

doi: 10.5862/MCE.54.4

Моделирование набора прочности бетона в программе ELCUT при прогреве монолитных конструкций проводом

Студент М.О. Дудин;

д.т.н., директор Инженерно-строительного института Н.И. Ватин;

д.т.н., профессор Ю.Г. Барабанщиков,

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Аннотация. Монолитное строительство в зимнее время сталкивается с проблемами набора прочности бетона при отрицательной температуре окружающей среды. В целях обеспечения необходимых температурных условий для твердения и упрочнения бетона используют различные методы прогрева конструкций. Одним из способов является применение греющего провода.

Актуальность статьи обусловлена климатическими условиями строительства на большей части территории России и отсутствием единой методики расчета требуемой мощности прогрева греющим проводом. В статье рассмотрены различные рекомендации по осуществлению температурного выдерживания железобетонных конструкций.

В программе ELCUT и надстройке WinConcret произведено моделирование прогрева проводом тонкостенного монолитного перекрытия по профлисту между кирпичными стенами. Осуществлены расчет набора прочности бетона и анализ температурных полей в сечении перекрытия. Решена задача о температурных деформациях бетона.

Ключевые слова: зимнее бетонирование; греющий провод; ELCUT; моделирование прогрева; температурные деформации; набор прочности; монолитные конструкции

Введение

Обеспечение температурных условий, необходимых для твердения и набора прочности бетона в зимнее время, является актуальной проблемой современной строительной науки [1–3]. В настоящее время существует множество методик осуществления прогрева бетона. Безусловно, требуется комплексный подход при производстве бетонных работ при отрицательной температуре. Обязательно применение различных противоморозных добавок [4–8].

Под зимним бетонированием понимается производство работ при температуре наружного воздуха ниже 5 °С и минимальной суточной температуре ниже 0 °С [9]. Главным процессом при твердении и наборе прочности бетона является реакция гидратации цемента. Эта реакция экзотермическая, т. е. протекает с выделением тепла [10, 11]. Однако при низких температурах скорость реакции замедляется, бетон перестает набирать прочность, возможно обрушение строительных конструкций.

Обнаружены три группы нарушений, возникающих в материале. Во-первых, при замораживании бетонов вода, не вступившая в реакцию гидратации цемента, переходит из жидкой фазы в твердую, образуя лед и расширяясь в объеме. Это приводит к нарушению структуры и частичному разрушению. Во-вторых, в бетоне происходят процессы массопереноса, которые при отрицательной температуре окружающей среды на начальном этапе выдерживания приводят к образованию дефектных участков. В-третьих, структура бетона перестает быть монолитной [1].

Железобетонные конструкции в монолитном исполнении зимой прогревают различными способами. Существует несколько технологий зимнего бетонирования [1, 12–17]. Все они связаны с термообработкой бетона строительных конструкций. В зависимости от модуля поверхности конструкции (отношения площади остывания к объему бетона) рекомендуют различные методы прогрева. Для тонкостенных конструкций с большим модулем поверхности применяют прогрев проводом.

Суть метода состоит в укладке провода с большим электрическим сопротивлением в конструкцию перед заливкой бетонной смеси. Провода подключаются к станциям прогрева бетона или трансформаторам. Под действием электрического тока провод нагревается и является источником тепла для железобетонных конструкций.

Данный метод, кажущийся простым и действенным, на самом деле связан со сложными электротехническими и термодинамическими расчетами. Не существует единой методики расчета необходимой мощности прогрева строительных конструкций [9, 18, 19].

Дудин М.О., Ватин Н.И., Барабанщиков Ю.Г. Моделирование набора прочности бетона в программе ELCUT при прогреве монолитных конструкций проводом

Правильный режим термообработки бетона влияет на конечный результат и прочность конструкции. Предварительный расчет и последующий контроль температуры являются важными составляющими зимнего бетонирования [20–25]. Именно предварительный расчет температуры выдерживания и решение задачи термодинамики являются необходимыми условиями получения качественной монолитной строительной конструкции.

Существующие ручные расчеты довольно приближительны и не учитывают всех факторов, влияющих на температуру. Моделирование с использованием современных программно-вычислительных комплексов способно решить данную проблему [20, 26, 27]. Одним из программно-вычислительных комплексов, призванных решать такие задачи методом конечных элементов, является программный пакет ELCUT. Он вместе с надстройкой WinConcret способен рассчитать температурные поля, построить график набора прочности бетона и рассчитать температурные деформации от прогрева строительных конструкций.

Данная программа рассчитывает температурные поля в плоскости сечения конструкции, решая стационарную задачу в качестве начальных условий, а затем решает нестационарные задачи с построением температурных полей с заданным шагом интегрирования. В ELCUT существует возможность задания различных источников тепла, материалов, условий окружающей среды. В надстройке WinConcret реализована возможность учета тепла от реакции гидратации цемента. Решением задачи является множество температурных полей в различное время прогрева, программа строит график прогрева отдельных участков, а также график набора прочности бетона.

В решении механической задачи рассмотрены деформации от температурных нагрузок на бетон. Решением является деформированная схема строительной конструкции с анализом ее напряженно-деформированного состояния.

В рамках работы выполнено моделирование термодинамической задачи прогрева бетона монолитного перекрытия по профлисту греющим проводом. Построен график набора прочности бетона, произведен анализ температурных деформаций в программе ELCUT.

1. Постановка задачи

В качестве объекта исследования выбрано монолитное перекрытие по профлисту на стальных балках (см. рис. 1). Перекрытие окружено кирпичными стенами, что характерно для объектов реконструкции в Санкт-Петербурге. Наибольшая толщина перекрытия 90 мм. Перекрытие бетонируется при отрицательной температуре окружающей среды ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$). Прогрев осуществляется проводом, уложенным в плиту, с шагом 100 мм, а также конвективным прогревом снизу с поддерживаемой температурой $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Плита утеплена сверху экструдированным пенополистиролом толщиной 100 мм. Потери тепла в конструкции происходят через кирпичные стены сбоку и алюминиевый профлист снизу.

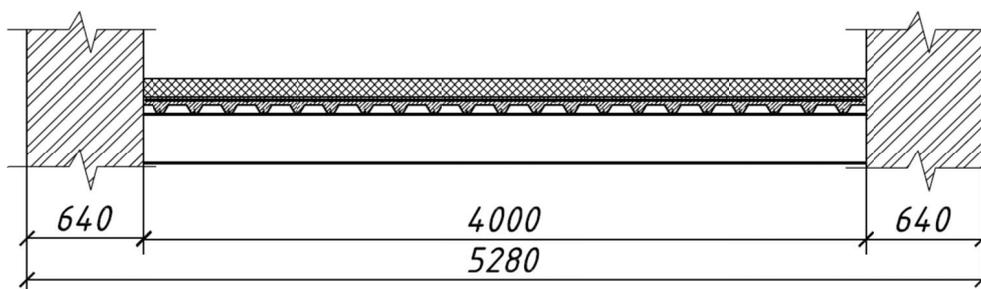


Рисунок 1. Поперечное сечение моделируемого перекрытия между балками

2. Решение задачи термодинамики процесса прогрева конструкции

2.1. Анализ ручного расчета характеристик прогрева

В настоящее время не существует единой методики расчета прогрева и регламентирующих документов в области выбора параметров прогрева конструкции. Руководствуясь МДС 12-48.2009 «Зимнее бетонирование с применением нагревательных проводов» [9] и ТСН 12-336-2007 «Производство бетонных работ при отрицательных температурах среды на территории Республики Саха (Якутия)» [18], можно получить различные параметры прогрева в связи с тем, что используются различные формулы и принципы расчета.

