

УДК 693.557
DOI:

УЧЁТ СОБСТВЕННОГО ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТВЕРДЕЮЩЕГО БЕТОНА ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ТРЕБУЕМЫХ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИЙ КРЫМСКОГО МОСТА

И.С. Пуляев, С.М. Пуляев
НИУ МГСУ,
г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В представленной статье рассматриваются вопросы, связанные с определением и учётом собственного термонапряженного состояния, образующегося в бетоне при твердении и используемого для обеспечения требуемых потребительских свойств бетона при строительстве Крымского моста. Данный вопрос представляется актуальным ввиду сжатых сроков строительства указанного объекта в условиях пересеченной местности и жаркого климата, а также с учетом развития в нашей стране строительства уникальных внеклассовых объектов.

Материалы и методы. Работа проводилась в условиях реального времени с применением на практике современных измерительных систем, позволяющих контролировать процесс изменения температуры и прочности твердеющего бетона во времени. В процессе обработки полученных данных применялся современный расчетно-аналитический комплекс, многократно апробированный в реальных условиях при проведении теплофизических расчетов твердеющего бетона объектов различной классовости и массивности.

Результаты. Представлены результаты учета собственного термонапряженного состояния твердеющего бетона при определении допустимого градиента температур в нем, позволившие ускорить процесс возведения объекта с соблюдением необходимых потребительских свойств.

Обсуждение и заключение. На основании проведенных теплофизических расчетов твердеющего бетона и внедрения полученных результатов на практике с учетом опыта взведения аналогичных объектов в Российской Федерации сделаны основные выводы и даны предложения по учету собственного термонапряженного состояния в бетоне при его твердении при возведении Крымского моста, на основании которых, в том числе, были составлены технологические регламенты на производство работ в условиях круглогодичного строительства. Статья будет интересна и полезна инженерно-техническим работникам, занятым в условиях реального производства, и специалистам, занимающимся вопросами теплофизических процессов, происходящих в твердеющем бетоне, и проблемами обеспечения высоких потребительских свойств бетона в конструкциях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бетон, цемент, экзотермия, тепловыделение, мост, расчет, термонапряженное состояние, температура, прочность.

© И.С. Пуляев, С.М. Пуляев



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ACCOUNTING OF THE OWN THERMO-STRESSED STATE OF THE SOLID CONCRETE WHILE PROVIDING THE REQUIRED CONSUMER PROPERTIES OF THE CRIMEAN BRIDGE CONSTRUCTIONS

I.S. Pulyaev, S.M. Pulyaev

National Research State University of Civil Engineering
Moscow, Russia,

ABSTRACT

Introduction. The paper deals with the issues related to the determination and registration of the own thermo-stressed state formed in concrete while hardening and used to provide the required consumer properties in the Crimean bridge construction. Therefore, the problem is relevant because of the deadlines for the construction of such facility in the conditions of rough terrain and dry hot climate, and also taking into account the development of the unique non-class facilities in Russia.

Materials and methods. The research is carried out in real-time conditions with the usage of modern measuring systems in practice, allowing to control the process of temperature and strength of hardening concrete in time. The modern computational and analytical complex, which is repeatedly tested under real conditions and by thermophysical calculations of hardening concrete of various class objects and massiveness, is used.

Results. The results of the intrinsic thermo-stressed state of hardening concrete are presented in determining the permissible temperature gradient, which make it possible to accelerate the process of erecting the object with observance of the necessary consumer properties.

Discussion and conclusion. The main conclusions and suggestions are made taking into account the intrinsic thermally stressed state of the concrete when it was hardened during the construction of the Crimean bridge. The paper would be interesting and useful for engineers and technical workers engaged in real production conditions, and for specialists dealing with the issues of the thermophysical processes occurring in concrete hardening and with the problems of ensuring the high consumer concrete properties in structures.

KEYWORDS: concrete, cement, exothermic, heat release, bridge, calculation, thermo-stressed state, temperature, strength.

