

Е.Ю. БУШНЕВА<sup>1</sup>, В.П. РАСТОРОПОВ<sup>2</sup>, С.И. ИВАНОВ<sup>3,✉</sup>, А.И. ПАСТУХОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> АО «БТС-МОСТ», пр-т 60-летия Октября, д. 10А, пом. 1/5,  
г. Москва, 117292, Российская Федерация

<sup>2</sup> ООО «СК «Мостотрест», Правая набережная, д. 10, пом. 15-1,  
г. Калининград, 236006, Российская Федерация

<sup>3</sup> Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт  
бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»,  
2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИИ ОПОРЫ МОСТА

## Аннотация

**Введение.** В условиях отрицательных температур или при отсутствии возможности оптимизировать состав бетона в период набора прочности бетона монолитных железобетонных конструкций возможно образование термических трещин, ремонт которых требует значительных дополнительных затрат, не предусмотренных перед началом работ.

**Цель работы** – снижение затрат на ремонт указанных дефектов изготовления в виде доэксплуатационных температурно-усадочных трещин.

**Материалы и методы.** Снижение затрат было достигнуто за счет назначения нескольких вариантов ухода за бетоном, расчета термонапряженного состояния конструкций для каждого из назначенных вариантов и выбора оптимального варианта ухода за бетоном, обеспечивающего минимальные растягивающие напряжения, приводящие к появлению в конструкциях температурно-усадочных трещин, с наименьшим количеством, шириной раскрытия и глубиной распространения трещин.

Расчет выполнялся с применением современных расчетных программ по методике, применяемой в НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство». Особенности условий строительства являлись: бетонирование при отрицательной температуре окружающей среды, применение бетонной смеси с расходом цемента 440 кг/м<sup>3</sup>; бетонирование конструкции секциями высотой 2,25–5,05 м с промежутком между захватками в 12 суток; обеспечение теплообмена конструкции с окружающей средой в начальный период 2–3 суток после бетонирования и регулирования скорости охлаждения конструкции с использованием теплоизоляционных материалов.

**Результаты.** По результатам работ удалось практически исключить появление рассматриваемых дефектов и исключить затраты на ремонт трещин.

**Выводы.** Затраты на выполнение работы и ремонт оказались примерно в 10 раз меньше предполагаемых затрат на ремонт трещин, обычно возникающих в аналогичных конструкциях и условиях строительства.

**Ключевые слова:** опора, тонкостенная конструкция, тепловыделение бетона, термическая трещиностойкость, выдерживание бетона, захватка, термонапряженное состояние

**Для цитирования:** Бушнева Е.Ю., Расторопов В.П., Иванов С.И., Пастухов А.И. Обеспечение термической трещиностойкости конструкции опоры моста // *Бетон и железобетон*. 2023. № 4 (618). С. 37–43. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-4\(618\)-37-43](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-4(618)-37-43)

## Вклад авторов

Бушнева Е.Ю. – финансирование работ, внедрение результатов.

Расторопов В.П. – организация работ, сбор исходных данных для расчета, контроль реализации рекомендаций, разработанных на основании расчета.

Иванов С.И., Пастухов А.И. – выполнение расчетов, разработка рекомендаций, составление статьи.

## Финансирование

Финансирование работы выполнялось за счет средств заказчика в рамках выполнения работ по хозяйственному договору.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 19.07.2023

Поступила после рецензирования 04.08.2023

Принята к публикации 10.08.2023

E.YU. BUSHNEVA<sup>1</sup>, V.P. RASTOROPOV<sup>2</sup>, S.I. IVANOV<sup>3,✉</sup>, A.I. PASTUKHOV<sup>3</sup>

<sup>1</sup> JSC BTS-MOST, 60th Anniversary of October Ave., 10A, room 1/5,  
Moscow, 117292, Russian Federation

<sup>2</sup> LLC SC Mostotrest, Right Embankment, 10, room 15-1,  
Kaliningrad, 236006, Russian Federation

<sup>3</sup> Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev,  
JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 5,  
Moscow, 109428, Russian Federation

# ENSURING THERMAL CRACK RESISTANCE OF THE BRIDGE PIER STRUCTURE

## Abstract

**Introduction.** In conditions of negative temperatures or in the absence of the possibility to optimize the composition of concrete during the period of strength gain of concrete monolithic reinforced concrete structures, the formation of thermal cracks is possible, the repair of which requires significant additional costs that are not provided before the start of work.