Дудин М.О., Ватин Н.И., Барабанщиков Ю.Г. Моделирование набора прочности бетона в программе ELCUT при прогреве монолитных конструкций проводом

Основным различием двух методик расчета является вычисление коэффициента теплопередачи, показывающего, какое количество теплоты выделяется при остывании единицы площади поверхности теплоотдачи на 1 °С. Следовательно, меняется требуемая подводимая мощность прогрева. Анализ двух методик показал, что МДС 12-48.2009 выдает некорректные параметры прогрева, так как согласно расчетам при использовании алюминиевого профлиста в качестве несъемной опалубки прогрев вообще не нужен.

МДС 12-48.2009 «Зимнее бетонирование с применением нагревательных проводов» рекомендует в расчетах коэффициента теплопередачи опалубки использовать следующую формулу:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_\lambda} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_\kappa}}, \quad (1)$$

где α_λ – коэффициент передачи теплоты от опалубки излучением;

δ_i – толщина слоя теплоизоляционного материала;

λ_i – коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала;

α_κ – коэффициент передачи теплоты конвекцией.

ТСН 12-336-2007 «Производство бетонных работ при отрицательных температурах среды на территории Республики Саха (Якутия)» регламентирует для расчетов иную формулу:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i}}, \quad (2)$$

где α_n – коэффициент передачи теплоты от опалубки конвекцией;

δ_i – толщина слоя теплоизоляционного материала;

λ_i – коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала.

Можно заметить, что формулы практически идентичны, но отличаются учетом передачи теплоты от опалубки излучением. Именно этот показатель дает большой запас по необходимому количеству подводимого тепла по расчету согласно МДС 12-48.2009. В то же время данные расчеты являются приблизительными, так как не учитывают изменение ситуации во времени. Учет тепла от гидратации цемента не является функцией от времени. Потери тепла в разных направлениях, а также различная температура на разных гранях конструкции не берутся в расчет. Неравномерность прогрева на начальной стадии процесса не учитывается. В ТСН 12-336-2007 весь процесс прогрева разбит на отдельные составляющие, что делает расчет очень громоздким и также приблизительным.

Весь расчет сводится к определению шага укладки проводов, ориентировочной максимальной температуры прогрева и времени температурного выдерживания. Однако подобный расчет в силу своей приблизительности может быть неверен и поэтому требует компьютерного моделирования и анализа. Кроме того, мало внимания уделяется напряженно-деформированному состоянию прогреваемой конструкции. Напряжения, возникающие вследствие нагревания, могут привести к трещинообразованию, деформациям и короблению поверхности бетона.

В данной работе смоделирован процесс прогрева рассмотренной конструкции перекрытия в программе ELCUT.

2.2. Моделирование прогрева конструкции перекрытия в ELCUT

Программа ELCUT позволяет решать строительные задачи, связанные с прогревом бетона. Данный комплекс основан на методе конечных элементов (МКЭ). Решение задач базируется на принципах термодинамики, процессах теплообмена. Пакет ELCUT выполняет моделирование методом конечных элементов двумерных электромагнитных, тепловых и механических полей.

Реализация решения построена на модификации исходной задачи и решении серии таких модифицированных последовательно связанных задач. При этом твердеющий бетон разбивается прямоугольной сеткой дискретизации на блоки с КЭ сеткой, в которых могут быть заданы различные свойства, постоянные в пределах конкретного блока и на временном шаге, а временной шаг модификации свойств в блоках равняется шагу решения отдельной задачи.

Дудин М.О., Ватин Н.И., Барабанщиков Ю.Г. Моделирование набора прочности бетона в программе ELCUT при прогреве монолитных конструкций проводом

Надстройка WinConcret позволяет уточнить расчет путем введения новых переменных и уточнения физических и механических свойств материалов в связи с изменением температуры, твердением бетона и течением времени. Серия последовательных задач решается с исходными данными на определенное время прогрева с выбранным интервалом. Исходные данные для каждой задачи меняются, надстройка принимает во внимание данные расчета предыдущей задачи. Начальной задачей является нулевое время прогрева, момент бетонирования конструкции. Последующие задачи решаются с выбранным интервалом в 2 часа, учитывая следующие изменяемые во времени параметры:

а) собственное тепловыделение бетона, происходящее при гидратации цемента, зависящее от двух основных переменных – времени и температуры твердения;

б) температурный коэффициент сопротивления проводов (источников тепла), зависящий от переменной – температуры; сопротивление проводника при нагреве увеличивается до 40 % относительно номинального значения и повышается мощность прогрева, требуется регулировка расположения и мощности источников тепла;

в) регулирование выдерживания бетона на различных технологических переделах, связанное с включением/отключением прогрева, устройством/демонтажем утеплителя или опалубки;

г) прочность бетона наряду с температурой, градиентами, напряжениями и деформациями.

Для решения поставленной задачи была создана расчетная модель в конечных элементах в программном комплексе ELCUT с соблюдением геометрических размеров, физических и механических свойств материалов. В качестве расчетной схемы смоделировано сечение половины перекрытия между балками, т. е. решение задачи разбито на две симметричные части.

Сетка конечных элементов для данной конструкции показана на рисунке 2.

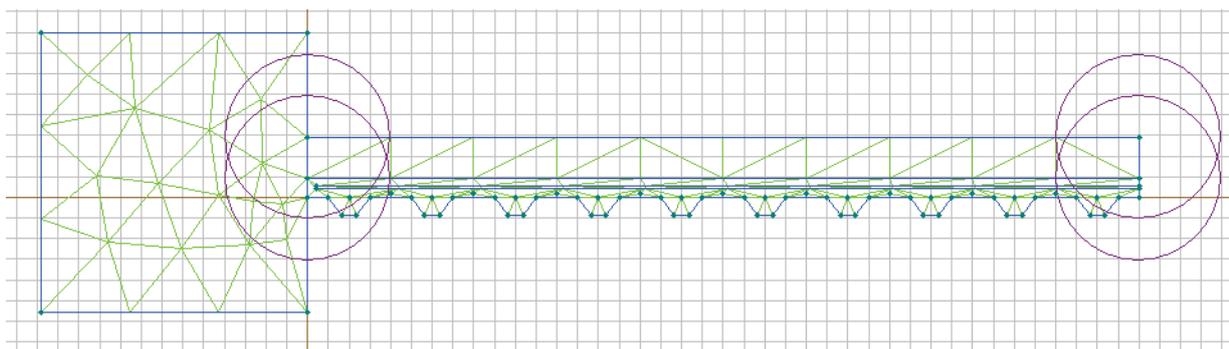


Рисунок 2. Расчетная модель с построением сетки конечных элементов

В созданной модели применены термодинамические характеристики материалов и их физические параметры.

Исходные характеристики:

- класс бетона – В30;
- материал стены – кирпич полнотелый;
- материал профлиста – алюминий;
- источник тепла – провод ПНСВ;
- утеплитель – экструдированный пенополистирол 100 мм.

Начальные условия:

- температура бетонной смеси +10 °С;
- температура арматуры –5 °С;
- температура под перекрытием +10 °С с конвективным подогревом (коэффициент передачи теплоты конвекцией 9,5 Вт/К·м²);
- температура окружающей среды –10 °С;
- скорость ветра 5 м/с (коэффициент передачи теплоты конвекцией со стороны окружающей среды 24 Вт/К·м²);
- мощность прогрева 35 Вт/п.м. провода (при последующем расчете принимается во внимание температурный коэффициент сопротивления 0,0046 град⁻¹).

Дудин М.О., Ватин Н.И., Барабанщиков Ю.Г. Моделирование набора прочности бетона в программе ELCUT при прогреве монолитных конструкций проводом

Характеристики материалов

Арматура:

- теплопроводность – 58 Вт/К·м;
- удельная теплоемкость – 470 Дж/кг·К;
- плотность – 7850 кг/м³.

Бетон:

- теплопроводность – 2,07 Вт/К·м;
- объемная плотность тепловыделения переменная, показатели излучения и тепловыделения рассчитывается в WinConcret автоматически в зависимости от температуры и времени;
- начальная удельная теплоемкость – 1050 Дж/кг·К;
- плотность – 2500 кг/м³.