© I.S. Pulyaev, S.M. Pulyaev



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Крымский мост – один из самых масштабных проектов, реализуемых в настоящее время в нашей стране. Его строительство началось в 2015 г., а в мае 2018 г. был дан старт движению по автодорожной части моста протяженностью около девятнадцати километров. При этом пуск движения по данной части объекта был осуществлен ранее намеченного срока более чем на полгода, а в настоящее время продолжается интенсивное строительство железнодорожной части моста, срок сдачи которого назначен на конец 2019 г. Известно, что расположение объекта в солёной морской воде, жаркий климат, повышенная сейсмическая опасность, наличие ледовых нагрузок в зимний период времени, массивность сооружения, большая глубина пролива и другие технологические, техногенные и эксплуатационные факторы потребовали серьёзного подхода к обеспечению качества бетонных работ и увеличению долговечности сооружения. Особо важным условием видится выполнение указанных требований по обеспечению высоких потребительских свойств (прочности, морозостойкости, водонепроницаемости) в условиях ускоренных темпов строительства объекта, что оправдано большим социально-экономическим значением моста. С этой целью в процессе разработки технической документации, в том числе проекта производства работ, потребовалось предусмотреть мероприятия, направленные на снижение трещиностойкости конструкции при заданном темпе ведения бетонных работ. На практике широко известно, что одним из важнейших свойств цемента, влияющих на качество выполнения бетонных работ, сроки строительства объекта и долговечность конструкции, является его тепловыделение, которое необходимо учитывать при проведении всего комплекса работ [1,2,3,4]. В настоящее время в действующих нормативной и проектной документациях на строительство как объектов транспортной инфраструктуры, так и других объектов промышленного назначения не находят достаточного отражения вопросы грамотного учёта температурного фактора в процессе формирования требуемых свойств бетона и, соответственно, качественных характеристик возводимых конструкций и в первую очередь их долговечность и надёжность [5,6,7,8]. По опыту строительства многих искусственных сооружений известно [9], что вследствие недоучёта температурного фактора при проектировании объектов и разработке

проектной документации в бетоне могут появляться многочисленные дефекты и трещины, на устранение которых расходуются значительные средства и требуется много времени. Тот же опыт показывает, что при этом следует учитывать температурные микронапряжения в материале (бетоне) и макронапряжения в самой конструкции, как основу мероприятий по предупреждению появления трещин в бетоне вследствие изменения температур в нем. Данные принципы были положены в основу решений по обеспечению высоких потребительских свойств бетона рассматриваемого объекта, основные из которых представлены на рассмотрение в данной статье.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

К железобетонным транспортным сооружениям традиционно предъявляются повышенные требования по обеспечению его основных технологических свойств бетона: прочности, морозостойкости, водонепроницаемости, долговечности, коррозионной стойкости и трещиностойкости. С целью гарантированного соблюдения указанных требований необходимо неукоснительно контролировать качественные характеристики и свойства бетонной смеси, процесс ее укладки в опалубку и обеспечение требуемого ухода за твердеющим бетоном в процессе набора им прочности, который является одним из основных технологических переделов всего цикла бетонирования. И если контроль первых двух критериев в настоящее время отлажен достаточно хорошо [10,11], то, как показывает практика, в условиях строительства объекта требуемый уход за бетоном в процессе его твердения в летний период времени чаще всего заключается только лишь в поддержании допустимого нормативными документами температурного режима и контроле требуемого градиента температур в процессе набора бетоном прочности, а также в процессе снятия опалубочной системы. В зимнее время кроме указанных выше процессов дополнительно обеспечивается поддержание положительной температуры окружающей среды твердеющего бетона и контроль требуемого градиента температур в нем величиной не более 20°C.

Однако практический опыт показывает ошибочность данной постановки вопроса [12] ввиду того, что в процессе ухода за твердеющим бетоном недостаточно принимать во внимание только те факторы, которые вызваны изменением его термонапряженного состояния, зависят от перепада наружных температур и

особенностей процессов раннего структурообразования и которые связаны с варьированием температуры непосредственно в теле твердеющего бетона, а следует в первую очередь принимать во внимание различные виды температурных напряжений, формирующихся в процессе твердения бетона: микронапряжения, макронапряжения, а также собственное термонапряженное состояние. Рассмотрим данные виды напряжений подробнее.