**The aim** of the work is to reduce the cost of repairing these manufacturing defects in the form of pre-operational temperature-shrinkage cracks.

**Materials and methods.** Cost reduction was achieved by assigning several options for concrete care, calculating the thermally stressed state of structures for each of the assigned options and choosing the optimal option for concrete care, providing minimal tensile stresses leading to the appearance of temperature-shrinkage cracks in structures, with the least amount, width of opening and depth of crack propagation.

The calculation was carried out using modern calculation programs according to the methodology used in the NIIZHB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction.

The features of the construction conditions were: concreting at a negative ambient temperature, the use of a concrete mixture with a cement consumption of 440 kg/m<sup>3</sup>; concreting the structure with sections 2.25–5.05 m high with an interval of 12 days between divisions; ensuring heat exchange of the structure with the environment in the initial period of 2–3 days after concreting and regulating the cooling rate of the structure using thermal insulation materials.

**Results.** According to the results of the work, it was possible to practically eliminate the appearance of the defects in question and the cost of repairing cracks.

**Conclusions.** The cost of work and repairs turned out to be about 10 times less than the estimated cost of repairing cracks that usually occur in similar structures and construction conditions.

**Keywords:** piers, thin-walled structure, heat release of concrete, thermal crack resistance, curing of concrete, division, thermally stressed state

**For citation:** Bushneva E.Yu., Rastoropov V.P., Ivanov S.I., Pastukhov A.I. Ensuring thermal crack resistance of the bridge pier structure. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2023, no. 4 (618), pp. 37–43. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-4\(618\)-37-43](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-4(618)-37-43)

## Author contribution statements

Bushneva E.Yu. – financing of work, implementation of results.

Rastoropov V.P. – organization of work, collection of initial data for calculation, control of implementation of recommendations developed on the basis of calculation.

Ivanov S.I., Pastukhov A.I. – performing calculations, developing recommendations, writing an article.

## Funding

The financing of the work was carried out at the expense of the customer's funds as part of the performance of work under the economic contract.

## Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 19.07.2023

Revised 04.08.2023

Accepted 10.08.2023

# Введение

ООО «СК «Мостотрест» – компания, с 2008 года занимающаяся строительно-монтажными работами на объектах транспортной инфраструктуры, приняла участие в реконструкции разводного моста через реку Преголю на участке «Калининград» – «Советск» Калининградской железной дороги. Наряду с проектными характеристиками бетона в ответственных конструкциях требовалось обеспечить термическую трещиностойкость [1] в период набора прочности, которая зависит от геометрических особенностей конструкции, армирования, состава бетонной смеси, внешних условий и технологии ухода. Для производства работ был назначен бетон класса В35, содержащий большое количество цементного вяжущего (440 кг/м³). И хотя конструкции опор моста не являлись массивными (модуль поверхности более 2) и в ядре бетона не возникали полумасштабные температурные условия, способствующие высокому разогреву бетона в ядре, повышенный расход цемента в применяемой бетонной смеси мог приводить к высокому саморазогреву смеси в период набора прочности, появлению недопустимо высокого перепада температур между ядром и поверхностью сечения, особенно с учетом отрицательных температур наружного воздуха, и появлению термических трещин.

Опыт возведения монолитных сооружений свидетельствует о том, что в стеновых конструкциях без выполнения специальных мероприятий по снижению температурно-усадочных напряжений появляются сквозные трещины с шагом 2–2,5 высоты захватки бетонирования [2, 3]. Для возводимой опоры это соответствовало пяти трещинам в пределах одной захватки бетонирования (при высоте захватки около 3 м), или ориентировочно  $5 \times 60 \times 2 = 600$  м сквозных трещин.

