



Исследование термодинамических процессов в бетонной смеси, затвердевающей в зимних условиях

© И.Ю. Шелехов, Н.Л. Дорофеева, А.Ю. Казазаева

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – изучение термодинамических процессов, происходящих в бетонной смеси, затвердевающей в зимних условиях. Лабораторные исследования демонстрируют влияние различных способов бетонирования на качество выполняемых работ. Для изучения термодинамических процессов используется стенд, контролирующий температурные поля в разных точках по высоте объема бетонируемого изделия, и нагревательные элементы с положительным коэффициентом термического сопротивления. Рассматриваются результаты распределения температурных полей в разных по высоте объема точках бетонной смеси в зависимости от применения различных способов бетонирования. Исследования показали, что для сокращения времени твердения бетонных смесей в условиях низких температур необходимо производить предварительный прогрев основания конструкций, а при бетонировании ответственных конструкций применять дополнительный нагрев смеси. Проведенные эксперименты показали, что использование нагревательных элементов с положительным коэффициентом сопротивления при проведении бетонных работ поможет обеспечить качественное выполнение ремонтных и строительных работ, производимых в условиях низких температур.

Ключевые слова: бетонные работы, температурное поле, зимнее бетонирование, нагревательный элемент, температурный коэффициент сопротивления

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-48-380002.

Для цитирования: Шелехов И.Ю., Дорофеева Н.Л., Казазаева А.Ю. Исследование термодинамических процессов в бетонной смеси, затвердевающей в зимних условиях. *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2021. Т. 11. № 1. С. 126–133. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-1-126-133>

Study of thermodynamic processes in a concrete mixture hardening in winter conditions

Igor Yu. Shelekhov, Natalia L. Dorofeeva, Anna Yu. Kazazaeva

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The aim was to study thermodynamic processes taking place in a concrete mixture hardening in winter conditions. Laboratory studies show that different ways of concrete paving affect the quality of the work performed. To study thermodynamic processes, a stand was used that controlled the temperature fields in different places of the volume height of the concrete product and heating elements with a positive coefficient of thermal resistance. The results of the distribution of temperature fields across different places of the volume height of the concrete mixture were analysed, depending on the different methods of concrete paving used. The studies have shown the need to tentatively warm up the base of constructions to reduce the time of concrete mixture hardening, and additionally to warm up the mixture when paving essential structures. The experiments have shown that using heating elements with a positive coefficient of resistance during concrete works helps to provide the necessary quality of repair and construction work in low-temperature conditions.

Keywords: concrete works, temperature field, winter concreting, heating element, temperature coefficient of resistance

Acknowledgements: The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Irkutsk Region in the framework of scientific project No. 20-48-380002.

For citation: Shelekhov IYu, Dorofeeva NL, Kazazaeva AYU. Study of thermodynamic processes in a concrete mixture hardening in winter conditions. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'* = *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2021;11(1):126–133. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-1-126-133>

Введение

Достижение требуемого качества бетонных изделий, изготавливаемых в диапазоне низких температур, возможно только при соблюдении благоприятного режима затвердевания бетона в начальный период времени. Оптимизация производственного процесса бетонирования при осуществлении капитального ремонта в зимний период времени является сложной комплексной задачей. От выбора оптимальных параметров процесса бетонирования в зависимости от состава бетонной смеси, толщины конструкций и их расположения зависит время производства работ и качество оказанных услуг. При проведении работ, связанных с капитальным ремонтом, в зимний период времени необходимо поддерживать заданную температуру по всему объему бетонной смеси с учетом технологического процесса бетонирования и климатических факторов [1–5].

Различное поведение бетонных смесей во время затвердевания (выдерживания) в летний и зимний период времени объясняется тем, что при низких температурах все реакции гидратации замедляются и при достижении температурой нижней границы (+5°C) в бетонных смесях резко снижается набор прочности. При температуре ниже 0°C химически несвязанная вода превращается в лед и увеличивается в объеме приблизительно на 9%. Структура затвердевшей смеси не выдерживает возникающих напряжений. Прочность замерзшего бетона обусловлена только связями сцепления замерзшей воды. При повышении температурного режима продолжается процесс гидратации бетонной смеси, но разрушенная структура не восстанавливается. В результате не достигаются ожидаемые параметры прочности бетонизируемого изделия, и исправить это уже не удастся¹ [6, 7].