Под температурными микронапряжениями понимаются напряжения, возникающие в твердеющем бетоне вследствие:

- разности коэффициентов линейного температурного расширения и модулей упругости крупного заполнителя и твердеющего цементного раствора. Данные напряжения называются микронапряжениями 1-го рода;

- разности коэффициентов линейного температурного расширения и модулей упругости мелкого заполнителя и цементного камня. Данные напряжения называются микронапряжениями 2-го рода;

- разности коэффициентов линейного температурного расширения и модулей упругости отдельных кристаллов цементного камня. Данные напряжения называются микронапряжениями 3-го рода.

Указанные напряжения существенно влияют на величину допустимой растяжимости бетона, зависящей от значения температуры, при которой образуется пространственная кристаллизационная структура $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ в твердеющем цементном камне в момент набора бетоном прочности 25...30% от прочности в возрасте 28 сут (R_{28}).

Практика показывает, что чем выше температура, при которой затвердевает бетонная смесь, тем больше величина микронапряжений в ней при изменении градиента температур наружного воздуха, вследствие чего очевидно, что твердение бетона при низких положительных температурах оказывает наиболее благоприятное влияние на обеспечение его высоких потребительских свойств [13]. Оценка влияния изменения температурного режима на процесс растяжимости бетона должна учитывать то значение температуры, которое образуется в бетонной конструкции в момент набора им прочности 25...30% от прочности в возрасте 28 сут (данный фактор был учтен, в частности, при расчетах бетонных конструкций Керченского моста, однако он до сих пор не нашел должного отражения в существующей технической и нормативной документации).

Под температурными макронапряжениями понимаются напряжения, возникающие в твердеющем бетоне конструкции при непосредственном изменении градиента температур в ней во времени.

Стоит отметить, что в бетонных конструкциях наряду с описанными выше температурными напряжениями очень часто может присутствовать также еще один тип температурных напряжений – остаточные (собственные) напряжения. Эти напряжения представляют собой макронапряжения, имеющиеся в бетонной смеси конструкции в процессе ее твердения в момент равномерного распределения температур по всему объему или наибольшему сечению конструкции, имеющему значительные размеры в определенном направлении (например, колонна тоннеля, пилон моста и проч.). Практика показывает [14], что указанные напряжения могут повышать или понижать трещиностойкость всей возводимой конструкции, из чего следует, что напряжения, повышающие трещиностойкость конструкции, называют благоприятными, а понижающие её – неблагоприятными.

Характер собственного термонапряженного состояния и, как следствие, величина таких напряжений в бетоне определяется по температурной кривой или по температурному полю (далее – температурная кривая) нулевых напряжений, под которыми понимают распределение температур в конструкции, при котором в ней практически отсутствуют такие напряжения. Ввиду чего следует уметь правильно определять время формирования этой кривой и грамотно использовать термонапряженное состояние в целях обеспечения необходимых потребительских свойств конструкции.

На основании исследований физико-химических процессов, протекающих при формировании цементного камня, проведенных в НИИ транспортного строительства (ныне – АО ЦНИИС) и подтвержденных уникальными экспериментами, выполненными одним из основателей теории собственного термонапряженного состояния твердеющего бетона – профессором А.Р. Соловьянчиком [15] в Мюнхенском техническом университете (Technische Universität München) – за счет применения реальных бетонных смесей, установлено, что за время формирования температурной кривой нулевых напряжений следует принимать время образования в твердеющем цементном камне пространственной кристаллизационной структуры из $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ в слое с наибольшим отставанием процесса ги-

дратации цемента, которое соответствует времени перехода бетона в упругое состояние.

Для понимания смысла озвученного ниже рассмотрены условия формирования температурной кривой нулевых напряжений в бетоне на примере монолитной конструкции железобетонного перекрытия.