Сметная стоимость ремонта одного погонного метра трещины инъектированием низковязких полимеров составляет 44 тыс. рублей при работе с автогидроподъемником и 31 тыс. рублей при работе с лесов. Учитывая возможность принятия оперативных технологических мер для уменьшения количества трещин, приводящих к снижению количества трещин примерно в 10 раз (оптимистичный прогноз), ориентировочная сметная стоимость ремонта трещин с внутренней и внешней сторон могла составить до  $0,1 \times (44 + 31) \times 0,5 \times 2 \times 600 = 4\,500$  тыс. руб.

В связи с этим для снижения затрат на ремонт трещин (путем увеличения трещиностойкости конструкции и снижения количества трещин) было принято решение рассмотреть несколько вариантов ухода за бетоном и подобрать оптимальный вариант, при котором возникают наименьшие температурные напряжения. Выбор вариантов ухода выполнялся на основании анализа результатов расчета термонапряженного состояния бетона в период набора прочности. В настоящей статье приведены результаты расчета для наиболее оптимального с точки зрения трещиностойкости режима ухода.

# Особенности конструкции

Монолитная железобетонная конструкция опоры моста представляет в плане два овала размерами  $4,0 \times 9,05$  м, расположенными на расстоянии 11,4 м друг от друга на монолитном основании. Низ опоры находится на отм. 6 000 м, верх – на отм. 60 000 м. План и сечения опоры приведены на рис. 1.

Бетон опоры моста тяжелый класса по прочности В35, марки В35 F1300 W8. Объем бетона на одну опору составляет 991,8 м³.

Основное вертикальное армирование опоры состоит из арматуры класса А400 диаметром 25 мм, расположенной у внешней и внутренней граней сечений, шаг арматуры от  $150 \times 125$  мм до  $150 \times 280$  мм. Горизонтальное армирование состоит из арматуры класса А400 диаметрами 12, 16, 25 мм с шагом 150 мм. Шаг поперечных каркасов, хомутов и шпилек  $300 \times 300$  мм. Удельный расход арматуры в конструкции опоры моста составляет 236,7 кг/м³, процент армирования сечения  $\approx 3\%$ .

Защитный слой бетона для нижнего и верхнего рядов горизонтальной арматуры составляет 90 и 60 мм для первого этапа бетонирования (нижняя захватка); 40 и 60 мм – для последующих соответственно.

С учетом опыта возведения подобных сооружений бетонирование опоры следовало выполнять захватками в четырнадцать этапов (рис. 2). Для расчета были выбраны первые четыре этапа как воспринимающие на себя наибольшие температурные нагрузки,

