

УДК 693.557

Коклюгина Людмила Алексеевна

кандидат технических наук, доцент

E-mail: the-lusy@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, Казань, ул. Зеленая, д. 1

Хидиятуллин Ильфир Ильшатovich

инженер

E-mail: ilfir.hidiyatullin@mail.ru

ООО ИЦ «ЭнергоРазвитие»

Адрес организации: 420126, Россия, Казань, пр-т. Хусаина Ямашева, д. 57А

Экспериментальное и имитационное исследование набора прочности бетона при бетонировании колонны в зимних условиях

Аннотация

Постановка задачи. Цель исследования – анализ набора прочности бетона путем экспериментальных исследований с выявлением участков с пониженной прочностью, рассмотрение возможности использования программного комплекса для моделирования процесса набора прочности бетона.

Результаты. Основные результаты исследования состоят в использовании современного программного комплекса для моделирования процесса прогрева бетона. В рамках работы выполнено моделирование задачи прогрева бетона монолитной колонны греющим проводом. Выполнено экспериментальное исследование набора прочности бетона колонн греющим проводом на строящемся здании в г. Казани, расположенным по адресу Республика Татарстан, г. Казань, ул. Алексея Козина.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что анализ и проверка распространения тепла и набора прочности бетона могут быть выполнены с использованием современных программных комплексов.

Ключевые слова: зимнее бетонирование, греющий провод, ELCUT, моделирование прогрева, набор прочности, монолитные конструкции.

Введение

Набор прочности бетона в зимнее время, т.е. при температуре ниже 0° С, может быть обеспечен различными методами. Выбор метода производства работ по прогреву бетона зависит от множества факторов:

- температуры воздуха;
- конфигурации конструкции;
- геометрических размеров бетонного элемента, подлежащего прогреву.

Несмотря на то, что набор прочности бетоном происходит с выделением тепла (экзотермическая реакция), выделенного тепла практически не хватает для набора прочности бетоном при температуре окружающего воздуха ниже 5° С за время, установленное нормативами продолжительности производства работ. Исключение составляют особо массивные железобетонные монолитные конструкции гидротехнических сооружений, где, для исключения влияния экзотермии, приходится прокладывать в теле бетона специальные металлические трубы для принудительного охлаждения холодной водой в период набора прочности бетона.

При возведении гражданских и промышленных зданий в зимнее время стоит задача обеспечить набор прочности бетоном в нормативные сроки, которые позволяют выполнение других строительного-монтажных работ поточным методом.

Наиболее технологически простым, а поэтому наиболее распространенным, является прогрев бетона с помощью греющего провода с высоким электрическим сопротивлением. Использование греющего провода для прогрева монолитных конструкций широко применяется в настоящее время по нескольким причинам:

- простота в укладке и в подключении;

- возможность установки греющих проводов в конструкции различной геометрической конфигурации, в том числе как тонкостенные, так и крупнообъемные;
- простота в подключении и отключении коммутирующих проводов, что позволяет контролировать температуру уложенного бетона, а также процесс нагрева и остывания уложенного бетона в зависимости от выбранного режима термообработки бетона;
- возможность оперативно реагировать на изменение погодных условий.

Осуществление оперативного контроля над процессом набора прочности бетона возможно с использованием программного комплекса ELCUT совместно с надстройкой WinConcret. Это позволяет наглядно видеть изотермические поля внутри конструкции, по которым можно определить реальную температуру конструкции в конкретной точке и, соответственно, прочность бетона с учетом временных факторов. Таким образом, использование комплекса ELCUT позволяет определить характер распределения температурных полей в массиве бетона. На основании полученных данных можно построить реалистические графики набора прочности бетона с учетом многих факторов:

- времени прогрева;
- температуры;
- конфигурации конструкции;
- выделения тепловой энергии в результате экзотермической реакции;
- технологии производства работ (время укладки бетонной смеси, ее физические показатели, такие как температура, подвижность и т.д.; использование различных типов опалубки, технологические перерывы в прогреве, связанные с производством работ; проведение необходимых мероприятий, связанных с вопросами охраны труда, возможные отключения электроэнергии в результате непредвиденных ситуаций).

