Дата поступления рукописи в редакцию: 05.06.2026 г. DOI: 10.24412/3034-4271-2026-3-66-73
Дата принятия рукописи в печать: 30.06.2026 г.

МАКАРЕНКО Илья Олегович,
магистрант,
Дальневосточный государственный аграрный университет,
e-mail: m.ilia3554@gmail.com

ИЖЕВСКИЙ Андрей Станиславович,
зав. кафедрой, кандидат сельскохозяйственных наук,
Дальневосточный государственный аграрный университет,
e-mail: m.ilia3554@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРООБОГРЕВА БЕТОНА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВОГО ПИРОМЕТРА

Аннотация. *В статье представлены результаты экспериментального исследования автоматизированной системы электрообогрева бетона, предназначенной для использования в зимних условиях строительства. Разработана экспериментальная установка, объединяющая греющие провода ПНСВ 1,2, цифровой пирометр спектрального отношения КМ-6-ДИФ и микроконтроллерный ПИД-регулятор ОВЕН ТРМ-251. Эксперимент проводился при температуре окружающей среды -20 ° С на образцах тяжелого бетона класса В25. Установлено, что применение автоматизированной системы контроля позволяет снизить среднеквадратичное отклонение температуры от заданного режима с ±4,8 °С до ±0,7° С, уменьшить удельный расход электроэнергии на 14,3% и повысить прочность бетона на 16,4% по сравнению с традиционным методом. Выявлено снижение коэффициента вариации прочности с 10,2% до 4,1%, что свидетельствует о повышении однородности структуры бетона. Экономический эффект от внедрения разработанной методики составляет 325 руб./м^3 бетона. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенной методики и рекомендуются к внедрению при зимнем бетонировании в регионах с суровым климатом.*

Ключевые слова: *зимнее бетонирование, электрообогрев бетона, провода ПНСВ, цифровой пирометр, автоматический контроль температуры, ПИД-регулятор, прочность бетона, энергоэффективность, коэффициент вариации, однородность структуры.*

MAKARENKO Ilya Olegovich,
master's student,
Far Eastern State Agrarian University

IZHEVSKIY Andrey Stanislavovich,
Head of Department, PhD in Agricultural Sciences,
Far Eastern State Agrarian University

EXPERIMENTAL STUDY OF AN AUTOMATED ELECTRICAL HEATING SYSTEM FOR CONCRETE USING A DIGTAL PYROMETER

Annotation. *The article presents the results of an experimental study of an automated concrete electric heating system intended for use in winter construction conditions. An experimental setup combining PNSV 1.2 heating wires, a KM-6-DIF spectral ratio digital pyrometer, and an OVEN TRM-251 microcontroller PID controller has been developed. The experiment was carried out at an ambient temperature of –20 °C on heavy concrete samples of class B25. It has been established that the use of an automated control system reduces the standard temperature deviation from the set mode from ±4.8 °C to ±0.7 °C, reduces the specific electricity consumption by 14.3%, and increases the concrete strength by 16.4% compared to the traditional method.*

A decrease in the coefficient of variation in strength from 10.2% to 4.1% has been identified, indicating an increase in the homogeneity of the concrete structure. The obtained results confirm the effectiveness of the proposed methodology.

Key words: *winter concreting, electric heating of concrete, PNSV wires, digital pyrometer, automatic temperature control, PID controller, concrete strength, energy efficiency, coefficient of variation, uniformity of structure.*

Введение

Россия является страной с суровыми климатическими условиями. В Амурской области, где проводилось настоящее исследование, средняя январская температура на севере понижается до - 40 °С, а в межгорных впадинах - до - 50°С [1]. В соответствии со СП 70.13330.2012 зимними условиями принято считать среднесуточную температуру воздуха ниже +5°С, при которой происходит замедление процесса гидратации цемента [17]. Среди существующих методов зимнего бетонирования (метод «термоса», противоморозные добавки, электродный прогрев, индукционный и инфракрасный обогрев) наиболее технологичным для монолитных конструкций является электрообогрев греющими проводами ПНСВ [17]. Этот метод обеспечивает объемный прогрев бетонной смеси и может быть реализован на объектах любой конфигурации. Однако, традиционная реализация данного метода имеет существенные недостатки: отсутствие оперативной обратной связи по температуре, локальные перегревы, неравномерность температурного поля, повышенные энергозатраты и необходимость круглосуточного присутствия обслуживающего персонала [8].