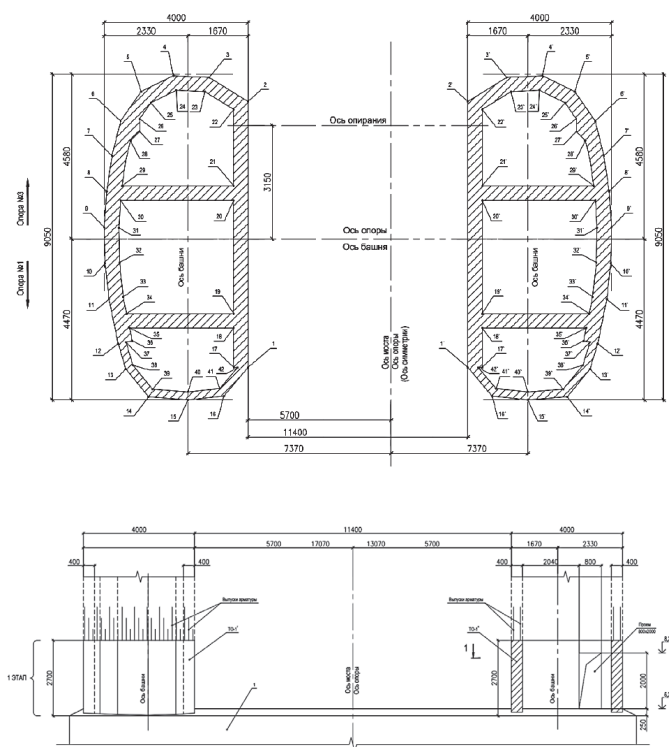


Рис. 1. План и сечение опоры моста  
Fig. 1. Plan and section of the bridge pier

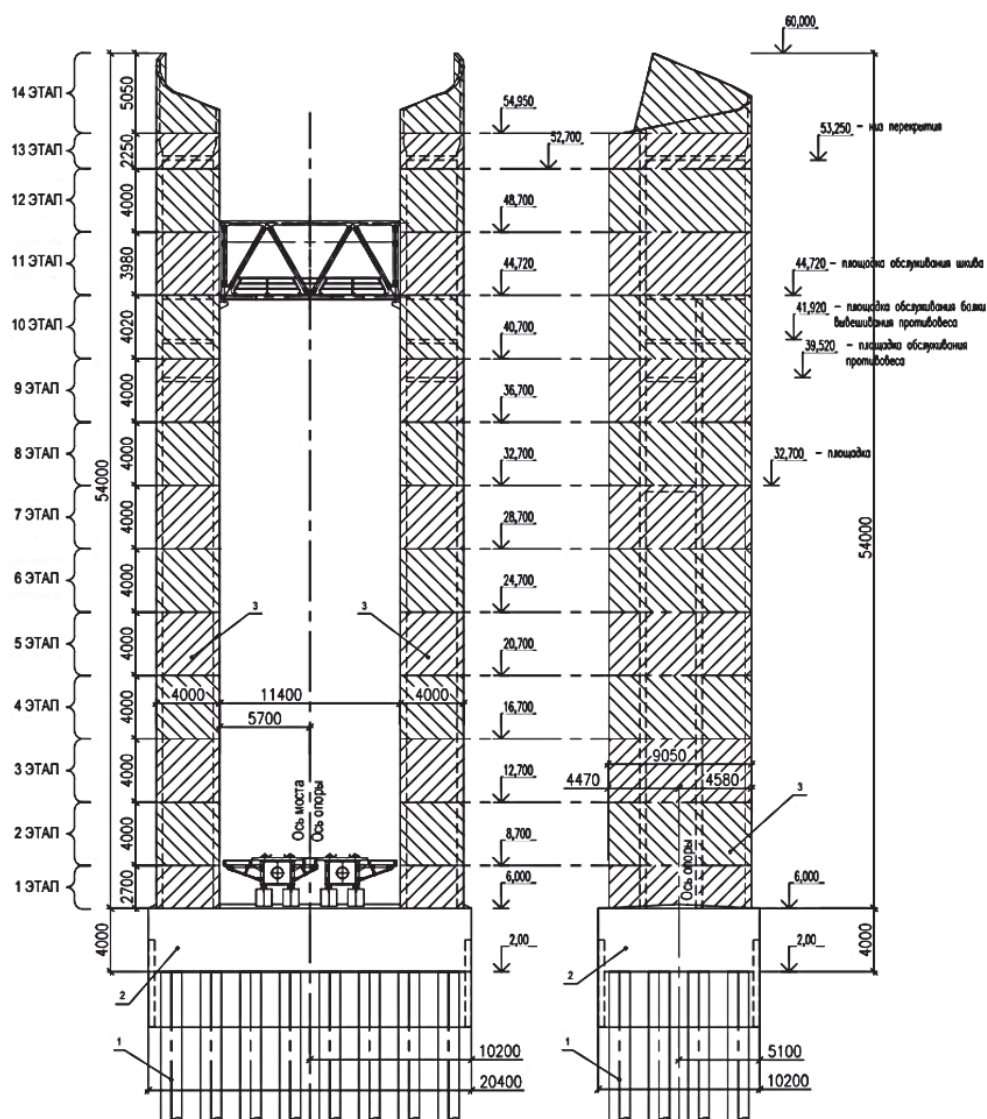


Рис. 2. Этапы бетонирования опоры моста  
Fig. 2. Stages of concreting of the bridge pier