Кирпичная кладка:

- теплопроводность – 0,68 Вт/К·м;
- удельная теплоемкость – 1580 Дж/кг·К;
- плотность – 1800 кг/м³;

Алюминиевый профлист

- теплопроводность – 237 Вт/К·м;
- удельная теплоемкость – 903 Дж/кг·К;
- плотность – 2700 кг/м³.

Утеплитель:

- теплопроводность – 0,032 Вт/К·м;
- удельная теплоемкость – 1320 Дж/кг·К;
- плотность – 40 кг/м³.

Показатели теплоемкости, теплопроводности, плотности материалов взяты из справочника программы. Греющие провода заданы вершинами с определенной мощностью тепловыделения. На основании введенных данных получено температурное поле перед началом прогрева, изображенное на рисунке 3.

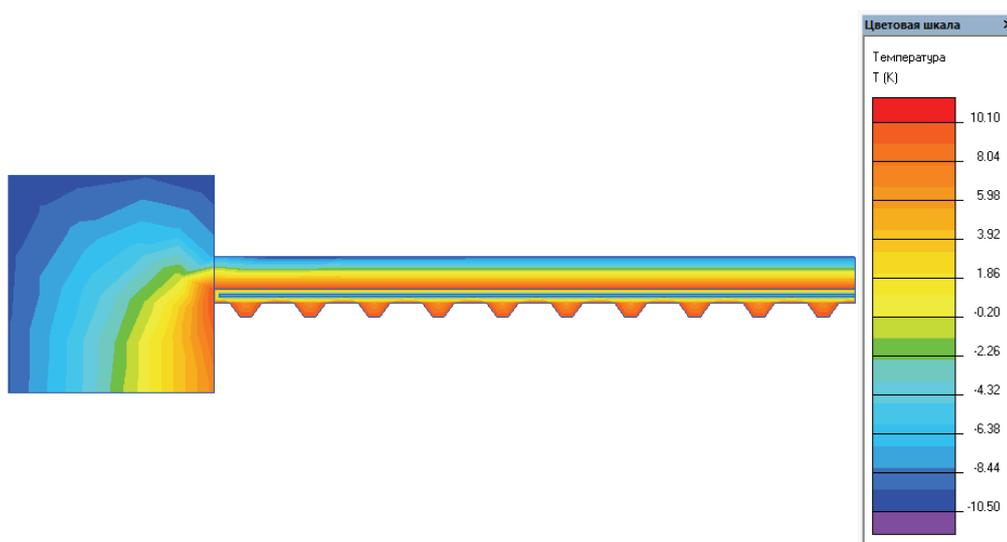


Рисунок 3. Температурное поле конструкции перед началом прогрева

Выбраны параметры и время прогрева – 2 суток. Затем проводится температурное выдерживание с остыванием бетона в течение 24 часов. Прогрев конструкции осуществляется греющим проводом. Запускается решение задачи – так называемый «прикидочный расчет». Расчет осуществляется непосредственно в программе ELCUT. Шаг решения задачи выбирается

Дудин М.О., Ватин Н.И., Барабанщиков Ю.Г. Моделирование набора прочности бетона в программе ELCUT при прогреве монолитных конструкций проводом

пользователем. В данной работе выбран шаг решения – 2 часа. Программный комплекс осуществляет решение задачи с учетом теплоемкости и теплопроводности всех материалов конструкции в расчетной схеме. Принимается во внимание конвективный теплообмен с окружающей средой и конвективный прогрев конструкции снизу.

Спустя 2 часа после начала прогрева наблюдаются характерные точки прогрева и потери тепла через кирпичные стены. Полученные данные показаны на рисунке 4.

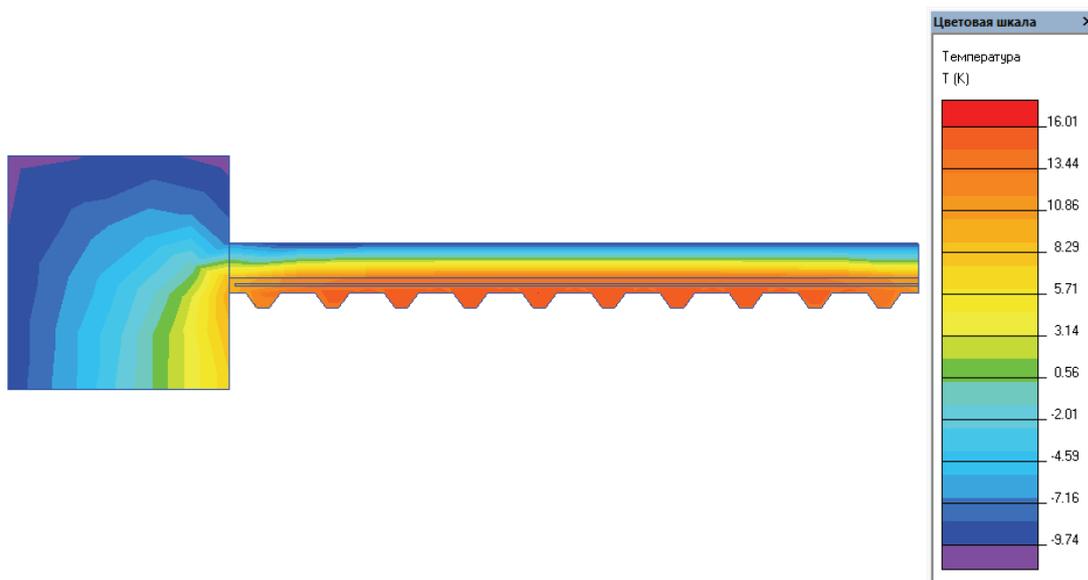


Рисунок 4. Температурное поле конструкции через 2 часа прогрева

Для большей точности решения рассмотрен малый участок перекрытия (см. рис. 5).

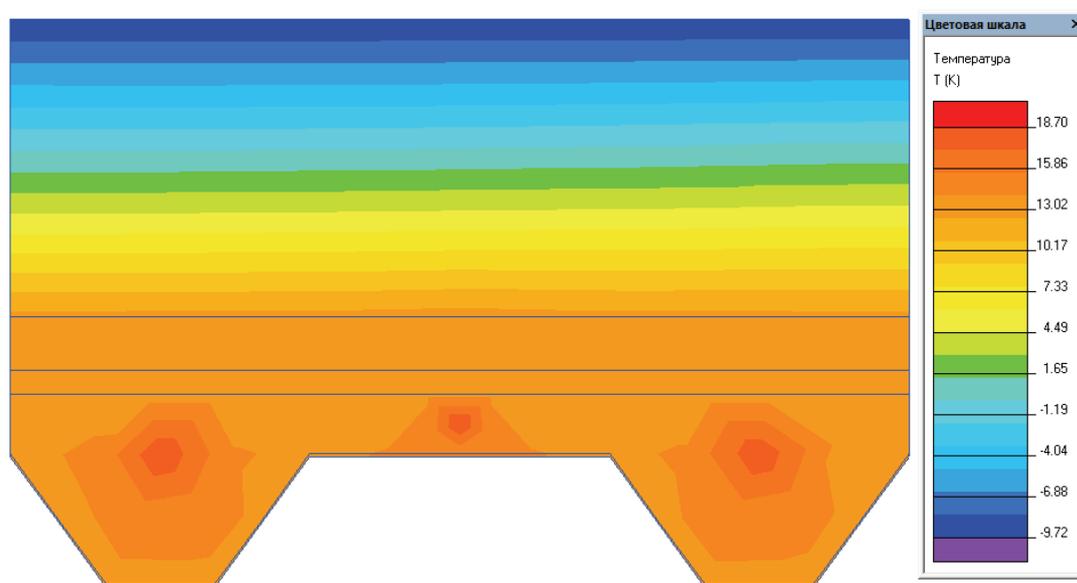


Рисунок 5. Температурное поле конструкции через 2 часа прогрева (фрагмент)

Как видно из температурных полей, замерзания бетона в первые часы не происходит, конструкция перекрытия надежно утеплена сверху, а снизу ребристая поверхность профлиста прогревается с целью недопущения промерзания бетона и больших потерь тепла.