Современные исследования в области зимнего бетонирования [2; 3; 4] демонстрируют эффективность комбинированных методов, объединяющих автоматизированный контроль температуры с использованием цифровых систем мониторинга. Анализ патентного фонда показал, что современные технические решения направлены на автоматизацию процессов тепловой обработки бетона. Особый интерес представляет цифровой пирометр спектрального отношения, обеспечивающий бесконтактное измерение температуры с высокой точностью [16].

Цель исследования - повышение качества и однородности монолитного бетона при производстве работ в зимних условиях за счет разработки и экспериментальной проверки методики автоматизированного электрообогрева.

Гипотеза исследования - применение системы автоматического контроля и управления на основе цифрового пирометра для электрообогрева бетона в зимних условиях позволит устранить ключевые недостатки существующих методов (локальные перегревы, неравномерность прогрева, высокие энергозатраты) и обеспечить заданное качество бетона за счет точного поддержания оптимального температурно-временного режима твердения.

Материалы и методы исследования

Для проведения эксперимента использовался тяжелый бетон класса В25 на портландцементе ПЦ400. Состав бетонной смеси (таблица 1 подобран в соответствии с рекомендациями [5; 8].

Таблица 1. Состав бетонной смеси класса В25 (на 1 м^3)

Компоненты смести	Расход, кг/ м^3	Примечания по условиям эксперимента
Портландцемент ПЦ400	340 – 370	Высокая активность цемента компенсирует его расход; для смеси с высокой подвижностью (П3) расход увеличен
Вода затворения	150 – 175	В/Ц соотношение должно быть в пределах 0,45 – 0,55 для обеспечения прочности В25
Песок (строительный)	520 – 560	Речной или карьерный мытый песок. Обеспечивает удобоукладываемость смеси
Щебень (фр. 20-40 мм)	1200 – 1310	Гравийный или гранитный щебень. Обеспечивает каркас бетона
Итого (средняя плотность)	~ 2350 – 2400	Справочное значение для контроля объема заливки

Перед укладкой бетонная смесь прогрета до температуры +25°С. Уплотнение смеси производилось глубинным вибратором. В соответствии с требованием СП 70.13330.2012 [17] при низких температурах продолжительность уплотнения была увеличена на 25% по сравнению с летними условиями.

Разработанная экспериментальная установка включала четыре основных элемента:

1. Нагревательный контур - греющие провода ПНСВ диаметром 1,2 мм с удельным сопротивлением 0,15 Ом/м и рабочим током 14-16 А. Провода укладывались в теле бетонных образцов по схеме «змейка» с шагом 100 мм. Длина одного нагревательного элемента составляла 28 м. Согласно МДС 12-48.2009 [17], шаг укладки может варьироваться от 50 до 150 мм в зависимости от требуемой мощности прогрева.

2. Система контроля температуры - цифровой пирометр спектрального отношения КМ-6-ДИФ [16] с диапазоном измерения от -50 до +500°С и точностью ±1°С.

3. Блок автоматического регулирования – микроконтроллерный ПИД-регулятор ОВЕН ТРМ – 251 [13; 14], реализующий обратную связь по показаниям пирометра.

4. Источник питания – понижающий трансформатор напряжением 36 В.