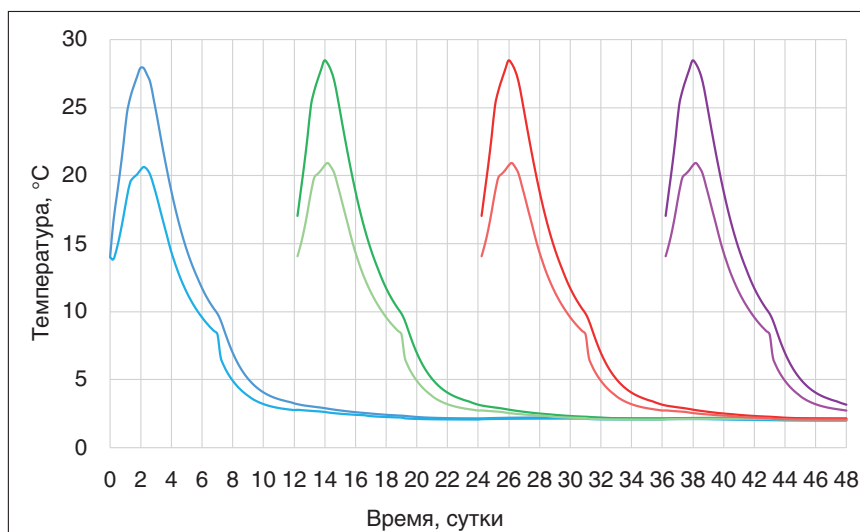


Рис. 3. Распределение температур 1-4 захватки  
Fig. 3. Temperature distribution of 1-4 divisions



имеющие наиболее жесткие граничные условия и бетонизируемые в зимнее время года. На первом этапе бетонировался фрагмент высотой 2,7 м до отм. 8 700 м, последующие фрагменты (захватки бетонирования) – высотой 4,0 м до отм. 20 700 м.

## Расчет термонапряженного состояния

Расчет термонапряженного состояния опоры моста через реку Преголь выполнялся по применяемой в НИИЖБ им. А.А. Гвоздева методике [4] с учетом положений рекомендаций [5] и возможностей современных программных комплексов, реализующих метод конечных элементов. Расчет выполнялся по программе Atena [6, 7] в два этапа:

- на первом этапе решалась нестационарная задача теплопроводности, в результате которой определялись поля температур по сечениям и объему конструкции (рис. 3);

- на втором этапе решалась статическая задача, в которой определялось распределение напряжений по объему конструкции и вероятные зоны трещинообразования (рис. 4).

По результатам проведенных расчетов установлено, что интенсивный разогрев бетона в ядре опоры происходит в течение первых двух суток твердения бетона. Максимальный разогрев будет наблюдаться ко вторым суткам с момента укладки бетона, а температура в ядре сечения опоры не превышает 30 °С. Вследствие малой толщины внешние условия влияют на температуру разогрева ядра – условия твердения экзотермические.

По результатам расчетов, представленных на рисунках, установлено, что температурный перепад

между поверхностями и ядром не превышает 10 градусов, последующие захватки влияют на тепловые поля конструкции несущественно.

По данным, представленным на рис. 4, следует, что в первой (нижней) захватке опоры моста при твердении в условиях оптимального ухода возможно образование ограниченного количества (не более 3–4 метра) вертикальных термических трещин (черным цветом на рис. 4) с шириной раскрытия более 0,2 мм.

В остальных захватках по высоте опоры трещины не образовывались.

## Подбор технологического ухода

Полагаясь на выполненные расчеты, данные строительной климатологии и условия строительной площадки, был подобран наиболее оптимальный с точки зрения обеспечения трещиностойкости и оптимальный для реализации вариант ухода за молодым бетоном конструкции опоры моста:

1. Устройство кольцевого тепляка вокруг бетонизируемой захватки с поддерживаемой температурой +15 °С.

2. Бетонирование и выдерживание бетона в условиях тепляка до седьмых суток.

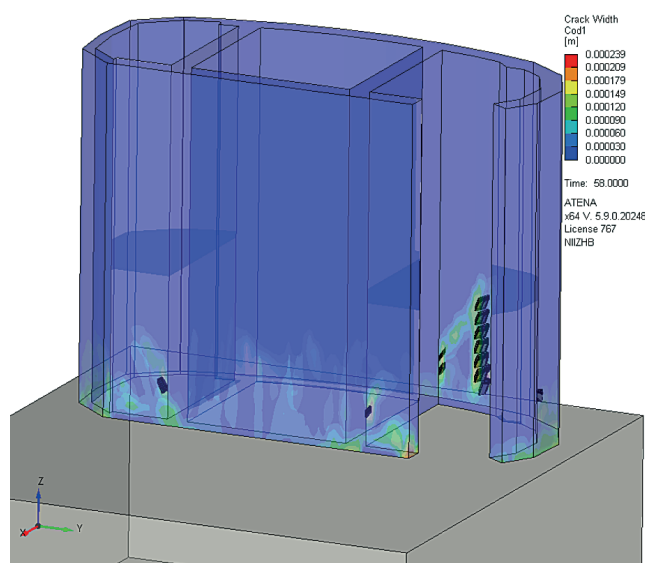
3. Укрытие открытых поверхностей теплоизоляционным материалом «Дорнит» со вторых по седьмые сутки.