Анимированная графика показывает распространение тепла в бетоне, можно наглядно увидеть места теплопотерь, а также корректировать параметры прогрева в зависимости от полученных данных. Исходя из полученных температурных полей, можно сделать вывод, что прогрев осуществляется неравномерно, стабилизация температуры происходит позднее. Локальные участки возле проводовгреваются быстрее, а в местах теплопотерь температуры ниже.

Дудин М.О., Ватин Н.И., Барабанщиков Ю.Г. Моделирование набора прочности бетона в программе ELCUT при прогреве монолитных конструкций проводом

Конечные решения «прикидочного расчета» показаны на рисунках 6, 7. По зонам повышенной температуры можно определить расположение сечения греющих проводов.

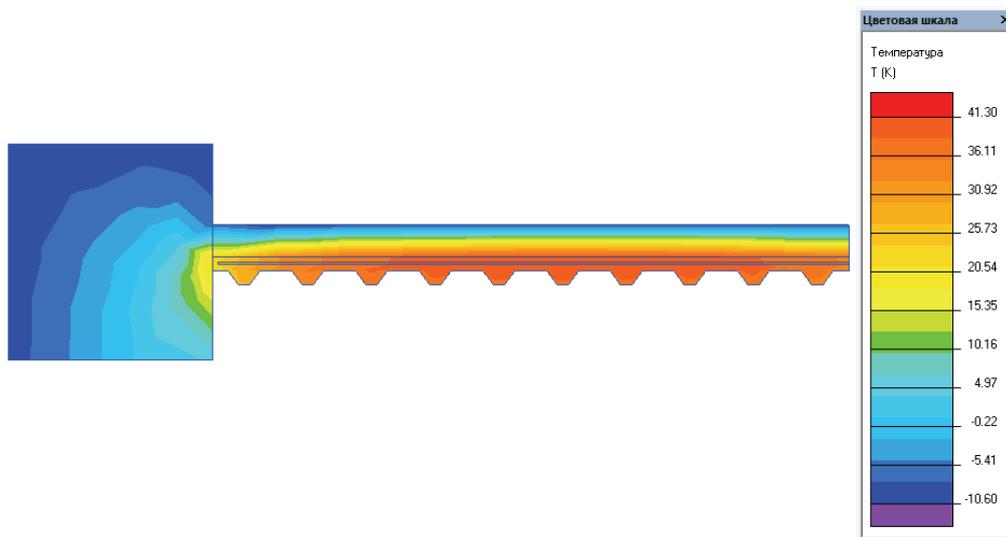


Рисунок 6. Температурное поле конструкции через 48 часов прогрева

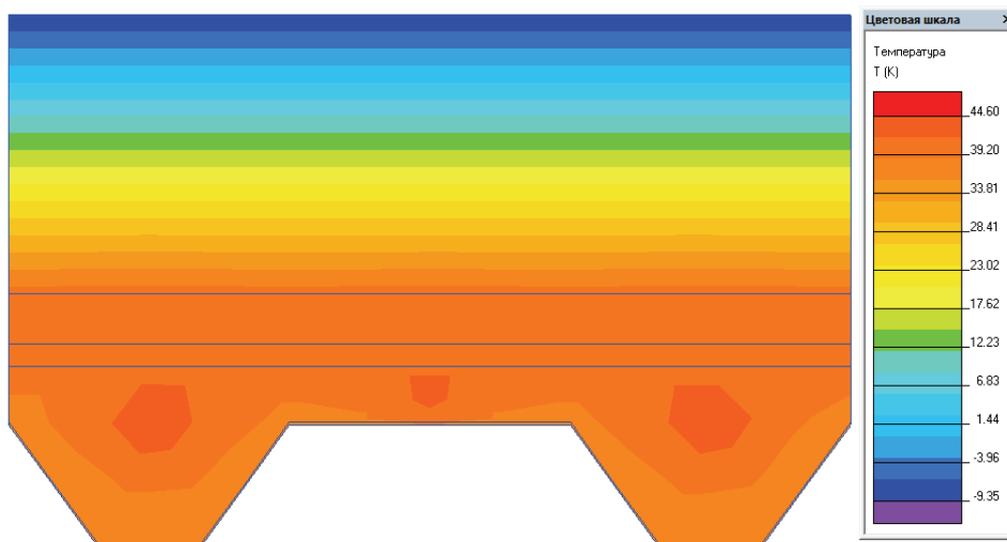


Рисунок 7. Температурное поле конструкции через 48 часов прогрева (фрагмент)

Бетон прогревается до температуры 44 °С, то есть температурное превышение относительно окружающей среды составляет 54 °С. Данный расчет является прикидочным, он не учитывает экзотермию реакции гидратации. После запуска надстройки WinConcret можно уточнить расчет и получить интегральный график распределения температуры, а также график набора прочности бетона. Количество тепла, выделяемого бетоном при твердении, зависит от содержания цемента в смеси. Кроме того, программа делит все перекрытие на отдельные блоки и пользователь получает возможность определить прочность бетона в различных участках конструкции в разные моменты времени. По полученным графикам можно определить моменты прогрева с наибольшим градиентом температуры. При неравномерном прогреве возникают температурные деформации и напряжения. Зная прочность бетона в данный момент времени, можно определить, насколько опасны возникающие напряжения из-за разных температур конструкции.

Также в программе реализована возможность выбора момента снятия утеплителя, расчета набора прочности бетона после отключения прогрева на остаточном тепле. Трещиностойкость конструкции обеспечивается плавным понижением температуры бетона и снятием утеплителя только спустя сутки после окончания прогрева, когда бетон набрал прочность около 70 % от марочной прочности бетона.

Дудин М.О., Ватин Н.И., Барабанщиков Ю.Г. Моделирование набора прочности бетона в программе ELCUT при прогреве монолитных конструкций проводом

Рассматриваемая конструкция была автоматически поделена на 15 температурных блоков с разбиением по сетке конечных элементов. Каждому блоку присвоен номер от 1 до 15 так, что участки №1, 15 оказались возле стены, а блоки №7, 8 – в центре перекрытия. Блок №16 – это совокупность всех участков, данные по этому блоку являются усредненными характеристиками для перекрытия. Надстройка WinConcret позволяет получить интегральные графики распределения температуры по блокам и график набора прочности бетона на различных участках. Данные выдаются в графическом и табличном режимах. На рисунках 8, 9 представлены графики температуры и набора прочности бетона для температурных блоков №16, 1, 7. В таблицах 1, 2 показаны численные значения температуры и прочности бетона на различных участках в разные моменты времени.

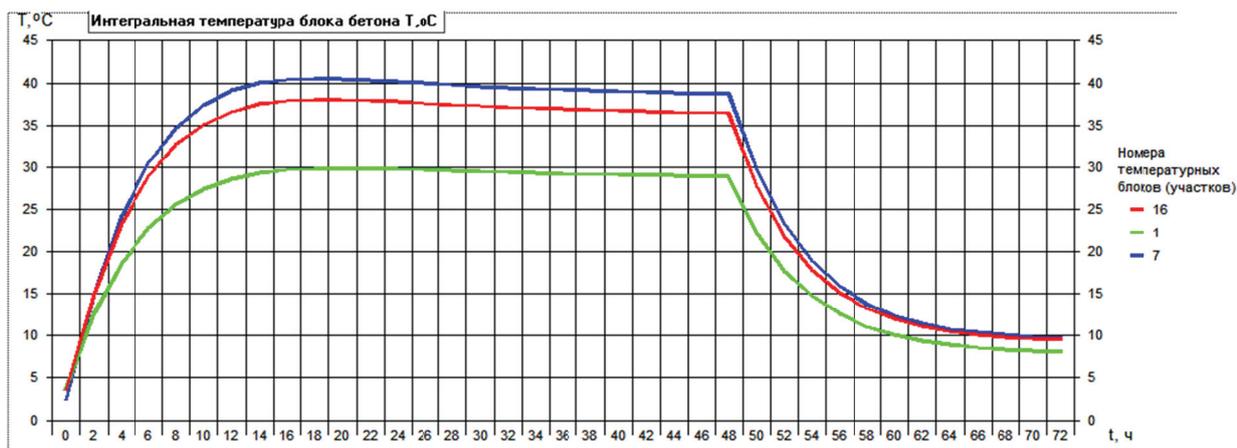


Рисунок 8. График температуры бетона на различных участках конструкции

Таблица 1. Изменение температуры бетона на различных участках при температурной обработке бетона