Экспериментальные исследования набора прочности бетона при бетонировании колонны в зимних условиях

Объект исследования:

4 колонны сечением 400×500 мм, высотой 3300 мм. Нагревательные элементы – провод нагревательный стальной в виниловой оболочке (ПНСВ). Минимальная прочность бетона для распалубливания конструкции – 70 % от проектного класса.

Экспериментальное исследование проводилось при строительстве Медицинского центра в городе Казани на ул. Алексея Козина.

Даты проведения исследования: 7-9.02.2020.

Физические данные и характеристики материалов:

- проектный класс бетона В40;
- температура окружающей среды – -11 °С;
- скорость ветра – 3 м/с;
- температура бетонной смеси перед укладкой – +7°С.

Шаг укладки греющих проводов по высоте 200 мм.

Методика исследования:

Измерение прочности бетона производилось после температурного выдерживания в течение 48 ч. Далее прочность бетона измерялась через каждые 2 часа. Прочность бетона определялась ударно-импульсным методом при помощи прибора ОНИКС 2.5 в соответствии с ГОСТ 22690-2015. В соответствии с ГОСТ 22690-2015 общее число измерений на участке равно 10 измерениям. Результаты измерений приведены в табл. 1 (рис. 1).

Далее в зоне примыкания колонны к ранее забетонированным конструкциям, прочность бетона была определена методом «отрыв со скалыванием», прибором ОНИКС-1.0С согласно ГОСТ 22690-2015. В соответствии с ГОСТ 22690-2015 общее число измерений на участке равно 1-ому испытанию, так как глубина заделки анкера не превышает 40 мм. Результаты измерений приведены в табл. 2.

Фактическая прочность бетона определена по схеме Г согласно ГОСТ 18105-2010:

$$B_{\phi} = 0,8 \cdot R_m, \quad (1)$$

где B_{ϕ} – фактическая прочность бетона, МПа;

R_m – фактическая средняя прочность бетона отдельного участка, МПа.

$$R_m = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n}, \quad (2)$$

где R_i – единичное значение прочности бетона, МПа;
 n – общее число единичных значений прочности бетона.

При измерении прочности колонны по высоте делились на одинаковые участки высотой 330 мм и шириной 500 мм. Нумерация блоков начинается с низа колонны.



Рис. 1. Фотография распалубленных конструкций после 72 ч. температурной обработки (иллюстрация авторов)

Результаты исследования:

Таблица 1

Прочность бетона, определенная ударно-импульсным методом (в % от проектного класса)

№ колонн	№ блоков	Прочность бетона, % R_m						
		Время температурной обработки, ч						
		48	52	56	60	64	68	72
1	1	48,3	48,5	48,5	49,3	49,3	49,8	50,0
	2	62,9	63,5	63,5	63,9	64,3	64,9	64,9
	4	70,5	71,0	71,4	71,6	72,4	72,8	72,9
	6	71,2	71,3	71,6	71,7	73,1	73,1	73,4
	8	70,3	70,6	70,8	71,2	72,0	73,5	74,1
	10	62,9	63,1	63,2	63,7	64,1	64,1	64,4
2	1	47,2	47,5	47,5	47,7	47,9	48,8	49,3
	2	59,6	61,2	61,3	61,5	61,8	62,1	63,9
	4	71,2	71,5	71,6	71,7	71,8	72,8	73,0
	6	68,0	68,2	68,8	69,6	69,7	70,1	70,2
	8	67,2	67,5	67,7	68,2	69,5	70,5	70,5
	10	57,9	58,5	59,1	59,7	59,7	59,7	59,9
3	1	40,2	41,6	43,0	43,9	44,3	44,9	45,2
	2	58,3	59,6	60,1	61,0	61,5	63,8	63,8
	4	65,3	68,1	69,9	70,2	70,4	70,6	71,3
	6	71,5	71,5	72,4	72,9	73,0	73,4	74,8
	8	68,1	70,1	70,3	70,7	71,4	72,7	72,9
	10	58,2	58,6	58,7	61,3	61,6	62,2	62,5
4	1	46,8	46,9	47,3	47,3	47,7	48,1	50,9
	2	61,3	61,9	62,4	62,5	62,7	63,0	63,1
	4	65,3	66,5	66,8	67,2	70,1	70,1	71,4
	6	67,3	71,1	71,6	71,9	73,4	73,5	74,0
	8	69,1	69,5	69,6	70,2	70,2	70,6	71,7
	10	62,8	63,1	63,3	63,3	63,8	64,0	64,9