Для начала рассмотрим случай, когда тонкое перекрытие в условиях жаркого климата и высоких температур воздуха разогревается с каждой из сторон в отдельности. В этом случае бетонная смесь переходит в упругий материал (бетон) сначала в наружных слоях, которые разогреваются сильнее, чем внутренние. Как следствие, при постепенном наборе температуры выдерживания бетона наружные поверхности перекрытия могут свободно «перемещаться» друг относительно друга до тех пор, пока между ними остается слой из не схватившейся бетонной смеси, которая в свою очередь не теряет полностью пластических свойств до того момента, пока в цементном камне не образуется пространственная кристаллизационная структура из $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. При взаимном присоединении двух противоположных слоев перекрытия начинает испытывать воздействие от постепенного нарастания температуры как единое целое и ее распределение в момент соединения слоев принимается за температурную кривую нулевых напряжений, а указанное время – за время формирования собственного термонапряженного состояния. В этом случае создается вогнутое температурное поле нулевых напряжений, что свидетельствует об образовании неблагоприятного собственного термонапряженного состояния, т.к. при выравнивании температур по объему перекрытия поверхностные более разогретые слои будут иметь большие температурные напряжения, чем внутренние, которые будут препятствовать свободному перемещению наружных слоев, из-за чего при постепенном планомерном выравнивании температур по массиву перекрытия поверхностные слои окажутся «растянутыми» и менее трещиностойкими, чем внутренние.

Далее рассмотрим случай внутреннего разогрева бетона (например при выдерживании перекрытия методом «термоса»). В этом случае бетонная смесь перекрытия за счет экзотермических процессов, происходящих во внутренних слоях, будет иметь больший разогрев и быстрее набирать требуемую прочность, и в

дальнейшем, при уравнивании температур по всему объему конструкции, поверхностные слои окажутся менее разогретыми, чем растянутые внутренние, которые будут «сдерживать» температурное растяжение наружных слоев и делать их более трещиностойкими. В этом случае при внутреннем разогреве перекрытия создается выпуклое температурное поле нулевых напряжений, что свидетельствует об образовании благоприятного собственного термонапряженного состояния.

Основываясь на сказанном, необходимо отметить, что учет и грамотное использование описанных выше процессов, происходящих в бетонной смеси при ее твердении, позволяет в реальных условиях при возведении массивных объектов существенно увеличить величину допустимого градиента температур в бетоне при его разогреве и остывании (до $40 \dots 50^\circ\text{C}$ против обычно принимаемых 20°C), что в целом позволяет обеспечить высокие потребительские свойства конструкции, в том числе с учетом обеспечения требуемого срока ее возведения. Вместе с тем стоит также отметить, что зачастую незнание или неграмотное использование данных процессов может содействовать появлению в бетоне внутренних температурных трещин даже при условии формирования благоприятного собственного термонапряженного состояния. Подобные случаи могут возникнуть при расчете конструкций, имеющих «защемление» в бетонное основание (например, бетонная стенка «защемлена» в лоток тоннеля или «защемлена» с двух противоположных сторон – в лоток и перекрытие тоннеля). При формировании неблагоприятного собственного термонапряженного состояния в бетоне увеличивается вероятность появления температурных трещин, уменьшается допустимая расчетная величина перепада температур в массиве бетонной конструкции вплоть до $5 \dots 10^\circ\text{C}$.

Кроме того, ранее было установлено [16], что при значении температурного перепада по сечению конструкции более 20°C её трещиностойкость может обеспечиваться путём первоначального выдерживания твердеющего бетона в опалубочной системе с номинальным термическим сопротивлением до момента формирования в нем температурного поля нулевых напряжений, с дальнейшим увеличением величины данного сопротивления до значений, обеспечивающих предупреждение

появления температурных трещин. При этом образовавшийся градиент температур в момент набора твердеющим бетоном прочности 25...30% от прочности в возрасте 28 сут благоприятно влияет на потребительские свойства конструкции.