Номер блока	Распределение температуры бетона на участках перекрытия во времени, °C																		
	Время температурной обработки бетона, ч																		
	Время прогрева, ч													Время остывания, ч					
	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	64	68	72
1	3,70	18,7	25,6	28,6	29,7	29,9	29,8	29,6	29,4	29,2	29,1	29,0	28,9	17,7	12,6	10,1	8,90	8,40	8,10
2	4,40	23,7	32,2	35,7	36,8	36,9	36,6	36,4	36,1	35,9	35,7	35,6	35,4	20,5	14,3	11,5	10,2	9,50	9,20
3	4,20	24,7	34,6	38,7	39,9	40,0	39,7	39,3	39,0	38,7	38,5	38,4	38,2	22,7	15,6	12,3	10,8	10,1	9,80
4	2,50	23,1	32,3	36,0	37,2	37,3	37,1	36,8	36,5	36,2	36,1	35,9	35,8	21,2	14,6	11,5	10,1	9,50	9,20
5	2,50	24,1	34,3	38,4	39,7	39,8	39,5	39,1	38,8	38,5	38,3	38,2	38,0	22,7	15,4	12,1	10,6	9,90	9,60
6	4,20	22,0	31,4	35,5	36,8	37,0	36,7	36,4	36,1	35,8	35,6	35,4	35,3	22,0	15,5	12,4	10,9	10,2	9,90
7	2,50	24,2	34,7	39,1	40,4	40,5	40,2	39,8	39,4	39,2	39,0	38,8	38,7	23,3	15,9	12,4	10,8	10,1	9,70
8	4,40	24,7	34,6	38,7	40,0	40,1	39,8	39,4	39,1	38,8	38,6	38,5	38,3	22,8	15,7	12,4	10,9	10,2	9,90
9	2,50	24,2	34,8	39,2	40,6	40,7	40,4	40,0	39,6	39,3	39,1	39,0	38,8	23,5	16,0	12,5	10,9	10,1	9,80
10	4,20	24,7	34,7	38,8	40,1	40,1	39,8	39,5	39,1	38,9	38,7	38,5	38,4	22,8	15,7	12,4	10,9	10,2	9,80
11	4,40	24,6	34,2	38,1	39,2	39,3	39,0	38,7	38,4	38,1	37,9	37,8	37,7	22,1	15,2	12,1	10,6	9,90	9,60
12	2,50	24,2	34,7	39,1	40,5	40,6	40,3	39,9	39,6	39,3	39,1	38,9	38,8	23,5	16,0	12,5	10,9	10,2	9,80
13	2,50	23,6	33,9	38,2	39,7	39,8	39,5	39,1	38,8	38,5	38,3	38,1	38,0	23,1	15,9	12,5	10,9	10,2	9,80
14	4,40	24,2	33,8	37,8	39,2	39,3	39,0	38,7	38,3	38,1	37,9	37,7	37,6	22,4	15,6	12,4	10,9	10,2	9,90
15	2,50	21,5	31,5	35,9	37,3	37,5	37,2	36,9	36,5	36,2	36,0	35,9	35,7	22,7	15,8	12,5	10,9	10,2	9,80
16 = Σ	3,70	23,3	32,7	36,6	37,9	38,0	37,8	37,4	37,1	36,9	36,7	36,5	36,4	21,8	15,1	12,0	10,5	9,80	9,50

Полученные графики температуры бетона образуют температурно-временную историю по каждому выделенному блоку и по всей конструкции в целом. На основе этой информации и существующих эмпирических данных о кинетике твердения бетона при различной температуре выдерживания программа анализирует прочность бетона в процессе прогрева. В программе содержатся графики твердения, набора прочности разных по составу бетонов при определенных неизменных температурах выдерживания. Также существуют графические данные о кинетике тепловыделения при экзотермии бетона. Сопоставляя графики существующей температуры прогрева и эмпирических данных о наборе прочности при температурном выдерживании, программа выдает график набора прочности бетона в процентах от марочной прочности.

Марочная прочность бетона (R_m) – прочность на сжатие, наступающая через 28 суток с обеспеченностью 0,95, для бетонного образца стандартной формы, твердеющего в нормальных условиях. Данная прочность зависит от класса бетона: чем выше класс, тем большую прочность может набрать бетон. Благодаря прогреву бетона происходит интенсификация набора прочности. На рисунке 9 показан график набора прочности бетона в разных блоках в процентном соотношении от марочной прочности ($\%R_m$).

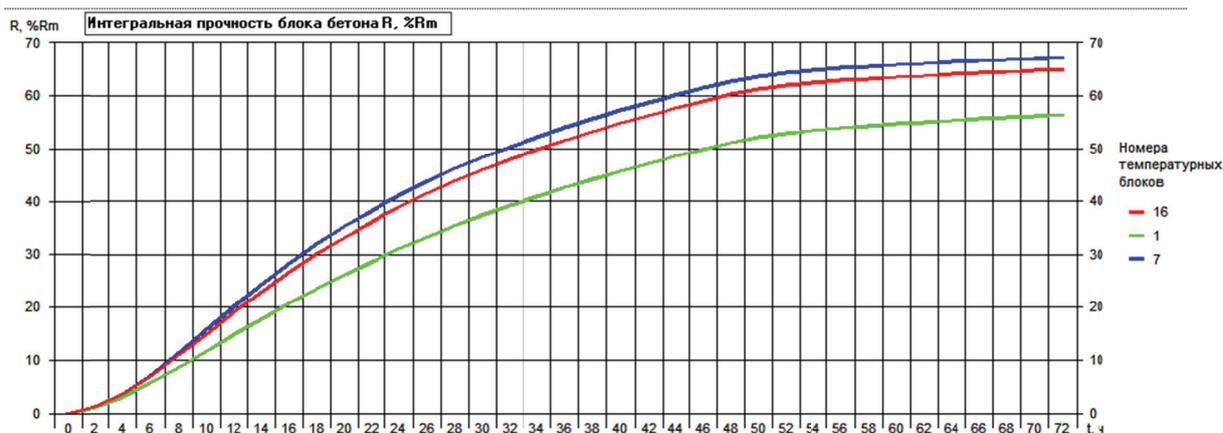


Рисунок 9. График набора прочности бетона на различных участках конструкции в процентном соотношении от марочной прочности бетона

Данные графики показывают скорость набора прочности бетона в некоторых блоках перекрытия. Проанализировав результаты компьютерного просчета, можно сделать вывод, что выбранный метод прогрева в целом является эффективным. Однако следует обратить внимание на некоторую неравномерность: график зеленого цвета показывает характер прогрева в области возле стены с большими теплотерями. Итоговая прочность бетона в этой зоне меньше на 10–15 %, а температура прогрева ниже на 10 °С. Наибольшую опасность вызывает ситуация после 12 часов прогрева: в это время устанавливается максимальный градиент температуры, равный 10 °С, в то же время бетон успевает набрать только 15 % марочной прочности в самой холодной зоне. То есть для данной конструкции в области примыкания к холодным стенам бетон имеет прочность на сжатие $R = 5$ МПа после 12 часов прогрева. Следует решить задачу о температурных деформациях и напряжениях в данный момент времени. Неравномерность прогрева и увеличение объема при нагревании являются отрицательными факторами в данном случае.