4. Демонтаж опалубки и удаление тепляка на седьмые сутки, укрытие тремя слоями «Дорнита» 3 × 3 = 9 мм и выдерживание до 12 суток с переходом к следующей захватке.

5. В течение всего периода ухода минимизировать ветровые потоки на захватках, расположенных ниже бетонизируемой, с помощью свободновисящих выпусков тепляка.

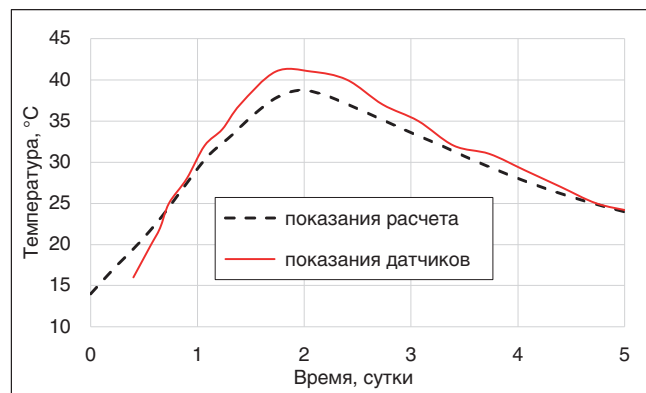
## Результаты мониторинга температуры и дефектоскопии в период возведения

На строительной площадке была создана система контроля за температурой бетона с помощью датчиков, установленных в тело бетона, которая позволила контролировать разогрев конструкции. На рис. 5



**Рис. 4.** Изополя участков потенциального образования трещин и ширины их раскрытия в возрасте 14 суток после начала бетонирования

**Fig. 4.** Isofields of areas of potential formation of cracks and the width of their opening at the age of 14 days after start of concreting



**Рис. 5.** Сравнение расчетных и фактических значений температуры в ядре сечения

**Fig. 5.** Comparison of calculated and actual temperatures

показано сравнение расчетных значений температур ядра конструкции и полученных на строительной площадке.

Дефектоскопия опоры моста в молодом возрасте выявила одну несквозную (глубиной не более толщины защитного слоя бетона) трещину с шириной раскрытия 0,3 мм в первой захватке, длиной не более 3 м. После достижения проектного возраста бетона сквозные трещины термического происхождения выявлены не были (рис. 6), что указывает на правильность выбора основных положений расчета термонапряженного состояния конструкции и обоснованность использования его результатов при назначении параметров ухода за массивной конструкцией.

В заключение следует отметить, что суммарные затраты на выполнение расчета термонапряженного состояния и ремонта выявленных трещин оказались примерно на порядок (в 10 раз) ниже предполагаемых затрат в случае отсутствия ухода за бетоном и ремонта возникающих в таком случае температурных трещин.

### Выводы

1. Произведена оценка термической трещиностойкости конструкций опоры моста на объекте реконструкции разводного моста через реку Преголь на участке «Калининград» – «Советск» Калининградской железной дороги.

2. Подобран оптимальный технологический режим ухода в период набора прочности бетона, предотвращающий образование температурно-усадочных трещин с недопустимой шириной раскрытия и обеспечивающий проектные характеристики рассматриваемых конструкций.

3. Выполнение расчетов термонапряженного состояния и подбор на их основе оптимальной технологии ухода позволили существенно снизить экономические затраты, связанные с распространением и последующим ремонтом температурно-усадочных трещин.



