

**С.С. КАПРИЕЛОВ^{1,2}, А.В. ШЕЙНФЕЛЬД^{1,2,✉}, С.И. ИВАНОВ¹,
А.Н. ИВАЩЕНКО³, П.М. ЛЕОНТЬЕВ⁴, А.И. ПАСТУХОВ¹**

¹ 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

² ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Российская Федерация

³ ООО «Инфорспроект», ул. Ленинская слобода, д. 19, г. Москва, 115280, Российская Федерация

⁴ ООО «Предприятие Мастер Бетон», ул. Саратовская, д. 31, г. Москва, 109518, Российская Федерация

ВОЗВЕДЕНИЕ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ АРОК ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ТЕРМИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИИ

Аннотация

Введение. Представлена конструкция и технология непрерывного бетонирования двух массивных наклоненных друг к другу сталежелезобетонных арок (высотой 19 м, пролетом 47 и 81 м) объемом 184 и 283 м³ в несъемной опалубке, функцию которой выполняла стальная оболочка диаметром 2 и 2,5 м, с проектным классом бетона В70.

Целью комплекса конструкторско-технологических работ являлись расчет и проектирование арок, включая расчет термонапряженного состояния массивных конструкций в начальный период после бетонирования, определение рецептурных и температурно-временных параметров технологии производства бетонных работ и контроля качества бетона.

Материалы и методы. Обеспечение жесткости конструкции осуществлено за счет сталежелезобетонного сечения арок, имеющего в сравнении с металлической конструкцией повышенную до 5,5 раза изгибную и до 3,5 раза осевую жесткости. Особенности технологии возведения и контроля качества бетона арок заключались в следующем: использовалась самоуплотняющаяся бетонная смесь с добавками органоминерального модификатора марки МБ 2-30С, суперпластификатора и замедлителя твердения; обеспечивался беспрепятственный теплообмен конструкций с окружающей средой при температуре воздуха 28–33 °С; осуществлялся контроль прочности бетона в конструкции по контрольным образцам, изготовленным из проб смеси, отобранных при бетонировании конструкций.

Результаты. Фактические значения прочности бетона и температурных параметров выдерживания конструкций арок полностью соответствуют проектным требованиям и значениям, определенным расчетом термонапряженного состояния конструкций, в том числе: прочность бетона на сжатие в конструкциях в проектном возрасте составляет 108,1 и 111,3 МПа, соответствует фактическим классам по прочности на сжатие В_ф94 и В_ф97 и превышает требования проекта; максимальная температура бетона в ядре конструкций составила 57–68 °С; средняя скорость остывания конструкций не превышала 5 °С/сут; перепад температуры по длине конструкций составил 0,6–0,8 °С/м; разность температуры между ядром и поверхностью стальной оболочки, а также поверхностью оболочки и окружающей средой не превышала 20 °С.

Выводы. Предложенные подходы, учитывающие особенности расчета, конструирования, технологии возведения и контроля качества бетона, могут использоваться при строительстве технически сложных сталежелезобетонных конструкций в несъемной опалубке.

Ключевые слова: арка, высокопрочный бетон, напорное бетонирование, несъемная опалубка, самоуплотняющийся бетон, сталежелезобетонная конструкция, термонапряженное состояние, технология возведения

Для цитирования: Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Иванов С.И., Иващенко А.Н., Леонтьев П.М., Пастухов

хов А.И. Возведение сталежелезобетонных арок из высокопрочного бетона с обеспечением термической трещиностойкости конструкции // *Бетон и железобетон*. 2024. № 5 (624). С. 5–21. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5\(624\)-5-21](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5(624)-5-21). EDN: IMXZYA

Вклад авторов

Каприелов С.С. – один из разработчиков технологии, осуществлял руководство научно-техническим сопровождением бетонных работ на объекте.

Шейнфельд А.В. – один из разработчиков технологии, контролировал научно-техническое сопровождение бетонных работ на объекте.

Иванов С.И., Пастухов А.И. – авторы расчета термонапряженного состояния сталежелезобетонных конструкций арок.

Иващенко А.Н. – один из авторов проекта сталежелезобетонных конструкций арок.

Леонтьев П.М. – осуществлял оптимизацию, внедрение и контроль технологии бетонных работ на объекте.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 11.11.2024

Поступила после рецензирования 08.12.2024

Принята к публикации 12.12.2024

**S.S. KAPRIELOV^{1,2}, A.V. SHEYNFELD^{1,2,✉}, S.I. IVANOV¹,
A.N. IVASCHENKO³, P.M. LEONTIEV⁴, A.I. PASTUKHOV¹**

¹ Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 5, Moscow, 109428, Russian Federation

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation

³ LLC “Inforsproekt”, Leninskaya Sloboda str., 19, Moscow, 115280, Russian Federation

⁴ LLC “Master Concrete Enterprise”, Saratovskaya str., 31, Moscow, 109518, Russian Federation

CONSTRUCTION OF STEEL—REINFORCED CONCRETE ARCHES FROM HIGH—STRENGTH CONCRETE WITH ENSURING OF THERMAL CRACK RESISTANCE OF THE STRUCTURE

Abstract

Introduction. The design and technology of continuous concreting of two massive steel-reinforced concrete arches inclined to each other (height 19 m, span 47 and 81 m) with a volume of 184 and 283 m³ in a fixed formwork, the function of which was performed by a steel shell with a diameter of 2 and 2.5 m, with a design class of concrete B70 are presented.

The aim of the complex of design and technological works was the calculation and design of arches, including the

calculation of the thermally stressed state of massive structures in the initial period after concreting, and the determination of prescription and temperature-time parameters of concrete production technology and concrete quality control.

Materials and methods. The rigidity of the structure is ensured due to the steel-reinforced concrete section of the arches, which, in comparison with the metal structure, has increased bending stiffness up to 5.5 times and axial stiffness – up to 3.5 times. The features of the technology

for the construction and quality control of concrete arches were as follows: a self-compacting concrete mixture with additives of an organomineral modifier of the MB 2-30C brand, a superplasticizer and a hardening retarder was used; unhindered heat exchange of structures with the environment at the air temperature of 28–33 °C was ensured; the strength of concrete in the structure was monitored according to control samples made from samples of the mixture taken during concreting of structures.

Results. The actual values of concrete strength and temperature parameters of arch structures fully correspond to the design requirements and values determined by the calculation of the thermally stressed state of structures, including: the compressive strength of concrete in structures at the design age is 108.1 and 111.3 MPa, corresponds to the actual classes of compressive strength B₉₄ and B₉₇ and exceeds the requirements of the project; the maximum temperature of concrete in the core of structures was 57–68 °C; the average cooling rate of structures did not exceed 5 °C/day; the temperature difference along the length of the structures was 0.6–0.8 °C/m; the temperature difference between the core and the surface of the steel shell, as well as the surface of the shell and the environment did not exceed 20 °C.

Conclusions. The proposed approaches, taking into account the specifics of calculation, design, technology of construction and quality control of concrete, can be used in the construction of technically complex steel-reinforced concrete structures in fixed formwork.

Keywords: arch, high-strength concrete, pressure concreting, non-removable formwork, self-compacting concrete, steel-reinforced concrete construction, thermally stressed condition, construction technology

For citation: Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Ivanov S.I., Ivaschenko A.N., Leontiev P.M., Pastukhov A.I. Construction of steel-reinforced concrete arches from high-strength concrete with ensuring of thermal crack resistance of the structure. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2024, no. 5 (624), pp. 5–21. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5\(624\)-5-21](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5(624)-5-21). EDN: IMXZYA

Authors contribution statement

Kaprielov S.S. – one of the developers of the technology, he supervised the scientific and technical support of concrete works at the facility.

Sheinfeld A.V. – one of the developers of the technology, he supervised the scientific and technical support of concrete works at the facility.

Ivanov S.I., Pastukhov A.I. – authors of the calculation of the thermal stress state of steel-reinforced concrete structures of arches.