Методы

Требуемое качество бетонных изделий,

изготавливаемых в диапазоне низких температур, возможно только при соблюдении благоприятного режима твердения бетона в начальный период времени. В зависимости от фазы твердения бетона, меняются параметры теплоемкости и теплопроводности бетонной смеси, и равномерность распределения температурных параметров в бетонируемом объеме меняется, что приводит к временному изменению процессов твердения и набора прочности. Возникающие напряжения создают микродефекты, снижая не только качество производства работ, но и уменьшая ресурс работы конструкций, бетонируемых в условиях низких температур. При осуществлении ремонтных работ, особенно в зимний период времени, масштаб производства бетонных работ обычно не имеет больших объемов, но качество проведенных работ существенно влияет на сроки дальнейшей эксплуатации здания [8, 9].

Для исследования термодинамических процессов и оптимизации технологического процесса, а фактически оптимизации температурных режимов, мы применили лабораторный комплекс, созданный на основе прибора фирмы «ОВЕН» марки ТРМ138 с комплектом термодатчиков. Для осуществления дополнительного обогрева использовались нагревательные элементы марки НЭПС (нагреватель электрический плоский стальной), температурные параметры которых меняются в зависимости от изменений внешних метеорологических условий.

Нагревательные элементы марки НЭПС, представленные на рис. 1, производятся предприятием, входящим в структуру Технопарка ИРНИТУ ООО «Термостат».

Процентное изменение сопротивления нагревательного элемента в зависимости от температуры представлено на рис. 2.

Параметры нагревательных элементов контролировались прибором фирмы «ОВЕН» марки ИМС-Ф1.Щ1. Данный прибор одновременно контролирует параметры напряжения, потребляемого тока и мощности.

¹Варгафтик Н.Б. Теплофизические свойства веществ: справочник. М.-Л.: Техноэнергоиздат, 1956. 357 с.;
Баженов Ю.М. Технология бетонных и железобетонных изделий. М.: Стройиздат, 1984. 672 с.;
Хяутин Ю.Г. Монолитный бетон. Технология производства работ. М.: Стройиздат, 1991. 576 с.



Рис. 1. Внешний вид нагревательных элементов марки НЭПС
Fig. 1. Appearance of electric flat steel heater heating elements

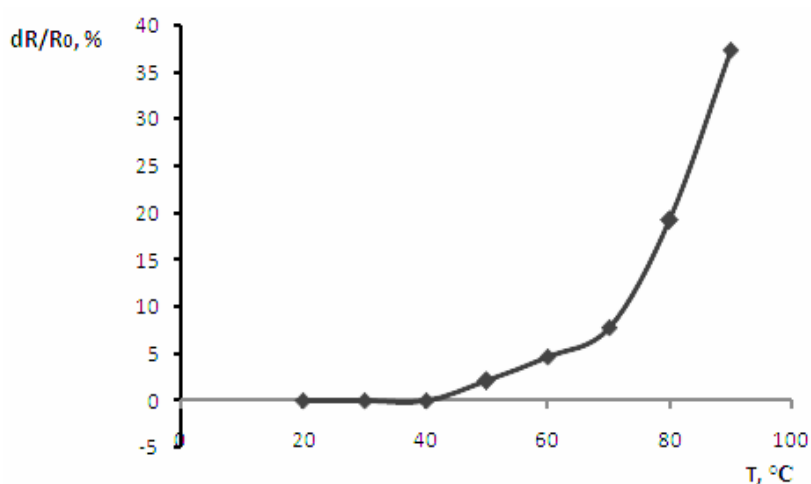


Рис. 2. Сопротивление нагревательного элемента марки НЭПС в зависимости от температуры, %
Fig. 2. Resistance of the electric flat steel heater heating element depending on temperature, %

Из приведенного графика следует, что нагревательные элементы НЭПС обладают положительным коэффициентом сопротивления, и меняют свое сопротивление в заданном интервале температур. Это свойство позволяет использовать их для позиционного регулирования прогрева в случае понижения температуры бетонной смеси без внешних регулирующих устройств [10, 11].

Результаты и их обсуждение

Нами были проведены эксперименты по исследованию термодинамических процессов, возникающих в затвердевающей бетонной смеси во время бетонирования при температуре наружного воздуха -15°C . Толщина

бетонной смеси составляла 200 мм, температура бетонной смеси контролировалась с шагом 50 мм.