В целом в зонах предполагаемых больших теплотерь рекомендуется увеличение мощности прогрева для компенсации количества теплоты, уходящего в окружающую среду. То есть в зонах прилегания конструкции к неутепленной опалубке, наружным стенам, выпускам арматуры требуется уменьшить шаг укладки греющего провода. Данные меры позволяют выравнять температуру прогрева по всей площади конструкции, избежать зон с низкими температурами, уменьшить напряжения от неравномерности прогрева.

Таблица 2. Изменение прочности бетона во время прогрева

Номер участка	Прочность бетона на различных участках прогрева во время температурного выдерживания, %Rm																		
	Время температурного выдерживания, ч																		
	Время прогрева, ч													Время остывания, ч					
	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	64	68	72
1	0	3,10	8,60	14,8	20,8	26,2	31,1	35,4	39,2	42,6	45,7	48,5	51,1	52,8	53,9	54,7	55,3	55,9	56,5
2	0	3,80	11,0	18,9	26,3	32,7	38,2	42,9	47,0	50,6	53,8	56,7	59,3	60,9	61,8	62,5	63,0	63,5	64,0
3	0	4,00	11,7	20,3	28,3	35,1	40,9	45,8	50,0	53,7	56,9	59,8	62,3	64,0	64,9	65,5	66,0	66,4	66,9
4	0	3,60	10,7	18,7	26,2	32,7	38,3	43,1	47,2	50,9	54,1	57,0	59,6	61,3	62,2	62,8	63,3	63,8	64,3
5	0	3,70	11,3	20,0	27,9	34,8	40,6	45,5	49,7	53,4	56,6	59,5	62,0	63,7	64,6	65,2	65,7	66,2	66,6
6	0	3,50	10,3	18,2	25,7	32,2	37,8	42,5	46,7	50,3	53,6	56,4	59,0	60,8	61,7	62,4	63,0	63,5	64,0
7	0	3,70	11,4	20,2	28,3	35,3	41,1	46,1	50,3	54,0	57,3	60,1	62,7	64,4	65,3	65,9	66,4	66,8	67,3
8	0	4,00	11,7	20,3	28,3	35,2	41,0	45,9	50,1	53,8	57,0	59,9	62,4	64,1	65,0	65,6	66,1	66,5	67,0
9	0	3,70	11,4	20,3	28,4	35,4	41,3	46,2	50,5	54,2	57,4	60,3	62,9	64,5	65,4	66,0	66,5	67,0	67,4
10	0	4,00	11,7	20,4	28,4	35,3	41,0	45,9	50,2	53,8	57,1	59,9	62,5	64,1	65,0	65,6	66,1	66,6	67,0
11	0	4,00	11,6	20,1	28,0	34,7	40,4	45,2	49,4	53,1	56,3	59,2	61,7	63,4	64,3	64,9	65,4	65,8	66,3
12	0	3,70	11,4	20,2	28,3	35,3	41,2	46,1	50,4	54,1	57,3	60,2	62,8	64,5	65,4	66,0	66,5	66,9	67,4
13	0	3,60	11,1	19,7	27,7	34,6	40,4	45,3	49,6	53,2	56,5	59,4	62,0	63,6	64,6	65,2	65,7	66,2	66,6
14	0	3,90	11,4	19,9	27,7	34,5	40,2	45,1	49,3	52,9	56,2	59,0	61,6	63,3	64,2	64,8	65,3	65,8	66,2
15	0	3,30	10,1	18,1	25,7	32,3	38,0	42,8	47,0	50,7	53,9	56,8	59,4	61,2	62,2	62,9	63,4	64,0	64,4
16 =Σ	0	3,70	10,9	19,1	26,7	33,3	38,9	43,8	47,9	51,6	54,8	57,7	60,3	62,0	62,9	63,5	64,1	64,5	65,0

3. Решение задачи о деформациях и перемещениях при прогреве конструкции перекрытия

Для решения задачи о температурных деформациях взята стационарная задача термодинамики в момент времени 12 часов. Расчет температурных деформаций производится с учетом деформационных характеристик материалов. Учтены модуль упругости, коэффициент Пуассона, модули упругости стали, бетона, кирпичной кладки и алюминия. Также приняты нагрузки от собственного веса конструкций и условия закрепления.

В качестве неподвижного основания взяты обреза кирпичных стен, принята гипотеза о невозможности горизонтального и вертикального смещений массива кирпичной кладки нижележащих этажей здания. Еще одним ограничением в модели является ограничение горизонтальных перемещений оси симметрии конструкции перекрытия.

Расчет деформаций ведется от начальных условий после заливки бетона перекрытия до заданного момента времени. Решением задачи является поле напряжений и характерная форма напряженно-деформированного состояния в масштабе.

Анализ распределения главных напряжений в массиве конструкции перекрытия изображен на рисунке 10.

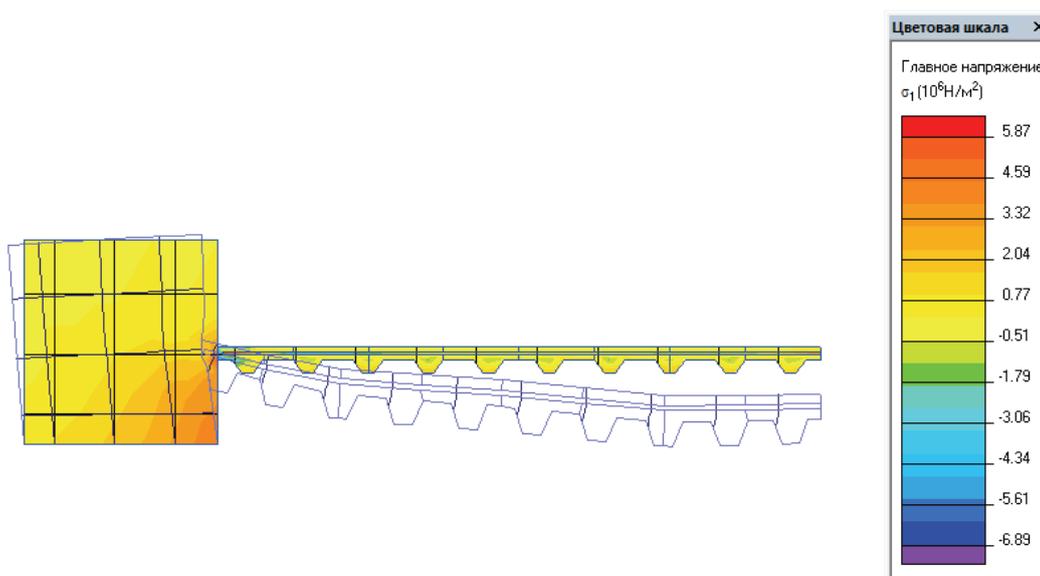


Рисунок 10. Распределение главных напряжений в конструкции после 12 часов прогрева и деформированная схема

Расчет показал, что в процессе нагрева бетон и арматура стремятся к увеличению в объеме. В связи с ограничениями и невозможностью смещения основания стен конструкция перекрытия не имеет резерва для расширения, поэтому прогибается вниз, теряет свою прямолинейность. Результаты расчета показывают незначительность вертикальных деформаций, наибольший прогиб конструкции в середине перекрытия равен 0,12 мм. Программа выдает характер перемещений, изображая деформации в увеличенном масштабе.

На рисунке 10 показаны распределения главных напряжений. Оценив полученные данные, можно сделать вывод, что наиболее напряженным участком перекрытия является зона перекрытия в месте примыкания к кирпичной стене. Именно этот локальный участок концентрирует на себе все напряжение сжатия из-за температурного расширения строительной конструкции. Как видно из данного рисунка, напряжения достигают 6 МПа.