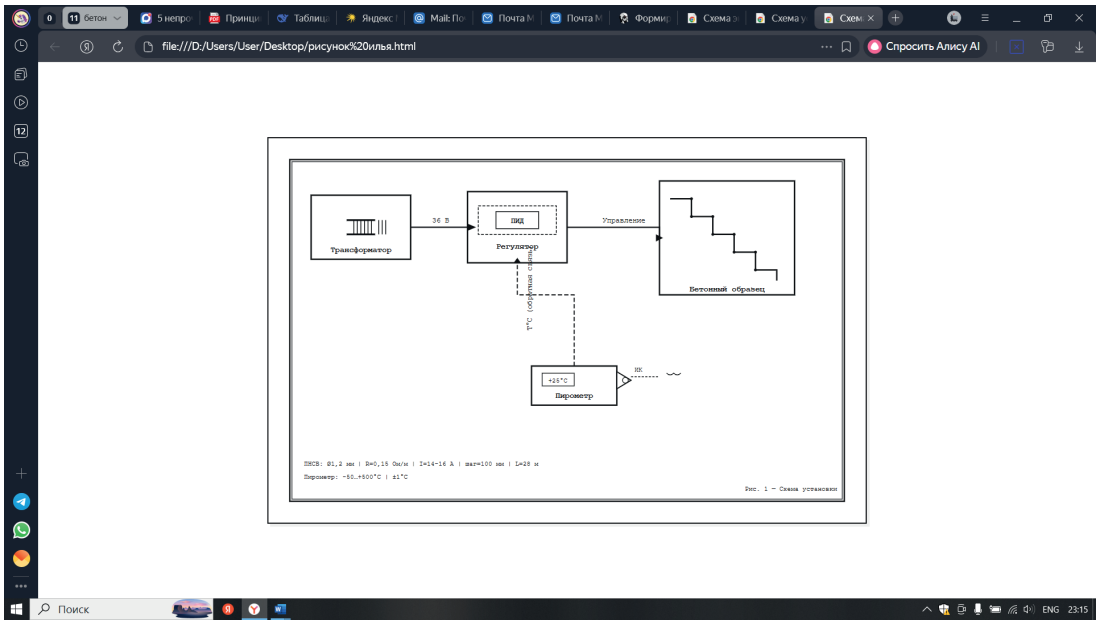


Рисунок 1. Экспериментальная установка

Для проведения сравнительного анализа были изготовлены три серии бетонных образцов размером 150×150×150 мм (по 12 образцов в каждой серии:

- серия К-1 (контрольная, ручное управление) - прогрев фиксированной мощностью с ручным переключением степеней трансформатора оператором на основе периодических замеров температуры (каждые 2 часа). Имитирует традиционный метод;

- серия К-2 (альтернативная, таймерное управление) – циклический режим включения/отключения питания (30 мин. нагрев/30 мин. пауза) без обратной связи по температуре.

- серия О-1 (опытная, автоматизированное управление) – ПИД-регулирование по замкнутому циклу с использованием пирометра КМ-6-ДИФ и контролера ТРМ-251 [13].

Режим термообработки назначался в соответствии с СП 70.13330.2012 [17]:

- подъем температуры: не более 10°С/ч до достижения изотермического уровня +45°С;

- изотермическая выдержка: 24 часа при температуре +45±2°С;

- остывание: не более 5°С/ч до температуры окружающей среды (- 20 °С).

Все образцы твердели при температуре окружающей среды - 20 °С, что соответствует климатическим параметрам холодного периода Амурской области [1].

Методы испытаний

Испытания образцов на сжатие проводились на гидравлическом прессе ИП-1250 в возрасте 3, 7, 14 и 28 суток. Статистическая обработка результатов включала расчет среднеарифметического, среднеквадратичного отклонения, коэффициента вариации и проверку гипотезы о равенстве дисперсий по F-критерию Фишера. Учет потребленной электроэнергии осуществлялся с помощью счетчика, установленного на первичной обмотке трансформатора.

Результаты экспериментальных исследований

Анализ точности поддержания температурного режима. На рисунке 2 представлены фактические графики изменения температуры в центре бетонных образцов для трех режимов управления.