Ivashchenko A.N. – one of the authors of the project of steel-reinforced concrete structures of arches.

Leontiev P.M. – carried out optimization, implementation and control of concrete work technology at the facility.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 11.11.2024

Revised 08.12.2024

Accepted 12.12.2024

Введение

Архитектурные особенности технически сложных и уникальных сооружений требуют применения новых современных подходов к строительству железобетонных и сталежелезобетонных конструкций, которые заключаются в использовании нестандартных конструктивных решений и методов расчета, новых высококачественных материалов и передовых технологий [1–8].

Примером современного подхода к строительству таких сооружений явилось возведение двух сталежелезобетонных конструкций арок АР3 и АР4 с затяжками, наклоненных друг к другу и объединенных между собой в верхней части системой связей, являющихся основными несущими конструкциями, на которые крепятся колонны многоуровневого перехода на объекте «Технопарк ПАО «Сбербанк» в инновационном центре «Сколково».

Возведению арок предшествовало решение следующих задач:

- расчет и проектирование конструкции;
- расчет термонапряженного состояния конструкции в начальный период после бетонирования;
- определение рецептурных и температурно-временных параметров технологии с разработкой регламента производства бетонных работ и контроля качества бетона.

Особенности конструкции, технологии возведения и контроля качества

Особенности конструкции арок

Геометрия арок подчинена архитектурной концепции всего объекта Технопарка, выполненного британской архитектурной и дизайнерской фирмой Zaha Hadid Architects (ZHA). Форма здания имеет бионический дизайн. Внешняя часть строения представлена плавными обтекаемыми формами, выполненными из прозрачного стекла.

Эти факторы повлияли на конструктивные решения несущих и ограждающих конструкций, в которых практически нет ни одного повторяющегося элемента, в связи с чем арки многоуровневого перехода имеют не самое экономичное конструктивное решение. Так, например, арки не являются симметричными и имеют разные пролеты. Вследствие несимметричности арочных сводов при работе на вертикальную нагрузку в них возникают неравномерные прогибы под малой и большой арками. Соответственно, прогибы получают и надарочные конструкции. Для компенсации неравномерности прогибов на вышележащих конструкциях предусмотрен строительный подъем.

В таких обстоятельствах требовалось обеспечить жесткость конструкций и сооружения в целом. Это могло быть сделано за счет применения в качестве материала сталежелезобетона, имеющего, в сравнении с металлической конструкцией, повышенную до 5,5 раза изгибную и до 3,5 раза осевую жесткости.

При проектировании арок учтено изменение расчетной схемы конструкций в процессе возведения и монтажа. На начальном этапе на вспомогательных подмостях возводятся только металлоконструкции. После монтажа всех элементов арок, связей и затяжек происходит раскружаливание. В этот момент и до окончания бетонирования арок все нагрузки воспринимаются металлокаркасом. После набора прочности бетона в расчетной схеме учитывались жесткость и прочность сталежелезобетонной конструкции.

На основании изложенных выше данных были спроектированы сталежелезобетонные конструкции двух арок АР3 пролетом 47 м, высотой 19,005 м и АР4 пролетом 81 м, высотой 19,060 м, которые опираются на фундаменты через шаровые сегментные опорные части мостового типа (ШСОЧ) с антифрикционными полимерными прокладками. Общий вид конструкций арок приведен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид конструкций арок
Fig. 1. General view of the arch structures

Оболочка конструкций арок выполнена из стальной трубы круглого сечения (диаметром 2,02 м, толщиной стенки 32 мм – для АР3, диаметром 2,52 и 2,02 м и толщиной стенки 25 мм – для АР4) с внутренними стаб-болтами, усиленной продольными и поперечными ребрами. Армирование сталежелезобетонных конструкций арок АР3 и АР4 предусматривается арматурой класса А500С диаметром 36 мм (продольной) и 20 мм (поперечной) с шагом 175 и 350 мм. Соединение арматуры осуществляется внахлест. Средний

удельный расход арматуры в конструкциях арок АР3 и АР4 составляет 181 кг/м³. Общий объем бетона в конструкции арок составляет 467 м³, в том числе для арок АР3 – 184 м³, АР4 – 283 м³. Основные проектные характеристики бетона в конструкции арок: класс по прочности на сжатие В70, марка по морозостойкости F₂₀₀, марка по водонепроницаемости W6.

План, сечения и армирование сталежелезобетонных конструкций двух арок АР3 и АР4 в осях 12-20/А-В представлены на рис. 2 и 3.

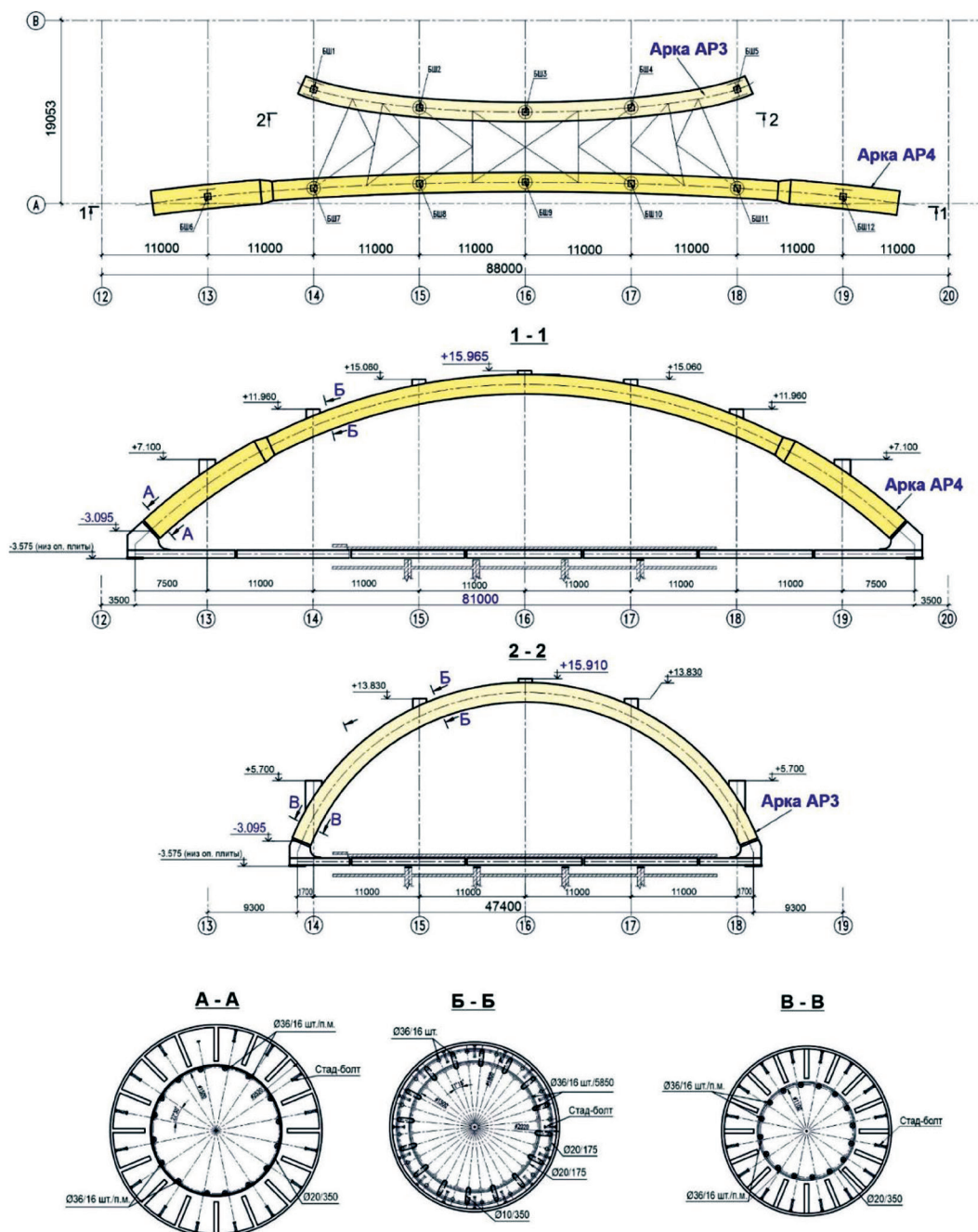
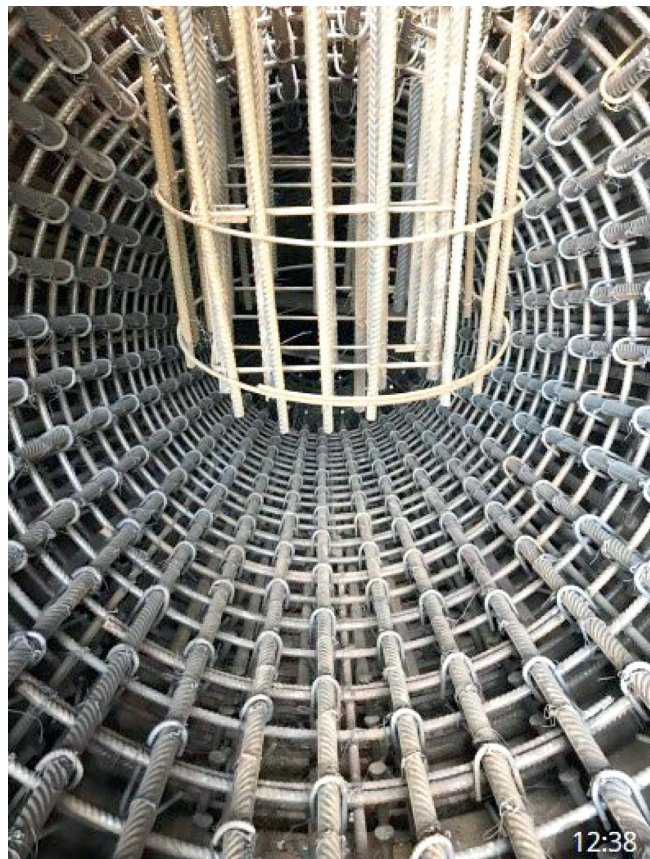