Однако предыдущий расчет показал, что бетон к 12 часам успевает набрать прочность только 5 МПа. То есть при таком методе прогрева и выбранной схеме конструкции возможно трещинообразование по краям перекрытия в зонах примыкания бетона к кирпичным стенам. Результатом решения двух смежных задач в области термодинамики и сопротивления материалов является определение риска деформаций и повреждений бетонируемой конструкций на протяжении всего процесса прогрева бетона проводом.

В данной работе показан риск возможного трещинообразования через 12 часов после начала прогрева. Следует отметить, что в рамках статьи рассмотрена ситуация, когда перекрытие ограничено кирпичными стенами. Безусловно, в новом строительстве, когда перекрытие ограждено только опалубочной системой, способной деформироваться и воспринимать расширения и усадки бетона от температурных воздействий, таких проблем может не возникнуть. Но когда конструкции перекрытия ограждены кирпичными стенами, не воспринимающими деформации бетона, данная проблема становится актуальной. Такая ситуация складывается при реконструкции исторических зданий, когда старые деревянные перекрытия заменяются на новые монолитные. При бетонировании реконструируемых перекрытий в зимнее время с интенсивным прогревом и увеличенной температурой выдерживания возникает проблема трещинообразования на поверхности бетона и в зонах примыкания перекрытия к стенам.

Решением данной проблемы может быть использование демпферных лент, закрепленных по периметру бетонируемых конструкций перекрытия. Демпферные ленты, выполненные из вспененного полиэтилена, используются для компенсации расширения бетонных и цементных стяжек. Аналогичное их использование при бетонировании перекрытий в условиях реконструкции с прогревом бетона выглядит в некоторых случаях необходимым элементом для создания качественных строительных конструкций.

Заключение

В рамках работы произведены следующие расчеты и сделаны выводы.

1. Произведен анализ существующей нормативной документации и методик прогрева бетона греющим проводом. Методики приводят к различным результатам, расчеты приближительны и не дают полной картины процесса прогрева и набора прочности бетона.

2. Решена задача о наборе прочности бетона и о распределении температурных полей по сечению конструкции монолитного перекрытия. Сделан вывод о некоторой неравномерности прогрева и наличии температурных градиентов. Оценены наиболее опасные моменты прогрева.

3. В самом неблагоприятном периоде прогрева решена задача о температурных деформациях и напряжениях в конструкции перекрытия. В качестве вывода отмечено, что существует риск трещинообразования, так как напряжения от температурного расширения превышают набранную прочность бетона в локальных участках.

4. Найден один из путей решения данной проблемы. Для снижения риска трещинообразования предложено использование демпферных лент, обеспечивающих компенсацию расширения бетона.

Таким образом, решена новая научная задача. В то же время моделирование выполнено с определенными начальными граничными условиями, а решение задачи является теоретическим с применением программного комплекса ELCUT и рассматривает только одну конкретную ситуацию. Для доказательства и обоснования полученных результатов требуются дальнейшие исследования и натурные испытания.

Литература

1. Крылов Б.А. Монолитное строительство, его состояние и перспективы совершенствования // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2012. № 4(159). С. 35–38.
2. Головнев С.Г. Зимнее бетонирование: этапы становления и развития // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. С. 529–534.
3. Миронов С.А. Теория и методы зимнего бетонирования. М.: Стройиздат, 1975. 700 с.
4. Невелева Н.И., Шатов А.Н. Противоморозные добавки для бетонов // Гидротехника. 2009. №1. С. 84–86.
5. Толкынбаев Т.А., Головнев С.Г., Торпищев Ш.К. Добавка для зимнего бетонирования монолитных сооружений // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. Т. 13. №2. С. 34–37.
6. Yilmaz U.S., Turken H. The effects of various curing materials on the compressive strength characteristic of the concretes produced with multiple chemical admixtures // Scientia Iranica. 2012. Vol.19. No.1. Pp.77–83.
7. Demirboga R., Karagöl F., Polat R., Kaygusuz M.A. The effects of urea on strength gaining of fresh concrete under the cold weather // Construction and Building Materials. 2014. No.64. Pp. 114–120.
8. Karagöl F., Demirboga R., Kaygusuz M.A., Yadollahi M.M., Polat R. The influence of calcium nitrate as antifreeze admixture on the compressive strength of concrete exposed to low temperatures // Cold Regions Science and Technology. 2013. No.89. Pp. 30–35.
9. МДС 12-48.2009 «Зимнее бетонирование с применением нагревательных проводов»
10. Kishar E.A., Ahmed D.A., Mohammed M. R., Noury R. Effect of calcium chloride on the hydration characteristics of ground clay bricks cement pastes // Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences. 2013. Vol. 2. No.2. Pp. 20–30.
11. Zach J., Sedlmajer M., Hroudova J., Nevařil A. Technology of concrete with low generation of hydration heat // Procedia Engineering. 2013. No.65. Pp. 296–301.
12. Вальт А.Б., Овчинников А.А. Способы термообработки бетона при возведении монолитных конструкций // Известия Калининградского государственного технического университета. 2008. №13. С. 109–112.
13. Арбенев А.С. Зимнее бетонирование с электроразогревом смеси. М.: Стройиздат, 1970. 103 с.

14. Fedorova G., Mestnikov V., Matveeva O., Nikolayev E. Features of High-Strength Concrete Creation for Concreting of Monolithic Constructions in the Far North Conditions // Procedia Engineering. 2013. No.57. Pp. 264–269.
15. Корытов Ю.А. Зимнее бетонирование с применением нагревательных проводов // Механизация строительства. 2010. №3. С. 14–20.
16. Сысоев А.К. Технология зимнего бетонирования с помощью гибких нагревательных элементов // Инженерный вестник Дона. 2013. Т. 27. №4. С. 279.
17. Золотухин С.Н., Горюшкин А.Н. Бетонирование при отрицательных температурах // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Высокие технологии. Экология. 2012. №1. С. 81–85.
18. ТСН 12-336-2007 Производство бетонных работ при отрицательных температурах среды на территории Республики Саха (Якутия)
19. СП 70.13330.2012 «Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87».
20. Зиневич Л.В. Применение численного моделирования при проектировании технологии обогрева и выдерживания бетона монолитных конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2011. №2. С. 24–28.
21. Журов Н.Н., Комиссаров С.В. Система температурно-прочностного контроля бетона в раннем возрасте // Вестник МГСУ. 2010. Вып.5. №4. С. 296–301.
22. Семенов К.В., Барабанщиков Ю.Г. Термическая трещиностойкость массивных бетонных фундаментных плит и ее обеспечение в строительный период зимой // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. №2(17). С. 125–135.
23. Bofang Z. Construction of Mass Concrete in Winter. In: Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete. Butterworth-Heinemann: Tshingua University Press, 2014. Pp. 425–430.
24. Bofang Z. Temperature Control of Concrete Dam in Cold Region. In: Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete. Butterworth-Heinemann: Tshingua University Press, 2014. Pp. 431–438.
25. Nassif A.Y., Petrou M.F. Influence of cold weather during casting and curing on the stiffness and strength of concrete // Construction and Building Materials. 2013. No.44. Pp. 161–167.
26. Головнев С.Г., Пикус Г.А., Мозгалёв К.М., Савинов С.А. Компьютерный контроль и регулирование процессов выдерживания бетона в зимних условиях // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2010. Вып. 2. С. 75–78.
27. Доладов М.Ю. Доладов Ю.И. Программа для расчета обогрева бетона при зимнем бетонировании // Строительный вестник Российской инженерной академии. 2006. Выпуск 7. С. 52–56.