Таблица 2

Прочность бетона, определенная методом «отрыв со скалыванием»

№ колонн	№ блоков	Прочность бетона	
		в МПа	в % от проектного класса
1	1	30,9	61,7
2	1	27,7	55,4
3	1	24,8	49,5
4	1	28,4	56,8

Результаты исследования показали, что прогрев колонн осуществляется неравномерно, скорость набора прочности конструкции после отключения прогрева очень низкая. В зоне примыкания колонны к ранее забетонированным конструкциям прочность в среднем ниже на 20-30 %. На этом участке шаг расположения греющих проводов не обеспечивает требуемую согласно проекту распалубочную прочность (70 % от проектного класса В40).

Имитационное моделирование тепловых полей в теле бетона при прогреве нагревательными проводами

Программный комплекс ELCUT является инструментом для двухмерного моделирования методом конечных элементов. ELCUT, в совокупности с надстройкой WinConcret, дает возможность расчета температурных полей и построение графиков набора прочности.

Решением поставленных задач являются диаграммы с изображением распределения температурных полей на разных промежутках прогрева. Программный комплекс строит графики изменения температуры по участкам конструкции. Количество участков задается пользователем шагом дискретизации модели по оси X и Y. Задача решается с выбранным временным интервалом.

Для решения задачи в программном комплексе была создана расчетная модель с соблюдением геометрических размеров.

В модели применены физические и термодинамические характеристики материалов, указанные в табл. 3.

Таблица 3

Физические и термодинамические параметры материалов

№ п.п.	Материал	Теплопроводность, $\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{К}\cdot\text{м}}$	Начальная теплоемкость, С, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	Плотность, $\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
1	Бетонная смесь	2,07	1050	2500
2	Деревометаллическая опалубка	0,17	1700	600
3	Утеплитель экструдированный пенополистирол	0,032	1320	40

В модели применены термодинамические характеристики материалов и их физические параметры.

Исходные данные:

Класс бетона по прочности – В40.

Температура бетонной смеси – +7°C.

Температура наружного воздуха – -11°C.

Скорость ветра – 3 м/с.

Греющие провода:

- Начальная мощность тепловыделения, $P_{нач.} = 35 \text{ Вт/ п.м};$

- Температурный коэффициент сопротивления, $\text{ТКС} = 0,0046 \text{ 1/град.}$

Сечение конструкции было автоматически разбито на сетки конечных элементов с шагом 100 мм.

В данной задаче рассмотрена половина сечения колонны, так как студенческая версия программы не позволяет использовать количество узлов сетки больше 255.

Греющие провода в имитационной модели задаются вершинами, в виде источников тепла. Расчет модели проходит в два этапа:

1. Предварительный расчет непосредственно в программе ELCUT;
2. Уточненное решение с учетом собственного тепловыделения бетонной смеси и изменением сопротивления греющих проводов в зависимости от температуры.

Время изотермического выдерживания бетона – 72 часа, прогрев в течении 48 часов и последующее выдерживание в течении 24 часов.

На рис. 2 мы видим, что основные потери тепла происходят на участке сопряжения колонны с ранее забетонированными конструкциями (плитой перекрытия).

На картине поля конструкции (рис. 2), по зонам повышенной температуры можно определить температуру греющих элементов.