Рисунок 2. Фактические графики изменения температуры в центре бетонных образцов для трех режимов управления

Количественная оценка точности поддержания изотермического прогрева (+45 °C) приведена в таблице 2.

Таблица 2. Анализ точности поддержания температурного режима (изотермический прогрев +45 °C)

Параметр	Ед. изм.	Серия К-1 (ручное)	Серия К-2 (таймер)	Серия О-1 (автомат)
Средняя температура изотермии	°C	44,2	43,5	44,9
Среднеквадратичное отклонение (σ)	°C	4,8	5,9	0,7
Максимальное отклонение (ΔТмакс)	°C	+11,2/ - 9,4	+15,8/ - 14,1	+1,8/ - 1,5
Время выхода на режим	ч	3,5	4,0	3,0

Анализ данных таблицы 2 показывает, что автоматическое управление (серия О-1) обеспечивает существенно более высокую стабильность температурного поля. Среднеквадратичное отклонение температуры в изотермический период составило всего 0,7 °C, что в 6,8 раза ниже, чем при ручном управлении (4,8°C), и в 8,4 раза ниже, чем при таймерном (5,9°C).

Прочностные характеристики бетона. Результаты испытаний образцов на сжатие представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты испытаний образцов на сжатие

Серия	Режим управления	Прочность в 3 сут., Мпа	Вариация в 3 сут., %	Прочность в 7 сут., Мпа	Вариации в 7 сут., %	Прочность в 28 сут., МПа	Вариация в 28 сут., %
К-1	Ручное	12,4	12,5	18,1	11,8	26,8	10,2
К-2	Таймерное	11,8	15,1	16,9	14,5	24,5	13,8
О-1	Автоматическое	14,2	5,2	21,5	4,8	31,2	4,1

Анализ прочностных характеристик:

1. Конечная прочность (28 суток): образцы серии О-1 показали наибольшую прочность – 31,2 Мпа, что на 16,4% выше, чем при ручном управлении (26,8 Мпа) и на 27,3% выше, чем при таймерном (24,5 Мпа). Полученные значения согласуются с результатами исследований [4; 12].

2. Темпы набора прочности: уже к 3 суткам прочность образцов О-1 составила 14,2 Мпа (45,5% от марочной), что значительно выше показателей других серий (К-1 – 12,4 Мпа, К-2 – 11,8 Мпа). Это критически важно для обеспечения ранней распалубки и ускорения темпов строительства в зимних условиях.

3. Однородность бетона: коэффициент вариации прочности для серии О-1 в 28 суток составил всего 4,1%, что, согласно нормативным документам [17], свидетельствует об отличном качестве производства работ и высокой стабильности технологического процесса. Для серии К-1 этот показатель составил 10,2 % (удовлетворительное качество), для серии К-2 – 13,8% (нестабильное качество).

Статистическая проверка значимости. Проверка гипотезы о равенстве дисперсий (F-критерий Фишера) для серии О-1 и К-1:

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{max}^2}{S_{min}^2} = \frac{7{,}47}{1{,}64} = 4{,}55$$

Табличное значение Fтабл для степеней свободы f1 = f2 = 11 и уровня значимости α = 0,05 составляет 2,82. Так как Fрасч> Fтаб (4,55> 2,82) нулевая гипотеза о равенстве дисперсии отвергается. Это означает, что улучшение однородности бетона в серии О-1 является статистически значимым.

Анализ энергопотребления. В процессе эксперимента велся учет потребленной электроэнергии (таблица 4).

Таблица 4. Сравнительный анализ энергопотребления (на объект 100 м^3)

Показатель	Ед. изм.	Серия К-1	Серия К-2	Серия О-1
Удельные энергозатраты	кВт•ч/ м^3	98	115	84
Экономия относительно К-1	%	-	- 17,3	+ 14,3
Экономия относительно К-2	%	-	-	+ 27,0

Автоматический режим (ПИД-регулирование) обеспечил снижение удельных энергозатрат:

- на 14,3% по сравнению с ручным управлением (98 →84 кВт•ч/ м^3);
- на 27,0 % по сравнению с таймерным управлением (115 → 84 кВт•ч/ м^3).