Рис. 2. План и сечения сталежелезобетонных конструкций арок
Fig. 2. Plan and sections of steel-reinforced concrete structures of arches



a (a)



б (b)

Рис. 3. Металлическая оболочка (а) и армирование (б) сталежелезобетонных конструкций арок
Fig. 3. Metal shell (a) and reinforcement (b) of steel-reinforced concrete structures of arches

Особенности технологии возведения

Технология возведения сталежелезобетонных конструкций арок с модулем поверхности $1,98 \text{ м}^2$ в несъемной опалубке, функцию которой выполняла металлическая оболочка, с учетом высокой прочности бетона и отсутствия доступа к внутреннему пространству, решала три взаимосвязанные задачи:

- обеспечение высокой скорости и равномерности укладки бетонной смеси во внутреннее пространство арок с учетом предотвращения образования рабочих швов бетонирования и деформации металлических оболочек;
- обеспечение сплошности бетона сталежелезобетонных конструкций арок и проектных характеристик бетона в возрасте 56 суток;
- обеспечение термической трещиностойкости конструкций при перепадах и градиентах температур, вызванных экзотермией бетона.

Технология бетонирования с регламентированными рецептурными и температурно-временными параметрами основывалась на принципах, которые были отработаны ранее при бетонировании массивных конструкций с аналогичным модулем поверхности менее 2 м^2 [9–11].

Применялась самоуплотняющаяся бетонная смесь марки БСТ В70 ($RT \geq 87,5 \text{ МПа}$) РК2 ($PK = (70 \pm 5) \text{ см}$) F1200 W6 ГОСТ Р 59714-2021 [12] с минимизированным для обеспечения подвижности смеси и класса бетона расходом цемента.

Состав бетонной смеси должен обеспечить сохранение подвижности в течение 4 часов с учетом длительности ее транспортировки и укладки в конструкции при высоких температурах смеси ($25\text{--}29 \text{ }^\circ\text{C}$) и окружающей среды ($27\text{--}33 \text{ }^\circ\text{C}$).

Контроль качества поступающей на строительную площадку бетонной смеси должен выполняться из каждого автобетоносмесителя по ГОСТ Р 59715-2022 [13].

Для обеспечения равномерной нагрузки на стальную оболочку арок подача самоуплотняющейся бетонной смеси в каждую конструкцию должна осуществляться двумя автобетононасосами с двух концов одновременно, непрерывно и последовательно в закрепленные за ними места. Схема и порядок укладки бетонной смеси в конструкцию арок представлены на рис. 4.

Контроль за укладкой самоуплотняющейся бетонной смеси во внутреннее пространство стальных оболочек должен осуществляться через отверстия диа-

метром 30 мм в верхней части сечения арок (рис. 4), которые после вытекания из них бетонной смеси заделываются с помощью вкручивания в них металлических болтов с прокладкой и термопарой.

Выдерживание бетона и уход за конструкциями должны осуществляться на основании результатов контроля температуры бетона в разных сечениях по длине арок. Температура бетона определяется в 8-ми сечениях арки АРЗ и 14-ти сечениях арки АР4, расположенных равномерно по длине конструкций – в ядре с помощью хромель-копелевых термопар и прибора «Терем» и на поверхности стальной оболочки с помощью пирометра. Расположение точек контроля температуры бетона в конструкции арок представлено на рис. 4.

Схема ухода за бетоном после бетонирования, принятая на основании расчета термонапряженного состояния конструкций, состоит в следующем. На стадии повышения температуры стальная обо-

лочка конструкции арок не утепляется. Это обеспечивает естественный теплообмен конструкции с окружающей средой и тем самым снижает максимальную температуру в ядре конструкции. На стадии охлаждения конструкции скорость охлаждения бетона в ядре конструкций должна быть не более 5 °C в сутки.

Контроль прочности бетона на сжатие в конструкции арок, в связи с отсутствием доступа, должен осуществляться в возрасте 7, 28 и 56 суток в соответствии с п. 8.1.5 ГОСТ 18105-2018 [14] и п. 4.7 ГОСТ 31914-2012 [15] по контрольным образцам, изготовленным из проб отобранных при бетонировании конструкций в соответствии с ГОСТ 10180-2012 [16] и ГОСТ 31914-2012 [15].

Оценка прочности бетона арок проводится в проектном возрасте 56 суток в соответствии с ГОСТами [14, 15] путем сравнения проектного (B_{70}) и фактического ($B_{ф}$) классов бетона в конструкции.