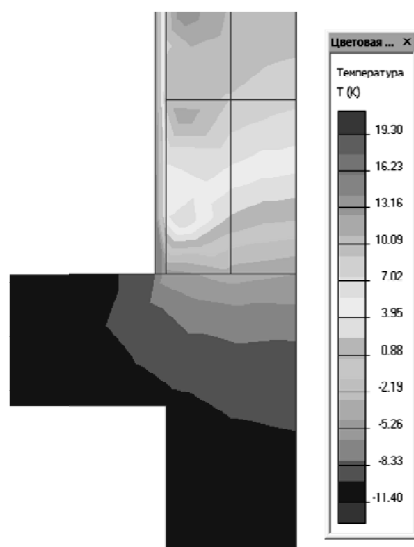


Рис. 2. Картина поля конструкции через 2 часа прогрева обработки (иллюстрация авторов)

В настройке WinConcret рассматриваемая конструкция автоматически была поделена на блоки с заданным шагом дискретизации модели. Блок № 21 – это усредненная характеристика всех блоков.

Данные расчета выдаются программой в виде графиков и таблиц. Графики набора прочности и температуры представлены на рис. 3-4. В табл. 4-5 показаны численные значения температуры, и прочности бетона на различных участках в разные моменты времени.



Рис. 3. График температуры бетона в разных блоках обработки (иллюстрация авторов)

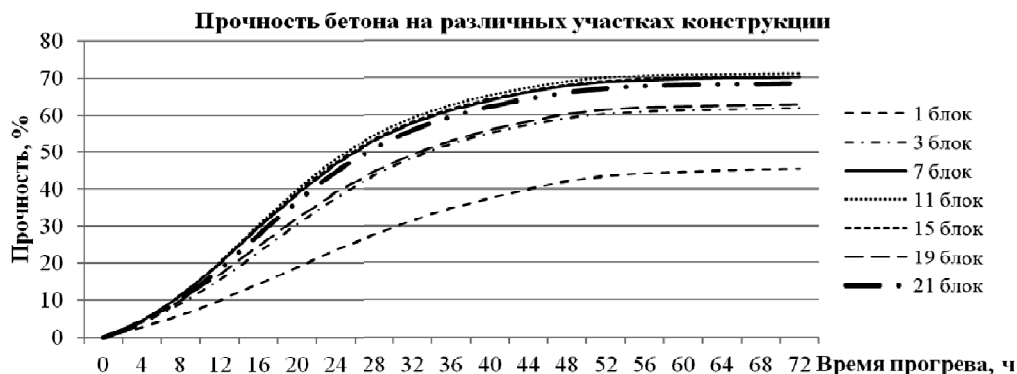


Рис. 4. График набора прочности бетона обработки (иллюстрация авторов)

Таблица 4

Температура бетона в блоках

№ блока	Температура бетона, °С																		
	Время обработки, ч																		
	Прогрев													Выдерживание					
	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	64	68	72
1	2,9	6,5	10	13	15,6	17,5	18,5	18,6	18	16,9	15,7	14,5	13,5	4,2	-0,6	-3,8	-5,9	-7,4	-8,4
3	7	12,1	17,7	23,3	28,3	32	33,7	33,3	31,2	28,3	25,3	22,4	20,1	10,5	4	-0,7	-4	-6,2	-7,7
7	7	15,6	23,5	31,1	37,5	41,7	42,9	41,6	38,6	35	31,5	28,5	26	13,6	5,9	0,5	-3,2	-5,7	-7,4
11	7	15,9	24,1	32	38,9	43,4	44,7	43,2	39,9	36	32,4	29,2	26,7	14	6,2	0,7	-3	-5,6	-7,3
15	7	15,8	23,8	31,4	37,9	42	43,2	41,7	38,6	35	31,6	28,6	26,2	13,7	5,9	0,5	-3,3	-5,8	-7,5
19	6,6	13,7	19,8	25,2	29,6	32,5	33,5	32,9	31,1	28,7	26,3	24,2	22,4	10,5	3,4	-1,3	-4,5	-6,5	-7,9
21	6,4	14,2	21,9	29,3	35,6	39,8	41,1	40	37,2	33,7	30,3	27,3	24,9	14	6,2	0,7	-3	-5,6	-7,3