Полученные результаты согласуются с данными исследований [2; 3], демонстрирующими эффективность автоматизированного контроля при зимнем бетонировании.

Достигнутая экономия объясняется исключением нецелевых перегревов и точной подачей энергии в объеме, необходимом для компенсации текущих теплопотерь в режиме реального времени. Полученные удельные энергозатраты (84 кВт•ч/ м^3) находятся в нижней границе диапазона, указанного в литературе для метода греющих проводов ПНСВ (80-110 кВт•ч/ м^3) [4; 6].

Анализ закономерностей структурообразования. На основе полученных температурных режимов и прочностных характеристик можно оценить особенности микроструктуры цементного камня:

- серия К-1 (ручное управление): нестабильный температурный режим с колебаниями до ± 11,2 °С приводит к формированию микроструктуры с наличием внутренних дефектов и пор неправильной формы. Локальные перегревы вызывают термические напряжения и участки с нарушенной кристаллизационной структурой [8];
- серия К-2 (таймерное управление): пилообразный характер графика с амплитудой до ± 15,8 °С создает наиболее рыхлую и дефектную структуру. Циклические процессы «нагрев – охлаждение» в зоне отрицательных температур приводят к образованию ледяных линз в капиллярах, которые после оттаивания трансформируются в крупные макропоры и трещины. Данный эффект подробно описал в исследовании Сахибгареева с соавторами [12];
- серия О-1 (автоматическое управление): высокостабильный температурный режим (отклонение не более ± 1,8 °С) создает оптимальные условия для формирования плотной, гомогенной структуры цементного камня с равномерным распределением кристаллогидратов и мелкопористой структурой гелиевых пор без микродефектов.

Полученные результаты подтверждают выдвинутую гипотезу и согласуются с известными работами в области зимнего бетонирования. Согласно исследованиям [8; 12], нестабильность

температурного поля является одной из главных причин возникновения микронапряжений в структуре твердеющего цементного камня. Циклические перепады температуры, характерные для таймерного режима (серия К-2), приводят к эффекту «термоусталости» материала, что в конечном итоге снижает его марочную прочность.

Как показано в работах [2; 5; 6], что одним из ключевых факторов получения высокопрочного и долговечного бетона является соблюдение постоянства температурно-влажностного режима в период его твердения. Байков [2] демонстрирует эффективность интеграции цифровых систем мониторинга в технологии зимнего бетонирования. В эксперименте автоматизированная система (серия О-1) обеспечила среднеквадратичное отклонение температуры всего 0,7 °С, что в 6-8 раз лучше традиционных методов и соответствует наилучшим современным практикам.

Важно отметить, что улучшение качества бетона в серии О-1 достигнуто при одновременном снижении удельных энергозатрат на 14-27%. Это противоречит распространенному мнению о том, что повышение качества автоматически ведет к росту энергопотребления. Напротив, точное ПИД-регулирование позволяет подавать энергию именно в том объеме, который необходим для компенсации текущих теплопотерь, исключая нецелевые перегревы. Аналогичные результаты получены в исследовании Морозова [9].

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности:

1. Гарантированного достижения проектной прочности бетона в зимних условиях с высокой однородностью (коэффициент вариации менее 5%);

2. Сокращение продолжительности термообработки за счет оптимизации режима набора прочности;

3. Снижения эксплуатационных затрат на электроэнергию и обслуживающий персонал;

4. Удаленного контроля процесса через мобильное приложение [13], что особенно важно для рассредоточенных объектов (линейные сооружения, дороги, трубопроводы).