Практика показывает [17,18,19, 20], что для точного определения условий формирования собственного термонапряженного состояния в твердеющем бетоне конструкции в обязательном порядке требуется проводить физическое моделирование теплофизических процессов твердеющего бетона конструктивных элементов данной конструкции с помощью расчетно-аналитических программных комплексов и определять допустимый перепад температур по ее сечению с учетом требований, описанных выше. В настоящей работе с этой целью авторами использован широко апробированный и проверенный на практике программно-аналитический комплекс ZA010, в котором в основу процессов теплопереноса исследуемой области заложена система уравнений балансов тепловой энергии. Вариативность программного алгоритма достигнута за счет применения метода, являющегося дальнейшим развитием теории гидравлических аналогий, разработанной ранее в НИИ транспортного строительства проф. В.С. Лукьяновым [21,22,23]. Согласно этому методу исследуемая область расчленяется на конечное число микроэлементов и в дальнейшем рассматривается их тепловое взаимодействие между собой и окружающей средой. При проведении расчетов для симметричных конструкций допускается построение расчетной схемы только для одной части симметрии, при этом теплофизический расчет программно-аналитическим комплексом проводится для всего массива конструкции за счёт задания специальной функции в комплексе. Влияние температуры на процессы, происходящие при гидратации цемента, учтено посредством гипотезы приведенного времени. Проведение расчетов предусматривает использование реальных составов бетонной смеси для соответствующих элементов конструкций, а также данных по температурам укладываемой бетонной смеси и наружного воздуха.

Стоит отметить, что достоверность результатов расчетов при использовании программно-аналитического расчетного комплекса ZA010 обеспечивается посредством правиль-

ного назначения модуля упругости бетона при условии, что упругие напряжения в нём прямо пропорциональны модулю упругости и учёта изменения пластических свойств бетона при гидратации цемента и проявления ползучести под воздействием прилагаемой нагрузки. А исходя из того что трещины в бетоне образуются в ранний период его твердения и на их появление оказывает влияние величина и характер изменения предельно допустимых относительных деформаций бетона в раннем возрасте, а также влияние ползучести на релаксацию температурных напряжений – модуль упругости должен определяться в этом же возрасте.

Все перечисленные параметры были в полном объеме учтены при строительстве железобетонных конструктивных элементов Крымского моста, а полученные при этом результаты представлены ниже.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

При проведении теплофизических расчетов твердеющего бетона рассматривались следующие конструктивные элементы опор Крымского моста: ростверки, тела, стойки, ригели, а также монолитное железобетонное пролетное строение с материальным составом бетонной смеси, обеспечивающим приобретение бетоном установленных проектом показателей качества, по прочности соответствующих классу В35, по водонепроницаемости – марке не ниже W12, по морозостойкости – марке не ниже F₂300 («в солях»). Подвижность бетонной смеси должна характеризоваться осадкой конуса 16–20 см (марка по подвижности – П4).

С учётом конструктивных особенностей указанных элементов теплофизические расчеты твердеющего бетона проводились для всех конструктивов в поперечном сечении, а для особо массивных или вытянутых в определенном направлении (стойки, тела) – дополнительно в продольном сечении. При проведении расчетов было принято, что расход цемента М500 ОАО «Новоросцемент» составляет 480 кг/м³ – для бетона класса В35 на гранитном щебне.

Рассмотрим массивный ростверк опор Крымского моста размером 19500×10200×4000 мм, схема которого показана на рисунке 1, графики разогрева и остывания бетона, а также набора им прочности – на рисунке 2.