В первом эксперименте (-12°C на бетонной поверхности) был изготовлен опытный образец из бетонной смеси с температурой $+15^{\circ}\text{C}$. Температура бетонной смеси соответствовала техническому регламенту ТР 147-03 для производства конструкций из литых бетонных смесей при температурах в диапазоне от -10°C до -15°C . На рис. 3 представлен график изменения температурного поля в процессе твердения бетона с начальной температурой бетонной смеси $+15^{\circ}\text{C}$.

Из графиков на рис. 3 видно, что данным способом осуществлять бетонные работы нель-

зя – в течение одного часа температура всего объема бетонной смеси опустилась ниже отметки ноль.

Во втором эксперименте был получен график изменения температурного поля в

процессе твердения бетона при начальной температуре бетонной смеси +15°C и подогреве поверхности бетонной смеси до +60°C. Результаты эксперимента представлены на рис. 4.

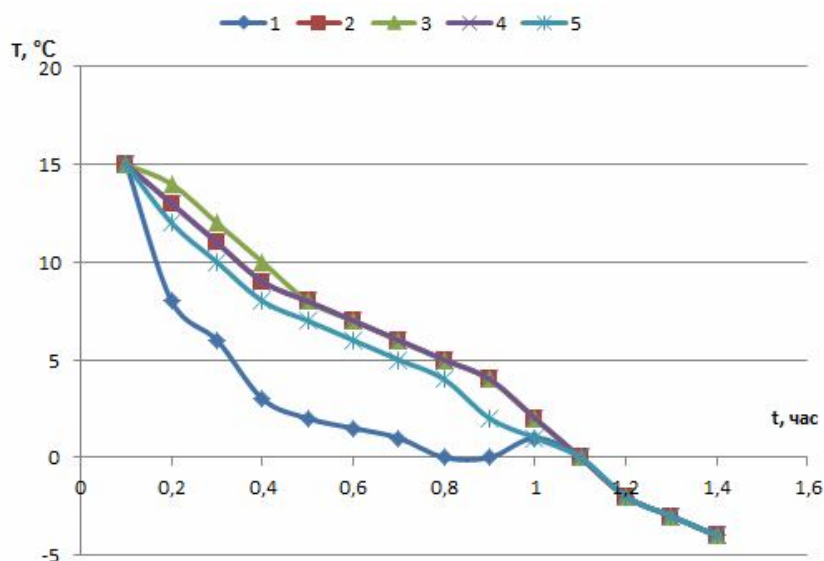


Рис. 3. Эксперимент № 1. Исследование температурного режима бетонной смеси с начальной температурой +15°C: 1 – на поверхности бетонного основания; 2 – на глубине 150 мм от поверхности; 3 – на глубине 100 мм; 4 – на глубине 50 мм; 5 – на поверхности бетонной смеси

Fig. 3. Experiment № 1. Investigation of the temperature mode of the concrete mixture with an initial temperature of +15°C: 1 – on the surface of the concrete base; 2 – at a depth of 150 mm from the surface; 3 – at a depth of 100 mm; 4 – at a depth of 50 mm; 5 – on the surface of the concrete mixture

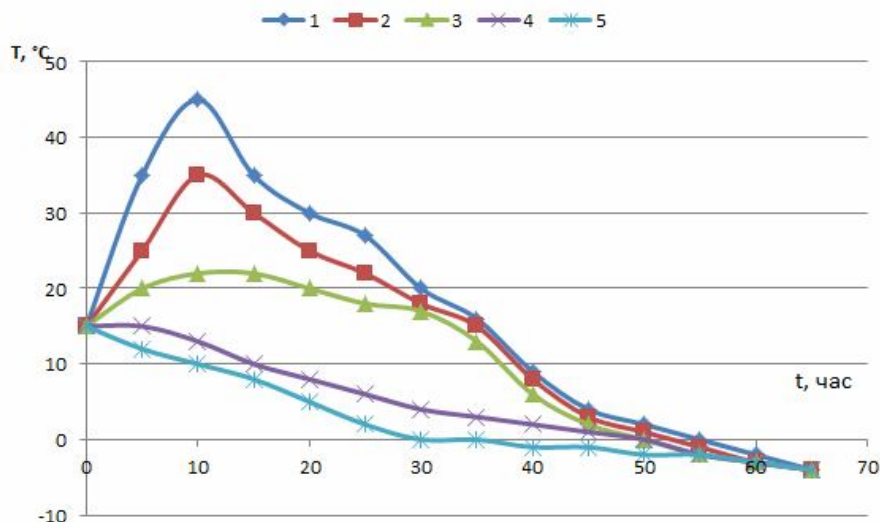


Рис. 4. Эксперимент № 2. Исследование температурного режима бетонной смеси с начальной температурой +15°C и дополнительным прогревом её поверхности до +60°C:

1 – на поверхности бетонного основания; 2 – на глубине 150 мм от поверхности; 3 – на глубине 100 мм; 4 – на глубине 50 мм; 5 – на поверхности бетонной смеси

Fig. 4. Experiment № 2. Investigation of the temperature mode of the concrete mixture with initial temperature of +15°C and additional heating of its surface to +60°C:

1 – on the surface of the concrete base; 2 – at a depth of 150 mm from the surface; 3 – at a depth of 100 mm; 4 – at a depth of 50 mm; 5 – on the surface of the concrete mixture

Из графиков на рис. 4 видно, что, несмотря на то что непосредственно на поверхности бетонной смеси температура опустилась до нулевой отметки в течение 28 ч, средняя температура всего объема приблизилась к нулевой отметке через 48 ч. При обеспечении дополнительного утепления можно увеличить время нахождения бетонной смеси при положительных температурах,

но данный способ не подойдет для ответственных конструкций, которые должны иметь расчетную твердость, необходимую для безопасной эксплуатации здания.

На рис. 5 представлены результаты третьего эксперимента, когда дополнительно к предварительному нагреву бетонной смеси на поверхности опытного образца был установлен нагревательный элемент марки НЭПС.

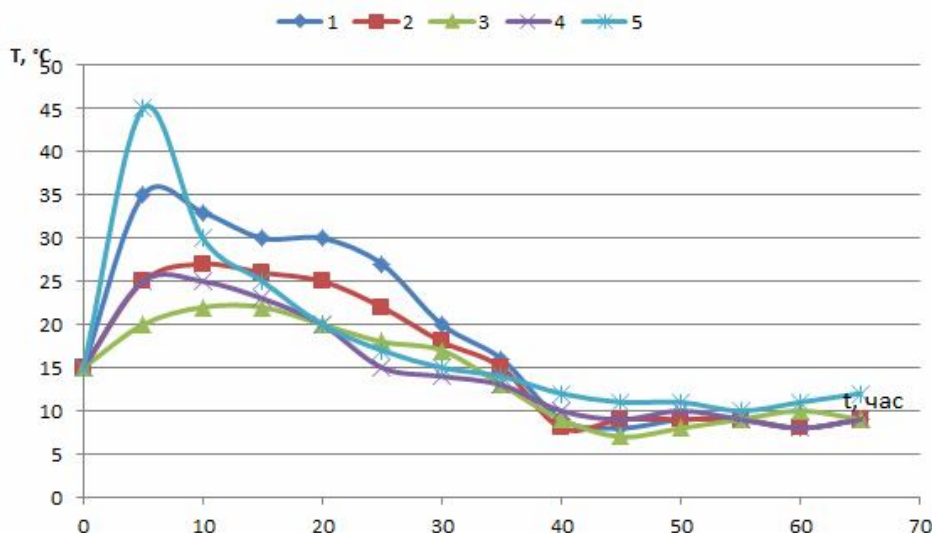


Рис. 5. Эксперимент № 3. Исследование бетонной смеси с начальной температурой +15°C и дополнительным использованием нагревательного элемента марки НЭПС:

1 – на поверхности бетонного основания; 2 – на глубине 150 мм от поверхности; 3 – на глубине 100 мм; 4 – на глубине 50 мм; 5 – на поверхности бетонной смеси

Fig. 5. Experiment № 3. Investigation of concrete mix with an initial temperature of +15°C and additional use of electric flat steel heating element: 1 – on the surface of the concrete base; 2 – at a depth of 150 mm from the surface; 3 – at a depth of 100 mm; 4 – at a depth of 50 mm; 5 – on the surface of the concrete mixture

Из графиков видно, что на третьи сутки бетонная смесь вышла на стационарный режим, при котором по всему объему бетона температура положительная и распределена равномерно. Исследование термодинамических процессов показывает, что данный способ может обеспечить высокое качество выполняемых бетонных работ в зимний период времени.