Заключение

В результате проведенного экспериментального исследования разработана автоматическая система электрообогрева бетона на основе цифрового пирометра спектрального отношения КМ-6-ДИФ и ПИД-контроллера ОВЕН ТРМ-251. Установлено следующие:

1. Система автоматического управления обеспечивает высокую точность поддержания температуры в изотермический период: среднеквадратичное отклонение составило 0,7 °С, что в 6,8 раза ниже, чем при ручном управлении, и в 8,4 раза ниже, чем при таймерном.

2. Бетон, выдержанный в автоматическом режиме, показал наибольшую прочность в 28 суток – 31,2 Мпа, что на 16,4% выше, чем при ручном управлении, и на 27,3% выше, чем при таймерном.

3. Коэффициент вариации прочности для автоматического режима составил 4,1%, что свидетельствует об отличной однородности материала. По критерию Фишера улучшения однородности является статистически значимым ($F_{расч} = 4,55 > F_{таб} = 2,82$).

4. Применение ПИД-регулирования позволило снизить удельные энергозатраты до 84 кВт•ч/м^3, что на 14,3 % ниже, чем при ручном управлении, и на 27% ниже, чем при таймерном.

Список литературы:

[1] Общая характеристика климата Амурской области // Амурский ЦГМС. URL: https://amurmeteo.ru/articles/phenomena/34-ppppp.html (дата обращения: 10.05.2025).

[2] Байков Е. С. Инновационный подход к организации бетонных работ в зимних условиях: интеграция экологических добавок с цифровыми системами мониторинга для мостовых сооружений / Е. С. Байков // Молодой ученый. – 2025. – № 23 (574). – С. 113-115.

[3] Байчоров Р.А. Системный анализ методов зимнего бетонирования при возведении монолитных жилых зданий и сооружений / Р.А. Байчоров, А.О. Хубаев, А.А. Урсов // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2022. - № 4. С. 215-227.

[4] Гаусс К.С. Исследование влияние параметров электрообогрева на прочность бетона при различных условиях окружающей среды / К.С. Гаусс, Р. И. Мокшин, Н.И. Кулдыркаева, Д.И. Мокшин // Вестник Томского государственного архитектурного-строительного университета. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 124-137.

[5] Головнев С. Г. Производство бетонных работ в зимних условиях. Обеспечение качества и эффективность [Текст]: учебное пособие / С. Г. Головнев, В. А. Красный, В. В. Красный. – Москва: Издательство АСВ, 2023. – 336 с.

[6] Головченко И. В. Интенсификация процесса возведения монолитного железобетонного перекрытия девятиэтажного жилого дома за счет применения электропрогрева и химической добавки MC Rapid 025 / И.В. Головченко // Экономика строительства и природопользования. – 2023ю - № 2 (84). С. 45-52.

[7] Гныря А. И. Технология бетонных работ в зимних условиях [Текст]: учебное пособие / А. И. Гныря, С. В. Коробков. – Томск: Изд-во ТГАСУ, 2011. – 412 с.

[8] Дудин М. О. Специфика монтажа электрического провода в технологии прогрева бетона / М. О. Дудин, Ю. Г. Барабанщиков // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015. – № 6. – С. 47-61.

[9] Морозов Н.М. Современные методы автоматизированного контроля температурного режима при зимнем бетонировании / Н.М. Морозов, А.В. Кузнецов // Строительные материалы и технологии. – 2024. - № 5 (95). – С. 42-49.

[10] Павозков Д.В. Какие существуют методы прогрева бетона в зимних условиях / Д.В. Павозков // Вестник науки. – 2024. - № 2. – С. 8-19.

[11] Саденко Д.С. Деструктивные явления при некачественном прогреве монолитных железобетонных конструкций / Д.С. Саденко, А.В. Петров, И.Н. Сидоров, Е.А. Кузнецова // Строительство и техногенная безопасность. – 2024. - № 2. – С. 8-19.

