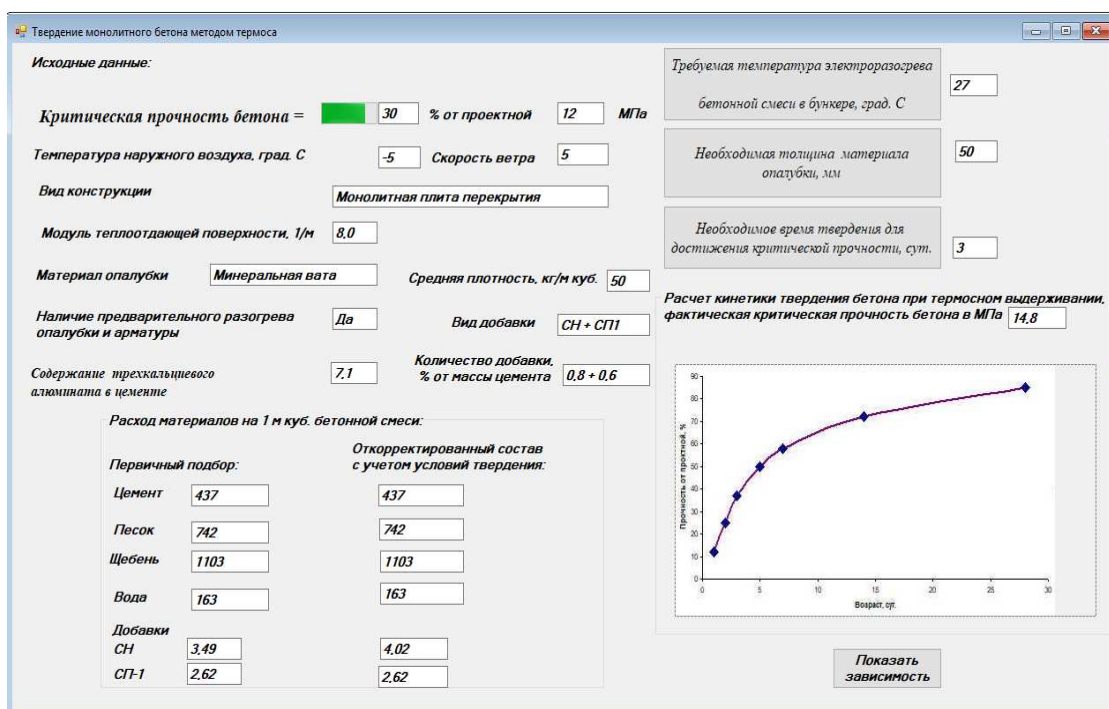


Рисунок 9. – Диалоговое окно программного обеспечения

Последовательность расчета, используемая в программном модуле:

Пользователь вводит исходные данные: расчетное значение критической прочности бетона, которое должно быть не ниже требований, рекомендованных в [2] и соответствовать требованиям проектной документации к распалубочной прочности бетона конструкции, температуру наружного воздуха, скорость ветра, выбирает вид конструкции с заданной площадью поверхности, объемом бетона, модулем теплоотдающей поверхности бетонируемой конструкции.

Устанавливается значение средней температуры бетона за расчетный период твердения, которое обеспечивает достижение требуемой критической прочности. В случае применения добавок — ускорителей твердения: $CaCl_2$, Na_2SO_4 , а также цемента, содержащего $C_3A \geq 7\%$ или $C_3S + C_3A \geq 60\%$, продолжительность выдерживания бетона в опалубке уточняется в соответствии с рекомендациями [2].

Далее по известным зависимостям в автоматическом режиме производится расчет.