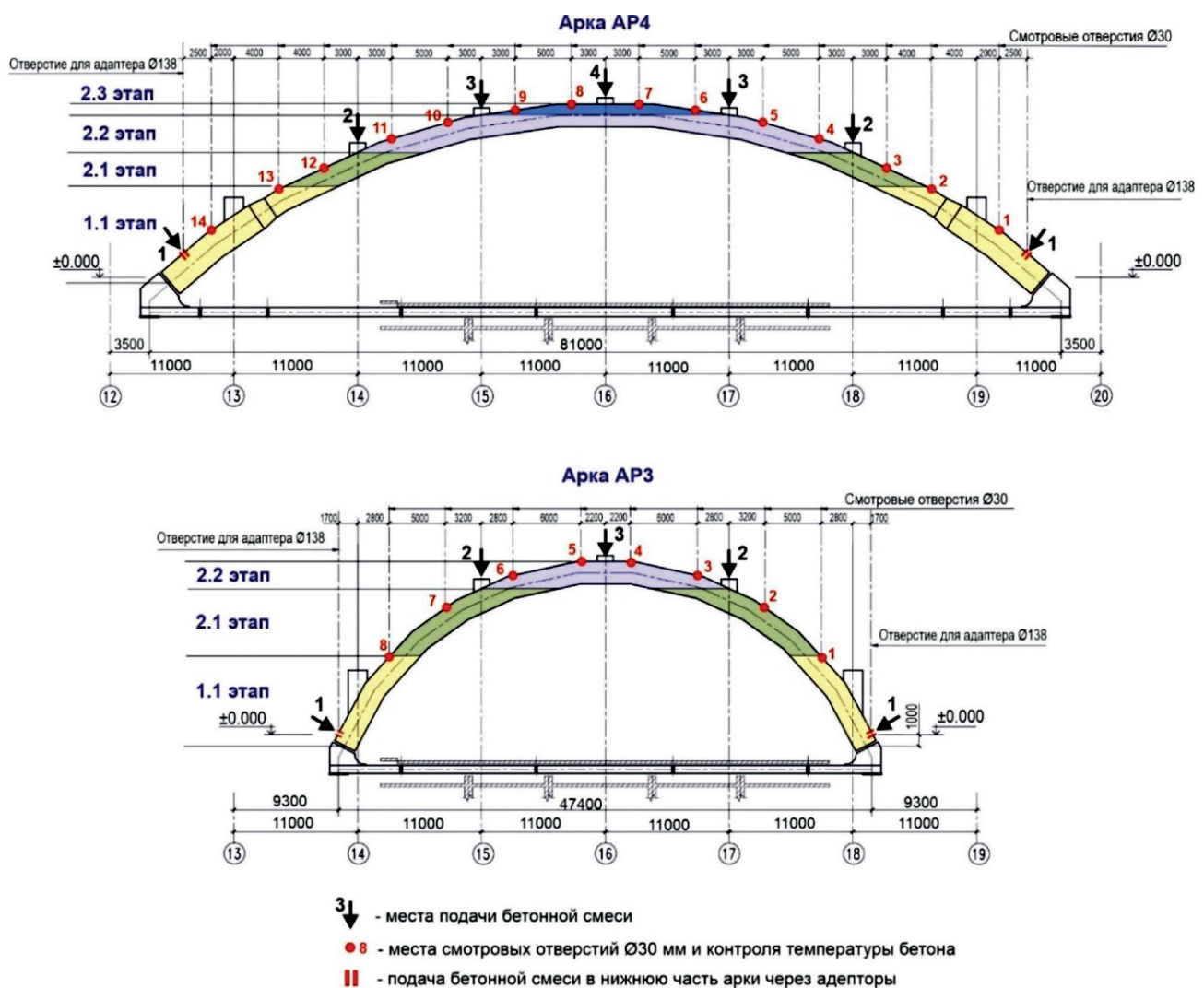


Рис. 4. Схема укладки бетонной смеси по сечению конструкции арок
Fig. 4. Laying of concrete mix along the arch structure section scheme

Фактический класс бетона по прочности на сжатие в конструкции арок должен определяться с учетом характеристик однородности бетона по прочности в соответствии с п. 6.1.1.12 [15]. При этом коэффициент требуемой прочности определяется по [14, табл. А1] в зависимости от фактического коэффициента вариации прочности бетона, но принимается не менее 1,14.

Особенности расчета термонапряженного состояния

Расчет термонапряженного состояния сталежелезобетонных конструкций арок выполнялся по применяемой в НИИЖБ им. А.А. Гвоздева методике [17] с учетом рекомендаций [18] и возможностей современных программных комплексов, реализующих метод конечных элементов. Расчет выполнялся по программе Atena [19] в два этапа: сначала определялась кинетика изменения температуры конструкции вследствие экзотермии бетона, а затем на основании полученных данных выполнялся расчет напряжений в бетоне на ранних стадиях твердения.

Основные положения расчета термонапряженного состояния сталежелезобетонных арок были приняты по результатам опубликованных ранее исследований [9, 10, 20–23] с учетом солнечного излучения (100 Вт/м^2), экзотермического процесса твердения бетона и снижения тепловыделения за счет комплексного использования органоминерального модификатора МБ 2-30С, суперпластификатора и замедлителя твердения (рис. 5).

По результатам расчета на первом этапе определялась кинетика изменения температуры по сечению сталежелезобетонных арок (рис. 6) в ядре конструкции, на внешней поверхности стальной оболочки и на внутренней границе стальной оболочки и бетона при нахождении конструкции в естественных условиях при температуре окружающего воздуха $28\text{--}33^\circ\text{C}$.

Данные, представленные на рис. 6, показывают, что полученные расчетные температурные параметры твердения бетона без выполнения специальных мероприятий по уходу за конструкциями в целом соответствуют общепринятым ограничениям [24–26]:

- максимальная температура бетона в ядре конструкции не превышает 70°C ;
- средняя скорость остывания бетона в ядре конструкции составляет 5°C/сут ;
- разность температуры между ядром и внутренней поверхностью стальной оболочки не превышает 20°C ;
- разность температуры между внешней поверхностью оболочки и окружающей средой не превышает 20°C .

На втором этапе по результатам расчета термонапряженного состояния фрагмента арки АР4 с учетом кинетики набора прочности бетона, ползучести и релаксации напряжений выявлялись участки потенциально возможного образования термических трещин в бетоне конструкций арок и определялись ширина их раскрытия и глубина распространения.

По данным расчета, представленным на рис. 7, следует, что при нахождении конструкции в есте-

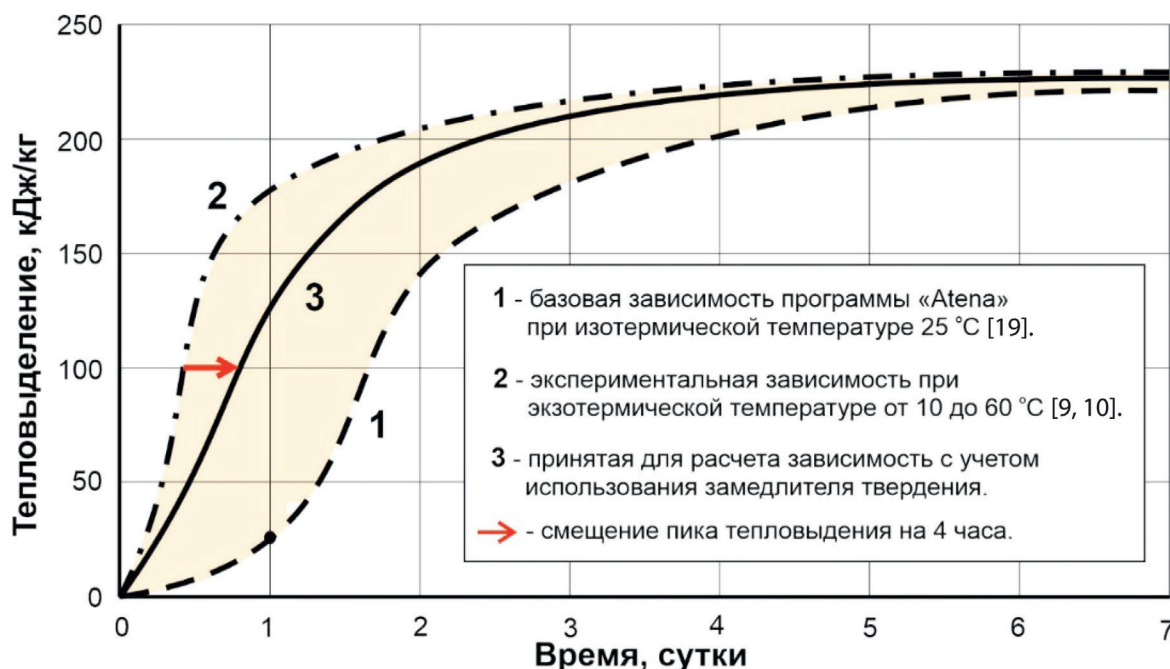


Рис. 5. Кинетика тепловыделения бетона на ранних сроках твердения
Fig. 5. Kinetics of heat release of concrete in the early stages of hardening