[12] Сахибгареев Р.Р. Исследование процессов твердения тяжелого бетона в условиях попеременного замораживания и оттаивания при зимнем бетонировании / Р.Р. Сахибгареев, Л.Н. Ломакина, Ром. Р. Сахибгареев [и др.] // Строительные материалы. – 2023. - № 4. – С. 51-59.

[13] ТРМ251 – ПИД-регулятор с пошаговыми программами и интерфейсом RS-485 / ОВЕН. // Электронприбор. URL: https://www.electronpribor.ru/catalog/1388/trm251.htm (дата обращения: 10.05.2025).

[14] ТРМ251 ПИД-регулятор с пошаговыми программами и RS-458 / Элефант. URL: https://elefantkip.ru/owen/kontrolno-izmeritelnye-pribory/izmeriteli-regulyatory/trm251-pid-regulyator-s-poshagovymi-programmami-i-rs-485/ (дата обращения: 10.05.2025).

[15] Федосов С.В. Отечественный и зарубежный опыт моделирования организационно-технологической надежности строительного производства / С. В. Федосов, А. Н. Лапин, Е.В. Петрова, Д.Г. Лукьянов // Умные композиты в строительстве. – 2021. – Т.2, № 1. – С. 40-46.

[16] Чуйко А.А. Применимость методов насыщения и высушивания для оценки морозостойкости тяжелого бетона / А.А. Чуйко, С.Н. Ковшар // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: электронный сборник статей V Международной научной конференции. – Новополоцк: Полоцкий государственный университет, 2024. – С. 311-316.

[17] СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87. – Москва: Минрегион России, 2012. – 204 с.

[18] СП 131.13330.2020. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99. – Москва, 2020.

References:

[1] General characteristics of the climate of the Amur region // Amur Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring. URL: https://amurmeteo.ru/articles/phenomena/34-ppppp.html (date accessed: 10.05.2025).

[2] Baikov E. S. Innovative approach to organizing concrete works in winter conditions: integration of environmental additives with digital monitoring systems for bridge structures / E. S. Baikov // Young scientist. - 2025. - No. 23 (574). - P. 113-115.

[3] Baichorov R. A. Systems analysis of winter concreting methods in the construction of monolithic residential buildings and structures / R. A. Baichorov, A. O. Khubaev, A. A. Ursov // Bulletin of the Tula State University. Earth Sciences. - 2022. - No. 4. P. 215-227.

[4] Gauss K.S. Study of the influence of electric heating parameters on the strength of concrete under various environmental conditions / K.S. Gauss, R. I. Mokshin, N.I. Kuldyrkaeva, D.I. Mokshin // Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. - 2023. - Vol. 25, No. 3. - Pp. 124-137.

[5] Golovnev S. G. Production of concrete works in winter conditions. Quality assurance and efficiency [Text]: a tutorial / S. G. Golovnev, V. A. Krasny, V. V. Krasny. - Moscow: ASV Publishing House, 2023. - 336 p.

[6] Golovchenko I. V. Intensification of the process of erecting a monolithic reinforced concrete floor of a nine-story residential building through the use of electric heating and the chemical additive MC Rapid 025 / I.V. Golovchenko // Economics of Construction and Nature Management. - 2023 - No. 2 (84). P. 45-52.

[7] Gnyrya A. I. Technology of concrete works in winter conditions [Text]: textbook / A. I. Gnyrya, S. V. Korobkov. - Tomsk: TSUACE Publishing House, 2011. - 412 p.

[8] Dudin M. O. Specifics of installing an electric wire in the technology of heating concrete / M. O. Dudin, Yu. G. Barabanshchikov // Construction of unique buildings and structures. - 2015. - No. 6. - P. 47-61.

[9] Morozov N. M. Modern methods of automated control of the temperature regime during winter concreting / N. M. Morozov, A. V. Kuznetsov // Construction materials and technologies. – 2024. - No. 5 (95). – P. 42-49.

[10] Pavozkov D.V. What methods of heating concrete in winter conditions exist / D.V. Pavozkov // Herald of science. – 2024. - No. 2. – P. 8-19.