*Максим Олегович Дудин, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(931)2649496; эл. почта: maxim6892@yandex.ru*

*Николай Иванович Ватин, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(921)9643762; эл. почта: vatin@mail.ru*

*Юрий Германович Барабанщиков, Санкт-Петербург, Россия
Тел. раб.: +(812)5341286; эл. почта: ugb@mail.ru*

© Дудин М.О., Ватин Н.И., Барабанщиков Ю.Г., 2015

doi: 10.5862/MCE.54.4

Modeling a set of concrete strength in the program ELCUT at warming of monolithic structures by wire

M.O. Dudin*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia
+7(931)2649496; e-mail: maxim6892@yandex.ru***N.I. Vatin***Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia
+79219643762; vatin@mail.ru***Yu.G. Barabanshchikov***Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia
+78125341286; e-mail: ugb@mail.ru*

Key words

winter concreting, heating wire, ELCUT, modeling of warming, thermal deformations, development of strength, monolithic construction

Abstract

Monolithic construction in winter faces problems of developing concrete strength at the negative ambient temperature. In order to provide the required temperature conditions for concrete curing and hardening builders use different methods to warm structures. One way is to use heating wire.

The relevance of the paper is due to the climatic conditions of construction in most parts of Russia and the lack of a uniform methodology for calculating the required output of warm by heating wire. The paper discusses various guidelines for thermal curing of concrete.

Modeling of warming up concrete in monolithic construction by heating wire has been done in ELCUT and WinConcret. A set of concrete strength has been calculated and temperature fields in the overlapping section have been analyzed. The problem of thermal deformation of concrete was solved.

References

1. Krylov B.A. Monolitnoye stroitelstvo, yego sostoyaniye i perspektivy sovershenstvovaniya [Monolithic building, its condition and prospects of improvement]. *Construction materials, the equipment, technologies of XXI century*. 2012. No.4 (159). Pp. 35–38. (rus)
2. Golovnev S.G. Zimneye betonirovaniye: etapy stanovleniya i razvitiya [Winter concreting: stages in the development]. *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2013. No.31(50). Part. 2. Pp. 529–534. (rus)
3. Mironov S.A. *Teoriya i metody zimnego betonirovaniya* [Theory and methods of winter concreting]. Moscow: Stroyizdat, 1975. 700p. (rus)
4. Neveleva N.I., Shatov A.N. Protivomoroznyye dobavki dlya betonov [Antifreeze additives for concrete]. *Hydrotehnika*. 2009. No.1. Pp. 84–86. (rus)
5. Tolkyrbayev T.A., Golovnev S.G., Torpishchev Sh.K. Dobavka dlya zimnego betonirovaniya monolitnykh sooruzheniy [Additive for winter concreting of monolithic structures]. *Bulletin of the South Ural State University. Series Construction Engineering and Architecture*. 2013. Vol. 13. No.2. Pp. 34–37. (rus)
6. Yilmaz U.S., Turken H. The effects of various curing materials on the compressive strength characteristic of the concretes produced with multiple chemical admixtures. *Scientia Iranica A*. 2012. No. 19(1). Pp. 77–83.
7. Ramazan Demirboğa, Fatma Karagöl, Rıza Polat, Mehmet Akif Kaygusuz. The effects of urea on strength gaining of fresh concrete under the cold weather. *Construction and Building Materials*. 2014. No.64. Pp. 114–120.
8. Karagöl F., Demirboga R., Kaygusuz M.A., Yadollahi M.M., Polat R. The influence of calcium nitrate as antifreeze admixture on the compressive strength of concrete exposed to low temperatures. *Cold Regions Science and Technology*. 2013. No. 89. Pp. 30–35.
9. *MDS 12-48.2009 «Zimneye betonirovaniye s primeneniyyem nagrevatelnykh provodov»* [Methodical documentation in construction 12-48.2009 "Winter concreting with the use of heating wires"] (rus)

10. Kishar E.A., Ahmed D.A., Mohammed M.R., Noury R. Effect of calcium chloride on the hydration characteristics of ground clay bricks cement pastes. *Beni-Suef university journal of basic and applied sciences*. 2013. No.2. Pp. 20–30.
11. Zach J., Sedlmajer M., Hroudova J., Nevařil A. Technology of Concrete with Low Generation of Hydration Heat. *Procedia Engineering*. 2013. No. 65. Pp. 296–301.
12. Valt A.B., Ovchinnikov A.A. Cposoby termoobrabotki betona pri vozvedenii monolitnykh konstruksiy [Methods of heat treatment of concrete in the construction of monolithic structures]. *KSTU NEWS*. 2008. No.13. Pp. 109–112. (rus)
13. Arbenyev A.S. *Zimneye betonirovaniye s elektrorazogrevom smesi* [Winter concreting with electrowarming mixture]. Moscow: Stroyizdat, 1970. 130p. (rus)
14. Galina Fedorova, Vladimir Mestnikov, Olga Matveeva, Evgenye Nikolayev. Features of High-Strength Concrete Creation for Concreting of Monolithic Constructions in the Far North Conditions. *Procedia Engineering*. 2013. No.57. Pp. 264–269.
15. Korytov Yu.A. Zimneye betonirovaniye s primeneniym nagrevatelnykh provodov [Winter concreting with the use of heating wires]. *Mechanization of construction*. 2010. No.3. Pp. 14–20. (rus)
16. Sysoyev A.K. Tekhnologiya zimnego betonirovaniya s pomoshchyu gibkikh nagrevatelnykh elementov [Technology of winter concreting with flexible heating elements]. *Engineering journal of Don*. 2013. Vol. 27. No.4. P. 279. (rus)
17. Zolotukhin S.N., Goryushkin A.N. Betonirovaniye pri otritsatelnykh temperaturakh [Concreting at low temperatures]. *Scientific Newsletter Of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering High-tech solutions. Ecology*. 2012. No.1. Pp. 81–85. (rus)
18. *TSN 12-336-2007 Proizvodstvo betonnykh rabot pri otritsatelnykh temperaturakh sredy na territorii Respubliki Sakha (Yakutiya)* [Local building codes 12-336-2007. Production of concrete work at subzero temperatures environment in the Republic of Sakha (Yakutia) (rus)
19. *SP 70.13330.2012 «Nesushchiye i ogradhdayushchiye konstruksii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 3.03.01-87»* [Code of rules 70.13330.2012 "Supporting and protecting designs. The updated edition of Building codes 3.03.01-87 "]. (rus)
20. Zinevich L.V. Primneniye chislennogo modelirovaniya pri proyektirovanii tekhnologii obogreva i vyderzhivaniya betona monolitnykh konstruksiy [Application of numerical simulation technology in the design of heating and curing concrete monolithic structures]. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 2. Pp. 24–28. (rus)
21. Zhurov N. N., Komissarov S. V. Sistema temperaturno-prochnostnogo kontrolya betona v rannem vozraste [The system temperature control and strength of concrete at early age]. *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 2010. No.4. Vol. 5. Pp.296–301. (rus)
22. Semenov K.V., Barabanshchikov Yu.G. Termicheskaya treshchinostoykost massivnykh betonnykh fundamentnykh plit i yeye obespecheniye v stroitelnyy period zimoy [Thermal crack massive concrete foundation slabs and security in the building in the winter period]. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014. No. 2(17). Pp. 125–135. (rus)
23. Bofang Z. Construction of Mass Concrete in Winter. *Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete*. 2014. Pp. 425–430.
24. Bofang Z. Temperature Control of Concrete Dam in Cold Region. *Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete*. 2014. Pp. 431–438.
25. Nassif A.Y., Petrou M.F. Influence of cold weather during casting and curing on the stiffness and strength of concrete. *Construction and Building Materials*. 2013. No. 44. Pp. 161–167.
26. S.G. Golovnev, G.A. Pikus, K.M. Mozgalev, S.A. Savinov. Kompyuternyy kontrol i regulirovaniye protsessov vyderzhivaniya betona v zimnikh usloviyakh [Computer control and regulation processes concrete curing in winter conditions]. *Akademicheskii vestnik UralNIIProyekt RAASN*. 2010. No. 2. Pp. 75–78. (rus)
27. Doladov M. Yu. Doladov Yu. I. Programma dlya rascheta obogreva betona pri zimnem betonirovanii [Program for calculating heating of concrete during winter concreting]. *Stroitelnyy vestnik Rossiyskoy inzhenernoy akademii*. 2006. No. 7. Pp. 52–56. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 33–45