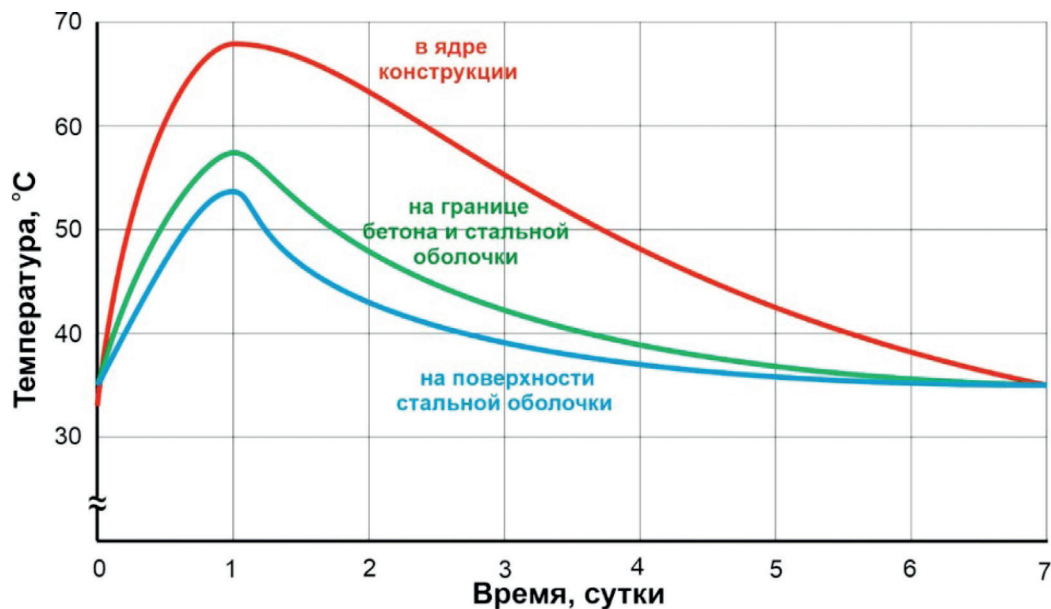


Рис. 6. Кинетика изменения расчетной температуры по сечению сталежелезобетонной арки AP4
Fig. 6. Kinetics of the calculated temperature change along the section of the AR4 steel-reinforced concrete arch

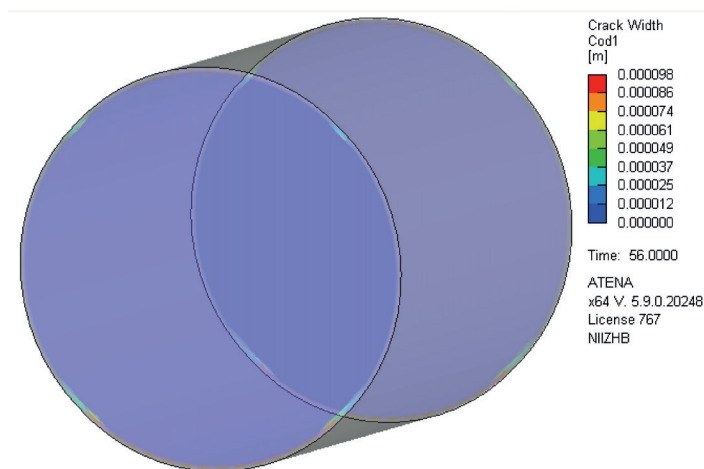


Рис. 7. Изополя участков потенциально возможного образования трещин и ширины их раскрытия в возрасте от 3 до 7 суток после бетонирования
Fig. 7. Isofields of areas of potentially possible crack formation and the width of their opening at the age of 3 to 7 days after concreting

ственных условиях бетон и стальная оболочка при температуре окружающего воздуха 28–33 °С имеют одинаковые деформации, образование трещин в бетоне отсутствует, что обеспечивает термическую трещиностойкость конструкции.

Результаты

Входной контроль качества бетонной смеси

Бетонная смесь производилась и поставлялась заводом ООО «Эркон». Номинальный состав бетонной смеси:

– портландцемент ЦЕМ I 52,5 Н по ГОСТ Р 31108-2020 [27] – 470 кг/м³;

– органо-минеральный модификатор МБ2-30СА-I-4 по ГОСТ Р 56178-2014 [28] – 110 кг/м³;

– песок с $M_k = 2,4$ по ГОСТ 8736-2014 [29] – 810 кг/м³;

– щебень гранитный фр. 5–10 мм по ГОСТ 8267-93 [30] – 870 кг/м³;

– суперпластификатор Sika ViscoCrete E-55 40 %, раствор плотностью 1,083 г/см³ по ГОСТ 24211-2008 [31] – 6,96 кг/м³;

– замедлитель Sika Retarder-12RU, раствор плотностью 1,15 г/см³ по ГОСТ 24211-2008 [31] – 3,8 кг/м³;

– вода по ГОСТ 23732-2011 [32] – 157 кг/м³.

Входной контроль показал, что технологические характеристики самоуплотняющейся бетонной смеси

в целом соответствовали регламентированным требованиям (расплыв нормального конуса – 65–75 см, средняя плотность – 2390–2440 кг/м³, расслоение отсутствовало). Фактический состав бетонных смесей, доставленных на строительную площадку, с учетом допустимых отклонений по [12], соответствовал номинальному. Это свидетельствует о том, что самоуплотняющиеся бетонные смеси, уложенные в конструкции арок по технологическим критериям, соответствовали марке БСТ В70 ($R_t \geq 87,5$ МПа) РК2 (РК = (70 ± 5) см) F_{1,200} W6 по ГОСТ Р 59714-2021 [12].

Укладка бетонной смеси в конструкции

Бетонирование арок осуществлялось ООО «МОСТ» в течение 4–6 часов (в зависимости от объема бетона) со скоростью около 50 м³/час.

Укладка самоуплотняющейся бетонной смеси в конструкцию каждой из арок осуществлялась равными объемами в два этапа. На первом этапе бетонная смесь подавалась в нижние опорные части арок на высоту 8–9 м под давлением методом «снизу вверх» через специальные адаптеры, приваренные в оболочку конструкции (рис. 4 и 8). На втором этапе бетонная смесь подавалась в центральную часть арок методом «сверху вниз» поочередно через доступные окна в опорах в верхней части оболочки конструкции и заполняло пространство под действием силы тяжести (рис. 4 и 9).



Рис. 8. Специальный адаптер, приваренный к оболочке конструкции для напорного бетонирования опорных частей арок методом «снизу вверх»

Fig. 8. A special adapter welded to the shell of the structure for pressure concreting of the supporting parts of the arches using the bottom-up method



Рис. 9. Процесс бетонирования центральной части сталежелезобетонной конструкции арки методом «сверху вниз»

Fig. 9. The process of concreting of the central part of the steel-reinforced concrete arch structure using the top-down method

Выдерживание бетона в конструкциях

В течение 1–1,5 суток на стадии повышения температуры стальная оболочка конструкции арок не утеплялась. На стадии охлаждения конструкции в связи с высокой температурой окружающего воздуха (от 21 до 33 °С), скорость охлаждения бетона в ядре конструкций составляла не более 5 °С в сутки, поэтому специальных мероприятий по регулированию скорости остывания бетона, т. е. утепления арок, не производилось.

Кинетика изменения температуры в сечении с максимальным значением температуры (68 °С) в ядре конструкции арки АР4 (точка 11, рис. 4) в возрасте до 7 суток после бетонирования представлена на рис. 10.

Из приведенных данных видно, что фактические значения температурных параметров выдерживания бетона арок соответствуют регламентированным значениям, основанным на расчете термонапряженного состояния конструкции (рис. 6 и 10), в том числе:

- максимальная температура бетона в ядре конструкции составила 57–68 °С;
- средняя скорость остывания конструкции не превышала 5 °С/сут;
- перепад температуры по длине конструкции составлял 0,6–0,8 °С/м;
- разность температуры между ядром и поверхностью стальной оболочки не превышала 18 °С;

– разность температуры между поверхностью оболочки и окружающим воздухом не превышала 20 °С.