[11] Sadenko D.S. Destructive phenomena during poor-quality heating of monolithic reinforced concrete structures / D.S. Sadenko, A.V. Petrov, I.N. Sidorov, E.A. Kuznetsova // Construction and technogenic safety. – 2024. - No. 2. – P. 8-19.

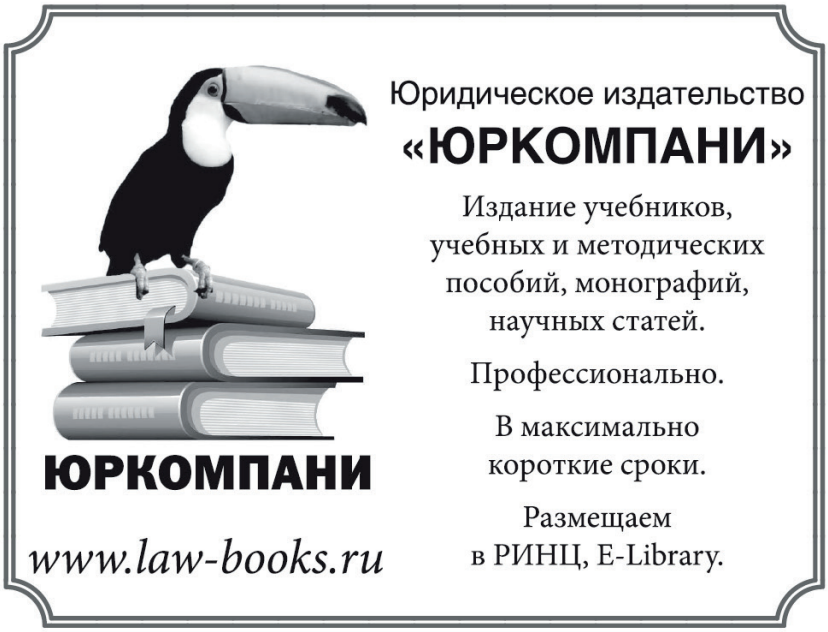
[12] Sakhibgareev R.R. Study of hardening processes of heavy concrete under conditions of alternate freezing and thawing during winter concreting / R.R. Sakhibgareev, L.N. Lomakina, R. R. Sakhibgareev [et al.] // Construction Materials. - 2023. - No. 4. - Pp. 51-59.

[13] TRM251 - PID controller with step-by-step programs and RS-485 interface / OWEN. // Elektronpribor. URL: https://www.electronpribor.ru/catalog/1388/trm251.htm (date accessed: 10.05.2025).

[14] TRM251 PID controller with step-by-step programs and RS-458 / Elephant. URL: https://elefantkip.ru/owen/kontrolno-izmeritelnye-pribory/izmeriteli-regulyatory/trm251-pid-regulyator-s-poshagovymi-programmami-i-rs-485/ (date accessed: 10.05.2025).

[15] Fedosov S.V. Domestic and foreign experience in modeling the organizational and technological reliability of construction production / S. V. Fedosov, A. N. Lapin, E.V. Petrova, D.G. Lukyanov // Smart composites in construction. - 2021. - Vol. 2, No. 1. - Pp. 40-46.

[16] Chuyko A.A. Applicability of saturation and drying methods for assessing the frost resistance of heavy concrete / A.A. Chuyko, S.N. Kovshar // Architectural and construction complex: problems, prospects, innovations: electronic collection of articles from the V International scientific conference. – Novopolotsk: Polotsk State University, 2024. – pp. 311-316.

[17] SP 70.13330.2012. Load-bearing and enclosing structures. Updated version of SNiP 3.03.01-87. – Moscow: Ministry of Regional Development of the Russian Federation, 2012. – 204 p.

[18] SP 131.13330.2020. Construction climatology. Updated version of SNiP 23-01-99. – Moscow, 2020.