Определяется температура предварительного разогрева бетонной смеси, которая обеспечивает принятую по средней температуре за текущий период твердения бетона

с учетом снижения температуры при укладке смеси в опалубку и конечной температуры бетона к моменту распалубки:

$$t_{\text{раз}} = \frac{(t_{\text{сп}} - t_{\text{БК}}) \cdot (1,03 + 0,181M_n)}{1 - 0,006 \cdot (t_{\text{сп}} - t_{\text{БК}})} + t_{\text{укл}}. \quad (1)$$

В случае укладки бетона на неотогретое основание температура разогрева определяется по формуле:

$$t'_{\text{раз}} = \frac{c_{\text{б}} \rho_{\text{б}} V_{\text{б}} t_{\text{раз}} - c_{\text{ст}} m_{\text{ст}} V_{\text{б}} (t_{\text{сп}} - t_{\text{н.в}}) - Q_{\text{оп}} - Q_{\text{очн}}}{c_{\text{б}} \rho_{\text{б}} V_{\text{б}} + c_{\text{ст}} m_{\text{ст}} V_{\text{б}} + \sum_{i=1}^n c_i F_i \delta_i \rho_i + c_{\text{очн}} \rho_{\text{очн}} V_{\text{очн}}}. \quad (2)$$

Производится расчет снижения температуры бетона при подаче и укладке смеси в опалубку, включая операции заглаживания, гидро- и теплоизоляции поверхности конструкции.

Уточняется значение температуры разогрева бетонной смеси с учетом всех теплотерь:

$$t''_{\text{раз}} = t_{\text{раз}} + (t_{\text{раз}} - t'_{\text{раз}}). \quad (3)$$

Значение средней температуры бетона за период твердения с учетом всех теплотерь на отогрев рассчитывается по формуле:

$$t'_{\text{сп}} = t_{\text{БК}} + \frac{t''_{\text{раз}} - t_{\text{БК}}}{1,03 + 0,181M_n + 0,006 \cdot (t''_{\text{раз}} - t_{\text{БК}})}. \quad (4)$$

Уточняется продолжительность остывания бетона в опалубке по известной формуле Б.Г. Скрамтаева — С.А. Миронова:

$$\tau_{\text{ост}} = \frac{c_{\text{б}} \rho_{\text{б}} (t''_{\text{раз}} - t_{\text{БК}}) + \zeta \cdot \Theta}{3,6K_{\text{т}} M_n (t'_{\text{сп}} - t_{\text{н.в}})}. \quad (5)$$

Далее вычисляется коэффициент теплопередачи опалубки бетонируемой конструкции:

$$K_{\text{т}} = \frac{F_1 K_{\text{т}1} + F_2 K_{\text{т}2} + \dots + F_n K_{\text{т}n}}{F_1 + F_2 + \dots + F_n}. \quad (6)$$

После этого идет проверка соответствия полученных значений, обеспечивающих набор требуемой критической прочности бетона.

При необходимости ускорения набора прочности бетона выполняется корректировка состав бетона: меняются расход цемента, количество вводимых добавок и т. п., а также предусматривается отогрев основания (арматуры, опалубки) для снижения потерь тепла в бетоне, выбирается опалубка с меньшим коэффициентом теплопередачи.

При необходимости рассчитывается значение $K'_{\text{т}}$, обеспечивающее в конкретных условиях производства работ требуемую продолжительность остывания и достижение критической прочности бетона:

$$K'_{\text{т}} = \frac{c_{\text{б}} \rho_{\text{б}} (t'_{\text{раз}} - t_{\text{БК}}) + \zeta \cdot \Theta}{3,6M_n (t'_{\text{сп}} - t_{\text{н.в}}) \cdot \tau_{\text{ост}}}. \quad (7)$$

Значения коэффициента теплопередачи опалубки конструкции в зависимости скорости ветра определяется на основе данных, введенных в программу из [2].

Значение коэффициента теплопередачи у наружной поверхности опалубки принимают по [2] в зависимости от скорости ветра, введенной пользователем и полученной из метеопрогноза.