Заметим, что в целом температурные параметры выдерживания конструкции сопоставимы с параметрами выдерживания фундаментных плит [9, 10], что свидетельствует об обоснованности выбранного подхода к бетонированию массивных конструкций.

Контроль качества бетона

Прочность бетона определялась по результатам испытания серий контрольных образцов-кубов размерами 100 × 100 × 100 мм, которые твердели в воде на строительной площадке, в возрасте 7, 28 и 56 суток, в том числе:

- в возрасте 7 суток – для арки АР3 по испытаниям 7-ми серий (14 образцов), а для арки АР4 по испытаниям 9-ти серий (18 образцов);
- в возрасте 28 суток – для арки АР3 по испытаниям 11-ти серий (22 образца), а для арки АР4 по испытаниям 16-ти серий (32 образца);
- в возрасте 56 суток (из каждого автобетоносмесителя) – для арки АР3 по испытаниям 21-й серии (42 образца), а для арки АР4 по испытаниям 31-й серии (62 образца).

Обобщенные результаты определения прочности и оценки фактического класса бетона в сталежелезобетонных конструкциях арок АР3 и АР4 приведены в табл. 1.

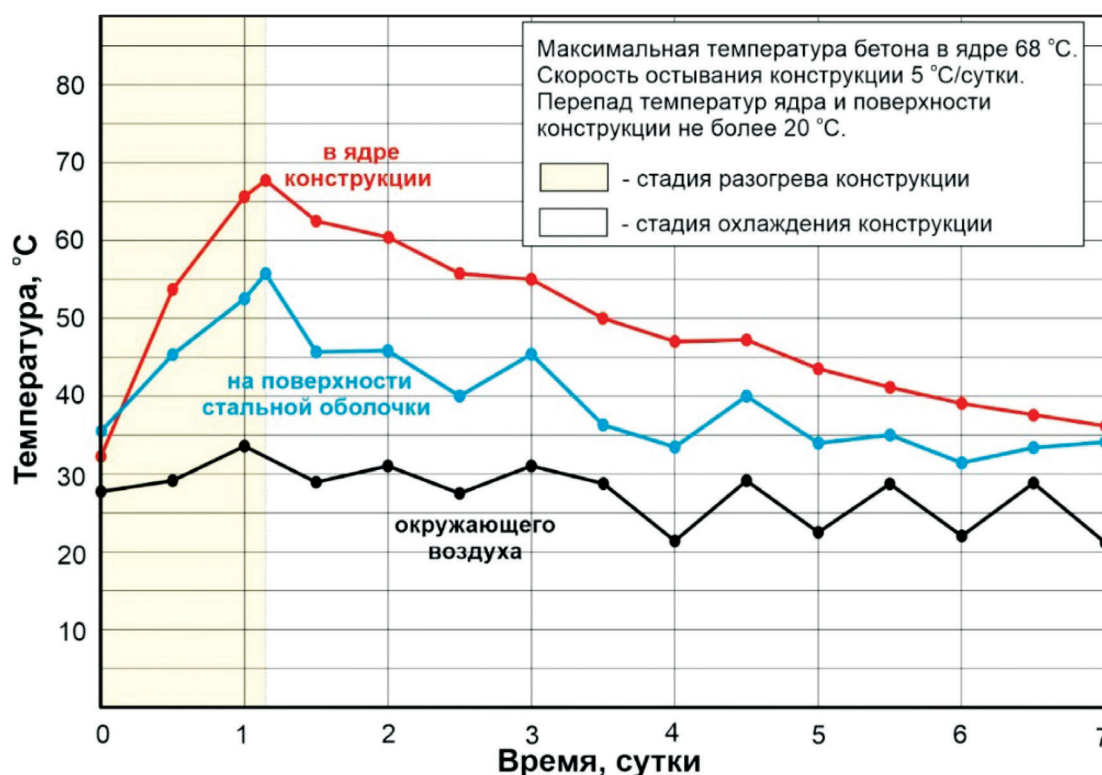


Рис. 10. Кинетика изменения температуры бетона в сечении сталежелезобетонной конструкции арки АР4 (точка 11, рис. 4)
Fig. 10. Kinetics of concrete temperature changes in the section of the steel-reinforced concrete structure of the АР4 arch (point 11, Fig. 4)

Таблица 1

Table 1

Прочность и фактический класс бетона в сталежелезобетонных конструкциях арок AP3 и AP4 по результатам испытаний контрольных образцов

Strength and actual class of concrete in steel-reinforced concrete structures of AR3 and AR4 arches according to the test of control samples results

Номер серии	Прочность бетона в серии контрольных образцов в возрасте ..., суток			Статистическая оценка прочности бетона в конструкции в возрасте 56 суток			
	7	28	56	R_m , МПа	S_m , МПа	V , %	B_{ϕ} , МПа
Арка АР3							
1	85,3	94,9	101,7	108,1	4,44	4,1	B_{ϕ} 94
2	—	—	99,9				
3	—	102,6	110,0				
4	—	—	105,8				
5	80,6	93,5	103,3				
6	—	—	103,1				
7	—	97,8	104,1				
8	—	—	107,0				
9	—	101,8	105,6				
10	—	—	104,2				
11	92,9	108,4	112,0				
12	—	—	110,5				
13	99,3	107,3	113,2				
14	—	—	114,9				
15	—	—	113,8				
16	90,3	100,9	106,0				
17	—	—	110,9				
18	—	105,8	111,5				
19	—	—	113,5				
20	89,4	99,4	106,9				
21	91,0	103,9	111,2				
Арка АР4							
1	97,5	103,3	109,6	111,3	4,8	4,3	B_{ϕ} 97
2	—	—	123,8				
3	—	111,0	118,4				
4	—	—	109,8				
5	94,7	108,4	115,6				
6	—	—	110,8				
7	85,9	102,4	110,0				
8	—	—	113,5				
9	—	109,0	113,6				

Продолжение таблицы 1

Номер серии	Прочность бетона в серии контрольных образцов в возрасте ..., суток			Статистическая оценка прочности бетона в конструкции в возрасте 56 суток			
	7	28	56	R_m , МПа	S_m , МПа	V , %	B_{ϕ} , МПа
10	–	–	105,3	111,3	4,8	4,3	$B_{\phi 97}$
11	94,0	101,8	107,6				
12	–	–	108,8				
13	–	107,2	112,2				
14	–	–	112,4				
15	94,7	101,6	109,1				
16	–	–	102,7				
17	–	105,4	110,7				
18	87,4	104,6	110,5				
19	–	–	106,5				
20	–	108,9	116,0				
21	–	–	115,6				
22	91,8	111,0	120,0				
23	–	–	112,5				
24	–	107,2	111,7				
25	–	–	110,2				
26	–	–	109,1				
27	91,2	100,0	106,1				
28	–	–	107,8				
29	–	95,6	101,1				
30	96,0	103,8	111,6				
31	–	–	116,2				

Примечания:

Номер серии контрольных образцов соответствует порядковому номеру автобетоносмесителей, доставлявших смесь на строительную площадку;

R_m – средняя прочность бетона;

S_m – среднеквадратическое отклонение прочности бетона;

V – фактический коэффициент вариации прочности бетона;

K_T – коэффициент требуемой прочности, принят 1,14 в соответствии с п. 6.1.1.12 [15];

B_{ϕ} – фактический класс бетона по прочности на сжатие.

Прочность бетона на сжатие в конструкции арки АР3 находится в диапазоне: в промежуточном возрасте 7 суток – от 80,6 до 99,3 МПа; в промежуточном возрасте 28 суток – от 93,5 до 108,4 МПа; в проектном возрасте 56 суток – от 99,9 до 114,9 МПа. Средняя прочность бетона на сжатие в конструкции арки АР3 в проектном возрасте 56 суток составляет 108,1 МПа, что при фактическом коэффициенте вариации $V = 4,1 \%$ ($K_T = 1,14$) соответствует фактическому классу по прочности на сжатие $B_{\phi 94}$.