Рис. 6. Конструкция опоры моста первых семи этапов  
Fig. 6. Bridge piers structure in the first seven stages

### Список литературы

1. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В. Обеспечение термической трещиностойкости массивных фундаментных плит из модифицированных бетонов нового поколения // *Проблемы долговечности зданий и сооружений в современном строительстве: матер. Международ. конф.* Санкт-Петербург; 2007. С. 240–245.
2. Рекомендации по обеспечению трещиностойкости монолитных стен. Москва: ЦНИИЭП жилых зданий; 1984. 49 с.
3. Фрид С.А. Температурные напряжения в бетонных и железобетонных гидротехнических сооружениях. Ленинград; 1959. 72 с.
4. Болгов А.Н., Невский А.В., Иванов С.И., Сокуров А.З. Численное моделирование температурных напряжений в бетоне массивных конструкций в период твердения // *Промышленное и гражданское строительство*. 2022. № 4. С. 6–13. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2022.04.06-13>
5. Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях. Москва: РААСН, НИИЖБ; 2005.
6. Červenka V., Jendele L., Červenka J. ATENA Program Documentation. Part 1. Theory. Part 3–2 Example Manual. Prague; 2021.
7. Eduardo M.R. Fairbairn, Miguel Azenha. Thermal Cracking of Massive Concrete Structures. *State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 254–CMS* [Термическое растрескивание массивных бетонных конструкций. Отчет о состоянии дел технического комитета RILEM 254–CMS]. RILEM State Art Reports. Vol. 27. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76617-1>

### References

1. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S., Kiseleva Yu.A., Prigozhenko O.V. Providing thermal crack resistance of massive foundation slabs made of modified concretes of a new generation. *Problems of durability of buildings and structures in modern construction: materials of the International conference*. St. Petersburg; 2007. pp. 240–245.
2. Recommendations for ensuring crack resistance of monolithic walls. Moscow: Central research institute of experimental design of dwelling; 1984. 49 p.
3. Frid S.A. Temperature stresses in concrete and reinforced concrete hydraulic structures. Leningrad; 1959. 72 p.
4. Bolgov A.N., Nevskii A.V., Ivanov S.I., Sokurov A.Z. Numerical Modeling of Thermal Stresses in Concrete of Massive Structures During the Hardening Period. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2022, no. 4, pp. 6–13. (In Russian) <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2022.04.06-13>
5. Guidelines for heating concrete in monolithic structures. Moscow: RAASN, NIIZHB; 2005.

6. Červenka V., Jendele L., Červenka J. ATENA Program Documentation. Part 1. Theory. Part 3–2 Example Manual. Prague; 2021.

7. Eduardo M.R. Fairbairn, Miguel Azenha. Thermal Cracking of Massive Concrete Structures. *State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 254–CMS*. RILEM State Art Reports. Vol. 27. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76617-1>

**Информация об авторах /  
Information about the authors**

**Елена Юрьевна Бушнева**, канд. техн. наук, заместитель генерального директора по качеству, АО «БТС-МОСТ», Москва  
e-mail: BushnevaEY@btsmost.ru

**Elena Yu. Bushneva**, Cand. Sci. (Engineering), Deputy General Director for Quality, JSC BTS-MOST, Moscow  
e-mail: BushnevaEY@btsmost.ru

**Владимир Павлович Расторопов**, начальник ОСК ООО «СК «Мостотрест», Калининград  
e-mail: RastoropovVP@btsmost.ru

**Vladimir P. Rastoropov**, OSK Chief, LLC SK Mostotrest, Kaliningrad  
e-mail: RastoropovVP@btsmost.ru

**Сергей Ильич Иванов** ✉, канд. техн. наук, заведующий лабораторией № 7 НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва  
e-mail: 5378018@mail.ru  
тел.: +7 (495) 602-00-70

**Sergey I. Ivanov** ✉, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory No. 7, NIIZHB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow  
e-mail: 5378018@mail.ru  
tel.: +7 (495) 602-00-70

**Александр Игоревич Пастухов**, инженер лаборатории № 7 НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва  
e-mail: apastuhov@mail.ru  
тел.: +7 (495) 602-00-70

**Alexander I. Pastukhov**, Engineer, Laboratory No. 7, NIIZHB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow  
e-mail: apastuhov@mail.ru  
tel.: +7 (495) 602-00-70

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author