Таблица 5

Прочность бетона в блоках

№ блока	Прочность бетона в процентном соотношении, % R_m																		
	Время обработки, ч																		
	Прогрев													Прогрев					
	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	64	68	72
1	0	2,6	5,8	9,8	14,2	18,8	23,4	27,6	31,4	34,7	37,5	39,9	42	43,4	44,1	44,5	44,9	45,2	45,4
3	0	3,8	9	15,4	22,8	30,4	37,5	43,6	48,4	52,2	55,1	57,3	59,1	60,3	60,9	61,3	61,5	61,7	61,9
7	0	4,4	11,1	19,7	29,4	38,7	46,7	53	57,8	61,3	64	66,1	67,8	68,8	69,3	69,6	69,8	69,9	70
11	0	4,4	11,3	20,2	30,1	39,8	48	54,4	59,1	62,7	65,3	67,3	69	70	70,5	70,8	70,9	71	71,1
15	0	4,4	11,2	20	29,7	39	47	53,3	58	61,6	64,2	66,3	68	69	69,5	69,8	70	70,1	70,2
19	0	4	9,8	16,8	24,5	32,1	39	44,7	49,4	53	55,9	58,2	60,2	61,4	62	62,3	62,5	62,7	62,8
21	0	4	10,3	18,4	27,6	36,7	44,7	51	55,9	59,5	62,3	64,4	66,1	67,2	67,8	68,1	68,3	68,4	68,6

График набора прочности бетона представлен на рис. 4. Программный комплекс выдает результаты в процентном соотношении от требуемой прочности.

Требуемая прочность бетона определена согласно ГОСТ 18105-2010:

$$R_T = K_T \cdot B_{норм} \tag{3}$$

где K_T – коэффициент требуемой прочности;

Проанализировав данные графики, следует отметить неравномерность прогрева. Итоговая прочность блока № 1 (участок сопряжения колонны с ранее забетонированными конструкциями) ниже прочности остальных блоков на 15-25 %. Следовательно, из графика на рис. 3 видим, что температура прогрева этого блока ниже на 10-20 °С.

В результате экспериментального исследования было установлено, что выбранный метод бетонирования является неэффективным, так как не обеспечивает распалубочную прочность, требуемую проектом, в некоторых участках конструкции. Следовательно, рекомендуется увеличить время прогрева бетона или использовать меньший шаг греющих проводов в зоне пониженной прочности бетона.

Бетон на участке сопряжения колонны и ранее забетонированных конструкций имеет прочность ниже, чем на остальных участках на 20-30 %. Это показано на результатах экспериментального исследования прочности бетона проведенных ударно-импульсным методом и методом «отрыва со скалыванием».

Температура прогрева бетона на этом участке соответственно тоже ниже, чем на остальных, так как ранее забетонированные конструкции имеют низкую температуру, соответствующую температуре наружного воздуха. Все это ведет к температурным расширениям и усадкам и, следовательно, увеличивает риск трещинообразования.

Заключение

Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что, несмотря на отсутствие единого подхода в нормативах и методических рекомендациях, которые обеспечивают лишь приблизительный подбор шага укладки и мощности прогрева, использование программного комплекса ELCUT и надстройки WinConcrete позволяет быстро и легко оценить характер распространения температуры в теле конструкции, а также позволяет оперативно получить необходимые данные в доступной форме и, тем самым, дает возможность корректировки параметров прогрева в зависимости от изменения различных факторов.