Заключение

Проведенные эксперименты показали, что нельзя осуществлять работы, связанные с процессом бетонирования, в зимний период времени без предварительного прогрева конструкций. Предварительный прогрев массивных конструкций, на которых осуществляются бетонные работы, позволяет обеспечить положительные температуры бетонной смеси до нескольких суток. Для осуществления ответственных работ по капитальному ремонту, где требуется расчет-

ная прочность, необходимо не только дополнительно подогревать основание конструкции, на которой производятся бетонные работы, но и использовать дополнительный обогрев бетонной смеси. Наилучшим вариантом для этого являются нагревательные элементы с положительным коэффициентом сопротивления. Используя данные нагревательные элементы, можно изготавливать мобильные, переносные конструкции, позволяющие обеспечить высокое качество бетонных работ и снижение себестоимости работ.

Исследования [12, 13] показали, что если использовать электронные регулирующие устройства, то можно улучшить характеристики нагрева, но при этом увеличится себестоимость и снизится надежность, а также потребуются квалифицированный персонал. Из представленных графиков видно, что нагревательные элементы с положительным коэффициентом сопротивления обеспечивают позиционное ре-

гулирование греющего слоя, тем самым способствуя поддержанию бетонной смеси в

заданном интервале температур до набора максимальной прочности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сысоев А.К. Эффективность применения гибких поверхностных нагревательных элементов [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. 2017. № 1 (44). С. 75. URL: <https://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2017/4028> (18.12.2020)
2. Шишкин В.В. Совершенствование метода зимнего бетонирования с применением нагревательных проводов // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 6. С. 51–58. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.06.51-58>
3. Сысоев О.Е., Кичий Е.Р. Факторы, влияющие на процессы расчетов зимнего бетонирования // Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия: материалы Международной научно-практической конференции (29–30 ноября 2018 г., г. Комсомольск-на-Амуре). Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2018. С. 342–345.
4. Вительская А.О., Кирсанова А.А. Технология монолитного бетонирования в зимний период // Наука ЮУрГУ: материалы 71-й научной конференции. Секции технических наук. Южно-Уральский государственный университет (10–12 апреля 2019 г., г. Челябинск). Челябинск: ИЦ ЮУрГУ, 2019. С. 626–629.
5. Бобровская А.С., Титов М.М. Изучение методов оценки надежности технологических процессов при зимнем бетонировании // Colloquium-journal. 2019. № 18-2 (42). С. 21–22.
6. Попов И.В., Медянкин М.Д., Кодзоев М.-Б.Х., Евтишкин А.А. Зимнее бетонирование // Технология и организация строительного производства. 2017. № 4. С. 15–17.
7. Гордеев-Гавриков В.К., Сысоев А.К., Сысоева Н.А. Технология зимнего бетонирования с помощью гибких нагревательных систем // Строительство-2004: материалы юбилейной Международной научно-практической конференции (01–31 января 2004 г., Ростов-на-Дону). Ростов н/Д.: Ростовский государственный строительный университет, 2004. С. 42–43.
8. Шелехов И.Ю., Смирнов Е.И., Иноземцев В.П. Применение новых технологий электрического нагрева в процессе зимнего бетонирования // Новая наука: материалы Международной научно-практической конференции (26 декабря 2016 г., г. Стерлитамак): в 3 ч. Ч. 2. Стерлитамак: РИЦ АМИ, 2016. С. 200–205.
9. Шелехов И.Ю., Смирнов Е.И., Пакулов С.А., Главинская М.М. Анализ производства строительных работ в зимний период времени // Современные наукоемкие технологии. 2017. № 6. С. 99–102.
10. Пат. № 2713729 С1, РФ. Нагревательный элемент широкого спектра применения / И.Ю. Шелехов; патентообладатель И.Ю. Шелехов; заявл.: 03.05.2018; опубл.: 07.02.2020. Бюл. № 4.
11. Vigak V.M., Tokovyi Yu.V. Construction of elementary solutions to a plane elastic problem for a rectangular domain // International Applied Mechanics. 2002. Т. 38. № 7. С. 829–836.
12. Vigak V.M., Yasinskij A.V., Yazvyak N.I. optimal control of heat of thermosensitive bodies of canonical form under restrictions for stresses in the plastic zone // Zhongnan Gongye Daxue Xuebao. 1998. Т. 29. № 5. С. 44–51.
13. Vigak V.M., Rychagivskii A.V. The method of direct integration of the equations of three-dimensional elastic and thermoelastic problems for space and a halfspace // International Applied Mechanics. 2000. Т. 36. № 11. С. 1468–1475.