Прочность бетона на сжатие в конструкции арки АР4 находится в диапазоне: в промежуточном возрасте 7 суток – от 85,9 до 97,5 МПа; в промежуточном возрасте 28 суток – от 95,6 до 111,0 МПа; в проектном возрасте 56 суток – от 101,1 до 123,8 МПа. Средняя прочность бетона на сжатие в конструкции арки АР4 в проектном возрасте 56 суток составляет 111,3 МПа, что при фактическом коэффициенте вариации $V = 4,3 \%$ ($K_T = 1,14$) соответствует фактическому классу по прочности на сжатие $B_{\phi 97}$.

Выводы

1. Спроектирована конструкция и реализована на практике технология непрерывного бетонирования двух массивных сталежелезобетонных арок (высотой 19 м, пролетом 47 и 81 м) объемом 184 и 283 м³ в несъемной опалубке, функцию которой выполняла стальная оболочка диаметром 2 и 2,5 м, с проектным классом бетона В70. Нестандартное конструктивное решение наклоненных друг к другу двух арок с элементами связи под различными углами подчинено архитектурной концепции всего объекта Технопарка, выполненного архитектурной и дизайнерской фирмой Zaha Hadid Architects. Технология производства бетонных работ обеспечила заданные проектом характеристики бетона и термическую трещиностойкость конструкции.

2. Расчет термонапряженного состояния сталежелезобетонных конструкций арок по программе Atena с учетом солнечного излучения, фактических изменений скорости гидратации и тепловыделения при экзотермическом процессе разогрева бетона по сечению конструкции позволил спрогнозировать основные параметры ухода за конструкциями, которые использовались при разработке технологии производства работ.

3. Особенности технологии возведения и контроля качества бетона сталежелезобетонных арок, относящихся к категории массивных конструкций, являлись:

- использование самоуплотняющихся бетонных смесей с добавками органоминерального модификатора марки МБ 2-30С, суперпластификатора и замедлителя твердения;

- обеспечение беспрепятственного теплообмена конструкций с окружающей средой при температуре воздуха 28–33 °С;

- осуществление контроля прочности бетона в конструкции арок с внешней стальной оболочкой по контрольным образцам, изготовленным из проб смеси, отобранных при бетонировании конструкций.

4. Фактические значения прочности бетона и температурных параметров выдерживания сталежелезобетонных конструкций арок полностью соответствуют проектным требованиям и значениям, определенным расчетом термонапряженного состояния конструкций, в том числе:

- прочность бетона на сжатие в конструкциях в проектном возрасте составляет 108,1 и 111,3 МПа, соответствует фактическим классам по прочности на сжатие В_ф 94 и В_ф 97 и превышает требования проекта;

- максимальная температура бетона в ядре конструкций составила 57–68 °С;

- средняя скорость остывания конструкций не превышала 5 °С/сут;

- перепад температуры по длине конструкций составил 0,6–0,8 °С/м;

- разность температуры между ядром и поверхностью стальной оболочки, а также поверхностью оболочки и окружающей средой не превышала 20 °С.

5. Предложенные подходы, учитывающие особенности расчета, конструирования, технологии возведения и контроля качества бетона конструкций арок Технопарка ПАО «Сбербанк» в инновационном центре «Сколково», могут использоваться при строительстве технически сложных сталежелезобетонных конструкций в несъемной опалубке.

Список литературы

1. Кикин А.И., Санжаровский Р.С., Трулль В.А. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном. Москва: Стройиздат, 1974. 144 с.
2. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С. О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 2. Расчет трубобетонных конструкций с металлической оболочкой // *Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ»*. 2015. Т. 7. № 4. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/112TVN415.pdf> (доступ свободный).
3. Дуванова И.А., Сальманов И.Д. Трубобетонные колонны в строительстве высотных зданий и сооружений // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2014. № 6 (21). С. 89–103.
4. Ерофеев В.И., Хазов П.А., Ситникова А.К. Прочность и устойчивость композитных железобетонных и трубобетонных образцов при статическом нагружении // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2023. Т. 25. № 2. С. 141–153. DOI: <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2023-25-2-141-153>
5. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В. Новые бетоны и технологии в конструкциях высотных зданий // *Высотные здания*. 2007. № 5. С. 94–101.
6. Каприелов С.С., Травуш В.И., Карпенко Н.И., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В. Модифицированные высокопрочные бетоны классов В80 и В90 в монолитных конструкциях. ЧАСТЬ II // *Строительные материалы*. 2008. № 3. С. 9–13.
7. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Аль-Омаис Д., Зайцев А.С. Высокопрочные бетоны в конструкциях фундаментов высотного комплекса «ОКО» в ММДЦ «Москва-Сити» // *Промышленное и гражданское строительство*. 2017. № 3. С. 53–57.
8. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Аль-Омаис Д., Зайцев А.С. Опыт производства и контроля качества высокопрочных бетонов на строительстве высотного комплекса «ОКО» в ММДЦ «Москва-Сити» // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 1. С. 18–24.
9. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Иванов С.И. Опыт бетонирования массивной густоармированной конструкции с обеспечением термической тре-

- щиностойкости // *Строительные материалы*. 2023. № 10. С. 15–24. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-15-24>
10. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Иванов С.И. Обеспечение термической трещиностойкости массивной конструкции переходной плиты перекрытия // *Промышленное и гражданское строительство*. 2023. № 12. С. 23–30. DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.12.23-30>
 11. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Чилин И.А. Оптимизация параметров технологии бетона для обеспечения термической трещиностойкости массивных фундаментов // *Строительные материалы*. 2022. № 10. С. 41–51. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-807-10-41-51>
 12. ГОСТ Р 59714-2021. Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия. Москва: Российский институт стандартизации, 2021.
 13. ГОСТ Р 59715-2022. Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Методы испытаний. Москва: Российский институт стандартизации, 2022.
 14. ГОСТ 18105-2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. Москва: Стандартинформ, 2019.
 15. ГОСТ 31914-2012. Бетоны высокопрочные тяжелые и мелкозернистые для монолитных конструкций. Правила контроля и оценки качества. Москва: Стандартинформ, 2014.
 16. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Москва: Стандартинформ, 2013.
 17. 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. DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2022.04.06-13>
 18. Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях. Москва: РААСН, НИИЖБ, 2005.
 19. Červenka V., Jendele L., Červenka J. ATENA Program Documentation. Part 1. Theory. Part 3–2 Example Manual. Prague; 2021.
 20. Шифрин С.А., Кардунян Г.С. Использование органоминеральных модификаторов серии МБ для снижения температурных напряжений в бетонируемых массивных конструкциях // *Строительные материалы*. 2007. № 3. С. 88–93.
 21. 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-of-the-Art Reports*. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76617-1>
 22. Sargam Y., Faytarouni M., Riding K., Wang K., Jähren C., Shen J. Predicting thermal performance of a mass concrete foundation – A field monitoring case study. *Case Studies in Construction Materials*. 2019, vol. 11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00289>
 23. Ушеров-Маршак А.В. Калориметрия цемента и бетона. Харьков, 2002. 180 с. ISBN 966-637-066-2.
 24. Bisch Philippe. Behavior and Assessment of Massive Structures: Cracking and Shrinkage. Crack Width Calculation Methods for Large Concrete Structures. Nordic Miniseminar. Oslo, Norway. 29–30 August 2017. *Workshop Proceedings*. 2017, no. 12, pp. 11–15.
 25. ACI 207.1R-05. Guide to Mass Concrete. Report of ACI Committee 207.
 26. Hirozo Mihashi, Joao Paulo de B. Leite. State-of-the-Art Report on Controlling of Cracking in Early Age Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2004, vol. 2, no. 2, pp. 141–154. DOI: <https://doi.org/10.3151/jact.2.141>
 27. ГОСТ Р 31108-2020. Цементы общестроительные. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2020.
 28. ГОСТ Р 56178-2014. Модификаторы органо-минеральные типа МБ для бетонов, строительных растворов и сухих смесей. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2015.
 29. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2019.
 30. ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2018.
 31. ГОСТ 24211-2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ, 2010.
 32. ГОСТ 23732-2011. Вода для бетонов и растворов. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2012.