Список библиографических ссылок

1. Пименов С. И., Ибрагимов Р. А. Влияние продолжительности выдерживания бетонной смеси на физико-технические свойства тяжелого бетона // Сибстрин. 2019. № 11. С. 58–68.
2. Рязанова Г. Н., Попова Д. М. Анализ существующих методов возведения конструкций из монолитного бетона и железобетона в зимних условиях // Градостроительство и архитектура. 2018. № 1. С. 16–23.
3. Тезисы докладов : сб. статей «Инновационные процессы в науке и образовании» Международной научно-практической конференции, Пенза, 2019. 220 с.
4. Пикус Г. А., Мозгалёв К. М. Контроль параметров бетона, выдерживаемого в зимних условиях. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2015. № 1. С. 6–9.
5. Овчинников А. А., Вальт А. Б. Анализ факторов, влияющих на электро-термообработку монолитного железобетона с использованием греющих проводов // Известия Калининградского государственного технического университета. 2009. № 15. С. 120–122.
6. Дудин М. О., Ватин Н. И., Барабанщиков Ю. Г. Моделирование набора прочности бетона в программе ELCUT при прогреве монолитных конструкций проводом // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 2. С. 33–45.
7. Peter Paulik. The Effect of Curing Conditions (In Situ vs. Laboratory) on Compressive Strength Development of High Strength Concrete // Procedia Engineering. 2013. № 65. P. 113–119.
8. Zhu Bofang. Temperature Control of Concrete Dam in Cold Region // Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete. 2014. P. 431–438.
9. 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. № 64. P. 114–120.
10. Ayman Y. Nassif, Michael F. Petrou. Influence of cold weather during casting and curing on the stiffness and strength of concrete // Construction and Building Materials. 2013. № 44. P.161–167.

Koklyugina Lyudmila Alekseyevna

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: the-lusy@mail.ru**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Khidiyatullin Ilfir Ilshatovich

engineer

E-mail: ilfir.hidiyatullin@mail.ru**LLC IC «EnergoRazvitie»**

The organization address: 420126, Russia, Kazan, Khusain Yamashev ave., 57A

Experimental and simulation study of concrete strengthening during column concreting in winter conditions**Abstract**

Problem statement. The purpose of the study is to analyze the concrete strengthening by experimental studies to identify areas with reduced strength. Consider using a software package to simulate the process of concrete strength gain.

Results. The main results of the study consist of using modern software for modeling the process of heating concrete. As part of the work, the simulation of heating concrete task of a monolithic column with a heating wire was performed. An experimental study of the strength of concrete columns with a heating wire was carried out on a building under construction in the city of Kazan, located at the Republic of Tatarstan, Kazan, st. Alexei Kozin.

Conclusions. As a result, the results were obtained using modern software systems.

Keywords: winter concreting, heating wire, ELCUT, heating simulation, strength gain, monolithic constructions.

References

1. Pimenov S. I., Ibragimov R. A. The effect of the duration of aging of the concrete mixture on the physical-technical properties of heavy concrete // *Sibstrin*. 2019. № 11. 2019. P. 58–68.
2. Ryazanova G. N., Popova D. M. Analysis of existing methods for the erection of structures from monolithic concrete and reinforced concrete in winter conditions // *Urban Planning and Architecture*. 2018. № 1. P. 16–23.
3. Theses of reports : col. of articles «Innovative processes in science and education» International scientific-practical conference, Penza, 2019. 220 p.
4. Pikus G. A., Mozgalyov K. M. Monitoring concrete parameters, maintained in winter conditions // *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta*. 2015. № 1. P. 6–9.
5. Ovchinnikov A. A., Walt A. B. Analysis of factors affecting the electrical heat treatment of monolithic reinforced concrete using heating wires // *Izvestiya Kaliningradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2009. № 15. P. 120–122.
6. Dudin M. O., Vatin N. I., Drummers Y. G. Modeling of concrete strength gain in the ELCUT program during heating of monolithic structures with wire // *Magazine of civil engineering*. 2015. № 2. P. 33–45.
7. Peter Paulik. The Effect of Curing Conditions (In Situ vs. Laboratory) on Compressive Strength Development of High Strength Concrete // *Procedia Engineering*. 2013. № 65. P. 113–119.
8. Zhu Bofang. Temperature Control of Concrete Dam in Cold Region // *Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete*. 2014. P. 431–438.
9. 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. № 64. P. 114–120.
10. Ayman Y. Nassif, Michael F. Petrou. Influence of cold weather during casting and curing on the stiffness and strength of concrete // *Construction and Building Materials*. 2013. № 44. P. 161–167.