REFERENCES

1. Sysoev AK. The efficacy of flexible surface heating elements. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering journal of Don*. 2017;1:75. Available from: <https://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2017/4028> [Accessed 18th December 2020].
2. Shishkin V. Improvement of the method of winter concreting with the use of heating wires. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and civil engineering*. 2019;6:51–58. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.06.51-58>
3. Sysoev OE, Kichii ER. The factors influencing processes of calculations of winter concreting. *Regional'nyye aspekty razvitiya nauki i obrazovaniya v oblasti arkhitektury, stroitel'stva, zemleustroystva i kadaistrov v nachale III tysyacheletiya: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii = Regional aspects of the development of science and education in the field of architecture, construction, land arrangement and cadastres*

at the beginning of the III millennium: materials of the International scientific and practical conference. 29–30th November 2018, Komsomolsk-on-Amur. Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-on-Amur State University; 2018. p. 342–345.

4. Vitelskaya AO, Kirsanova AA. Monolithic concreting technology in winter. *Nauka YUUrGU: materialy 71-y nauchnoy konferentsii. Seksii tekhnicheskikh nauk = Science of South Ural State University: materials of the 71st scientific conference. Section of technical sciences*. 10–12th April 2019, Chelyabinsk. Chelyabinsk: Publishing Center South Ural State University; 2019. p. 626–629.

5. Bobrovskaya AS, Titov MM. Study of methods for assessing the reliability of technological processes in winter concreting. *Colloquium-journal*. 2019;18-2(42):21–22.

6. Popov IV, Mediankin MD, Kodzoev M-BH, Evtishkin AA. Winter concreting. *Tekhnologiya i organizatsiya stroitel'nogo proizvodstva*. 2017. № 4. С. 15–17.

7. Gordeev-Gavrikov VK, Sysoev AK, Sysoeva NA. Winter concreting technology using flexible heating systems. *Stroitel'stvo-2004: materialy yubileinoi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Construction-2004: materials of the jubilee International scientific and practical conference*. 01–31 January 2004, Rostov-on-Don. Rostov-on-Don: Rostov State

University of Civil Engineering; 2004. P. 42–43.

8. Shelekhov IYu, Smirnov EI, Inozemtsev VP. Application of new technologies of electric heating in the process of winter concreting. *Novaya nauka: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii = New Science: Materials of the International Scientific and Practical Conference*. 26th December 2016, Sterlitamak. Sterlitamak: Editorial and publ. center AMI; 2016. p. 200–205.

9. Shelekhov IYu, Smirnov EI, Pakulov SA, Glavinskaya MM. Analysis of construction works in winter time. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Sciences high technologies*. 2017;6:99–102.

10. Shelekhov IYu. Wide-range heating element. Pat. RF № 2713729.

11. Vigak VM, Tokovyi YuV. Construction of elementary solutions to a plane elastic problem for a rectangular domain. *International Applied Mechanics*. 2002;38(7):829–836.

12. Vigak VM, Yasinskij AV, Yazvyak NI. Optimal control of heat of thermosensitive bodies of canonical form under restrictions for stresses in the plastic zone. *Zhongnan Gongye Daxue Xuebao*. 1998;29(5):44–51.

13. Vigak VM, Rychagivskii AV. The method of direct integration of the equations of three-dimensional elastic and thermoelastic problems for space and a halfspace. *International Applied Mechanics*. 2000;36(11):1468–1475.

Сведения об авторах

Шелехов Игорь Юрьевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры городского
строительства и хозяйства,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Россия,
e-mail: promteplo@yandex.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7677-3187>

Дорофеева Наталья Леонидовна,
кандидат технических наук, доцент кафедры
механики и сопротивления материалов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Россия,
✉ e-mail: dorofeeva@istu.edu
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2900-6794>

Information about the authors

Igor Yu. Shelekhov,
Cand. Sci (Eng.),
Associate Professor of the Department
of Urban Construction and Management,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: promteplo@yandex.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7677-3187>

Natalia L. Dorofeeva,
Cand. Sci (Eng.),
Associate Professor of the Department
of Mechanics and Strength of Materials,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
✉ e-mail: dorofeeva@istu.edu
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2900-6794>

Казазаева Анна Юрьевна,
бакалавр,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Россия,
e-mail: annakazazaeva3567@yandex.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7750-3069>

Anna Yu. Kazazaeva,
Bachelor's degree,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: annakazazaeva3567@yandex.ru
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7750-3069>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Статья поступила в редакцию 23.12.2020.
Одобрена после рецензирования 19.01.2021.
Принята к публикации 22.01.2021.

Contribution of the authors

All authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

The article was submitted 23.12.2020.
approved after reviewing 19.01.2021.
accepted for publication 22.01.2021.