References

1. Kikin A.I., Sanzharovsky R.S., Trull V.A. Structures made of steel pipes filled with concrete. Moscow: Stroyizdat Publ., 1974, 144 p. (In Russian).
2. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikhaldykin E.S. About the problem of the analysis of tube-confined concrete structures with a shell made of different materials. Part 2. Calculation of tube-confined concrete structures with a metallic shell. *“SCIENCE STUDIES” Online journal*. 2015, vol. 7, no. 4. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/112TVN415.pdf> (access is free). (In Russian).
3. Duvanov I.A., Salmanov I.D. Tubular concrete columns in the construction of high-rise buildings and structures. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014, no. 6 (21), pp. 89–103. (In Russian).
4. Erofeev V.I., Khazov P.A., Sitnikova A.K. Strength and stability of composite concrete and pipe-concrete structures under static load. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta = Journal of Construction and Architecture*. 2023,

- vol. 25, no. 2, pp. 141–153. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2023-25-2-141-153>
5. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S., Kiselyova Yu.A., Prigozhenko O.V. New concretes and technologies in structures of tall buildings. *Vysotnye Zdaniya = Tall Buildings*. 2007, no. 5, pp. 94–101. (In Russian).
6. Kaprielov S.S., Travush V.I., Karpenko N.I., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S., Kiseleva Yu.A., Prigozhenko O.V. Modified high-strength concretes of B80 and B90 classes in monolithic structures. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*. 2008, no. 3, pp. 9–13. (In Russian).
7. Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Al-Omais D., Zaitsev A.S. High-strength concretes in constructions of foundations of the high-rise complex «OKO» in MIBC «Moscow-City». *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*. 2017, no. 3, pp. 53–57. (In Russian).
8. Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Al-Omais D., Zaitsev A.S. Experience in production and quality control of high-strength concrete used in construction of high-rise complex «OKO» in MIBC «Moscow-City». *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*. 2018, no. 1, pp. 18–24. (In Russian).
9. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Ivanov S.I. The experience of concreting a massive dense-reinforced structure with the provision of thermal crack resistance. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*. 2023, no. 10, pp. 15–24. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-818-10-15-24>
10. Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Ivanov S.I. Ensuring thermal crack resistance of the massive structure of the transition floor slab. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*. 2023, no. 12, pp. 23–30. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.12.23-30>
11. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Chilin I.A. Optimization of concrete technology parameters to ensure thermal crack resistance of massive foundations. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*. 2022, no. 10, pp. 41–51. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-807-10-41-51>
12. State Standard R 59714-2021. Self-compacting concrete mixtures. Specifications. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2021. (In Russian).
13. State Standard R 59715-2022. Self-compacting fresh concrete. Methods of testing. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2022. (In Russian).
14. State Standard 18105-2018. Concretes. Rules for control and assessment of strength. Moscow: Standardinform Publ., 2019. (In Russian).
15. State Standard 31914-2012. High-strength heavy-weight and fine-grane concretes for situ-casting structures. Rules for control and quality assessment. Moscow: Standardinform Publ., 2014. (In Russian).
16. State Standard 10180-2012. Concretes. Methods for strength determination using reference specimens. Moscow: Standardinform Publ., 2013. (In Russian).
17. 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). DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2022.04.06-13>
18. Guidelines for concrete heating in monolithic structures. Moscow: RAASN, NIIZHB, 2005. (In Russian).
19. Červenka V., Jendele L., Červenka J. ATENA Program Documentation. Part 1. Theory. Part 3–2 Example Manual. Prague; 2021.
20. Shifrin S.A., Kardumyan G.S. The use of organomineral modifiers of the MB series to reduce temperature stresses in concreted massive structures. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*. 2007, no. 9, pp. 9–11. (In Russian).
21. 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-of-the-Art Reports*, 2019. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-76617-1>
22. Sargam Y., Faytarouni M., Riding K., Wang K., Jähren C., Shen J. Predicting thermal performance of a mass concrete foundation – A field monitoring case study. *Case Studies in Construction Materials*. 2019, vol. 11, DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00289>
23. Usharov-Marshak A.V. Cementometry of cement and concrete. Kharkiv, 2002, 180 p. ISBN 966-637-066-2.
24. Bisch Philippe. Behavior and Assessment of Massive Structures: Cracking and Shrinkage. Crack Width Calculation Methods for Large Concrete Structures. Nordic Miniseminar. Oslo, Norway. 29–30 August 2017. *Workshop Proceedings*. 2017, no. 12, pp. 11–15.
25. ACI 207.1R-05. Guide to Mass Concrete. Report of ACI Committee 207.
26. Hirozo Mihashi, Joao Paulo de B. Leite. State-of-the-Art Report on Controlling of Cracking in Early Age Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2004, vol. 2, no. 2, pp. 141–154. DOI: <https://doi.org/10.3151/jact.2.141>
27. State Standard R 31108-2020. Common cements. Specifications. Moscow: Standardinform Publ., 2020. (In Russian).
28. State Standard R 56178-2014. Modifiers of organic-mineral origin of MB type for concretes, mortars and dry mixes. Specifications. Moscow: Standardinform Publ., 2015. (In Russian).
29. State Standard 8736-2014. Sand for construction works. Specifications. Moscow: Standardinform Publ., 2019. (In Russian).
30. State Standard 8267-93. Crushed stone and gravel of solid rocks for construction works. Specifications. Moscow: Standardinform Publ., 2018. (In Russian).

31. State Standard 24211-2008. Admixtures for concretes and mortars. General specifications. Moscow: Standardinform Publ., 2010. (In Russian).
32. State Standard 23732-2011. Water for concrete and mortars. Specifications. Moscow: Standardinform Publ., 2012. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Семен Суренович Каприелов, д-р техн. наук, заведующий лабораторией химических добавок и модифицированных бетонов (№ 16), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»; профессор кафедры строительного материаловедения, НИУ МГСУ, Москва

Semyon S. Kaprielov, Dr. Sci. (Engineering), Head of Laboratory for Chemical Admixtures and Modified Concrete (No. 16), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction; Professor of the Department of Construction Materials Science, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow

Андрей Владимирович Шейнфельд✉, д-р техн. наук, заместитель заведующего лабораторией химических добавок и модифицированных бетонов (№ 16), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»; профессор кафедры строительного материаловедения, НИУ МГСУ, Москва
e-mail: sheynfeld@masterbeton-mb.ru

Andrey V. Sheynfeld✉, Dr. Sci. (Engineering), Deputy Head of Laboratory for Chemical Admixtures and Modified Concrete (No. 16), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction; Professor of the Department of Construction Materials Science, Moscow

State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow
e-mail: sheynfeld@masterbeton-mb.ru

Сергей Ильич Иванов, канд. техн. наук, заведующий лабораторией напрягающих бетонов и самонапряженных конструкций (№ 7), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Sergey I. Ivanov, Cand. Sci. (Engineering), Head of Laboratory for Straining Concretes and Self-stressed Structures (No. 7), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

Андрей Николаевич Иващенко, инженер, генеральный директор, ООО «Инфорспроект», Москва

Andrey N. Ivaschenko, Engineer, General Director, LLC "Inforsproekt", Moscow

Павел Михайлович Леонтьев, ведущий инженер, ООО «Предприятие Мастер Бетон», Москва

Pavel M. Leontiev, Leading Engineer, LLC "Master Concrete Enterprise", Moscow

Александр Игоревич Пастухов, инженер лаборатории напрягающих бетонов и самонапряженных конструкций (№ 7), НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Alexander I. Pastukhov, Engineer of Laboratory of Straining Concretes and Self-stressed Structures (No. 7), Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author