Толщину слоя используемого утеплителя опалубки, обеспечивающего значение K'_T , программный модуль вычисляет по формуле:

$$\delta_{из} = \lambda_{из} \left[\frac{1}{K'_T} - \left(\frac{1}{\alpha} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right) \right]. \quad (8)$$

Заключение. Использование представленного программного обеспечения позволит проектировать состав бетона и выбирать режим его твердения, который обеспечит достижение требуемой прочности и избавит инженера-технолога от необходимости проводить большой объем экспериментальной работы для оптимизации параметров твердеющего монолитного бетона.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Пауэрс, Т. Физические свойства цементного теста и камня / Т. Пауэрс // в кн.: Четвертый Международный конгресс по химии цемента. – Москва: Стройиздат, 1964. – с. 402–438.
2. Бетонные работы при отрицательных температурах воздуха. Правила производства работ: ТКП 45-5.03-21-2006 (02250): Технический кодекс установившейся практики. – Минск: Министерство архитектуры и строительства РБ, 2006. – 103 с.
3. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона / И.Н. Ахвердов. – Москва: Стройиздат, 1981. – 464 с.
4. Батыновский, Э.И., Голубев, Н.М., Бабицкий, В.В., Марковский, М.Ф. Технология зимнего монолитного бетонирования / Э.И. Батыновский, Н.М. Голубев, В.В. Бабицкий, М.Ф. Марковский. – Мн: БНТУ, 2005. – с. 41–52.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК СТАТЕЙ
II МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(Новополоцк, 28–29 ноября 2019 г.)

Новополоцк
Полоцкий государственный университет
2020

1 – дополнительный экран – сведения об издании

УДК 72:624/628+69(082)

Редакционная коллегия:

Л. М. Парфенова (председатель),
А. С. Катульская (отв. секретарь), Е. Д. Лазовский,
Н. В. Давыденко, Р. М. Платонова

АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ
[Электронный ресурс] : электронный сборник статей II международной научной конференции, Новополоцк, 28–29 нояб. 2019 г. / Полоцкий государственный университет ; под ред. Л. М. Парфеновой. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2020. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

ISBN 978-985-531-701-3.

Рассмотрены вопросы архитектуры и градостроительства в современных условиях, прогрессивные методы проведения инженерных изысканий и расчета строительных конструкций. Приведены результаты исследований ресурсо- и энергосберегающих строительных материалов и технологий, энергоресурсосберегающие и природоохранные инновационные решения в инженерных системах зданий и сооружений. Проанализированы организационные аспекты строительства и управления недвижимостью, проблемы высшего архитектурного и строительного образования.

Для научных и инженерно-технических работников исследовательских, проектных и производственных организаций, а также преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов строительных специальностей учреждений образования.

*Сборник включен в Государственный регистр информационного ресурса.
Регистрационное свидетельство № 3671815379 от 26.04.2018.*

211440, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, Беларусь
тел. 8 (0214) 53 53 92, e-mail: a.bakatovich@psu.by; l.parfenova@psu.by

№ госрегистрации 3671815379.

ISBN 978-985-531-701-3

@Полоцкий государственный университет, 2020

2 – дополнительный титульный экран – производственно-технические сведения

Для создания текстового электронного издания «Архитектурно-строительный комплекс: Проблемы, перспективы, инновации» использованы текстовый процессор Microsoft Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК СТАТЕЙ
II МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(Новополоцк, 28–29 ноября 2019 г.)

Технический редактор *Т. А. Дарьянова*.

Компьютерная верстка *Т. А. Дарьяновой*.

Компьютерный дизайн обложки *Е. А. Балабуевой*.

Подписано к использованию 09.09.2020.

Объем издания: 21,05 Мб. Тираж 3 диска. Заказ 420.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

Свидетельство о государственной регистрации
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.2014.

211440, ул. Блохина, 29,
г. Новополоцк,
Тел. 8 (0214) 59-95-41, 59-95-44
<http://www.psu.by>