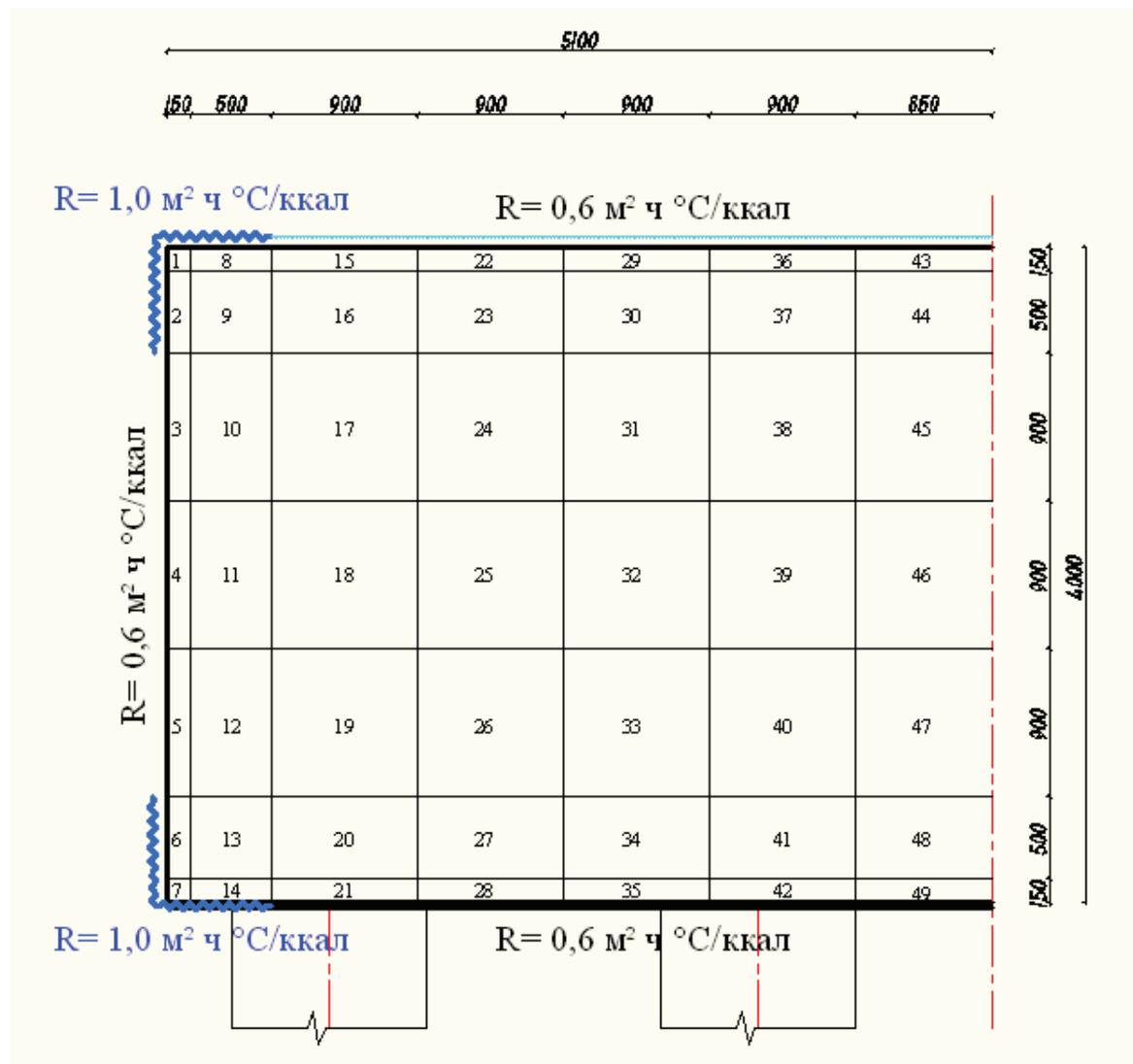


Рисунок 1 – Расчётная схема ростверка опоры размером 19500×10200×4000 мм

Figure 1 – Design grillage scheme of the 19500×10200×4000 mm support

На представленных расчётной схеме и графиках видно, что при выдерживании бетона в опалубке без дополнительного утепления по сечению конструкции образуется большой градиент температур и даже с учётом формирования благоприятного собственного термонапряжённого состояния невозможно обеспечить требуемую трещиностойкость, ввиду чего при расчётах необходимо варьировать величину тепловой изоляции, изменяя ее численное значение и, как следствие, обеспечивая температурные перепады, гарантирующие преду-

ждение появления трещин. Однако при этом стоит помнить, что чрезмерное увеличение величины тепловой изоляции может при негативных условиях привести к образованию неблагоприятного собственного термонапряжённого состояния. В частности, для данного ростверка очевидно, что при дополнительном утеплении маломассивных ребер и граней конструкции с учетом сформировавшегося вогнутого температурного поля нулевых напряжений в твердеющем бетоне допустимый перепад при максимальном разогреве бетона

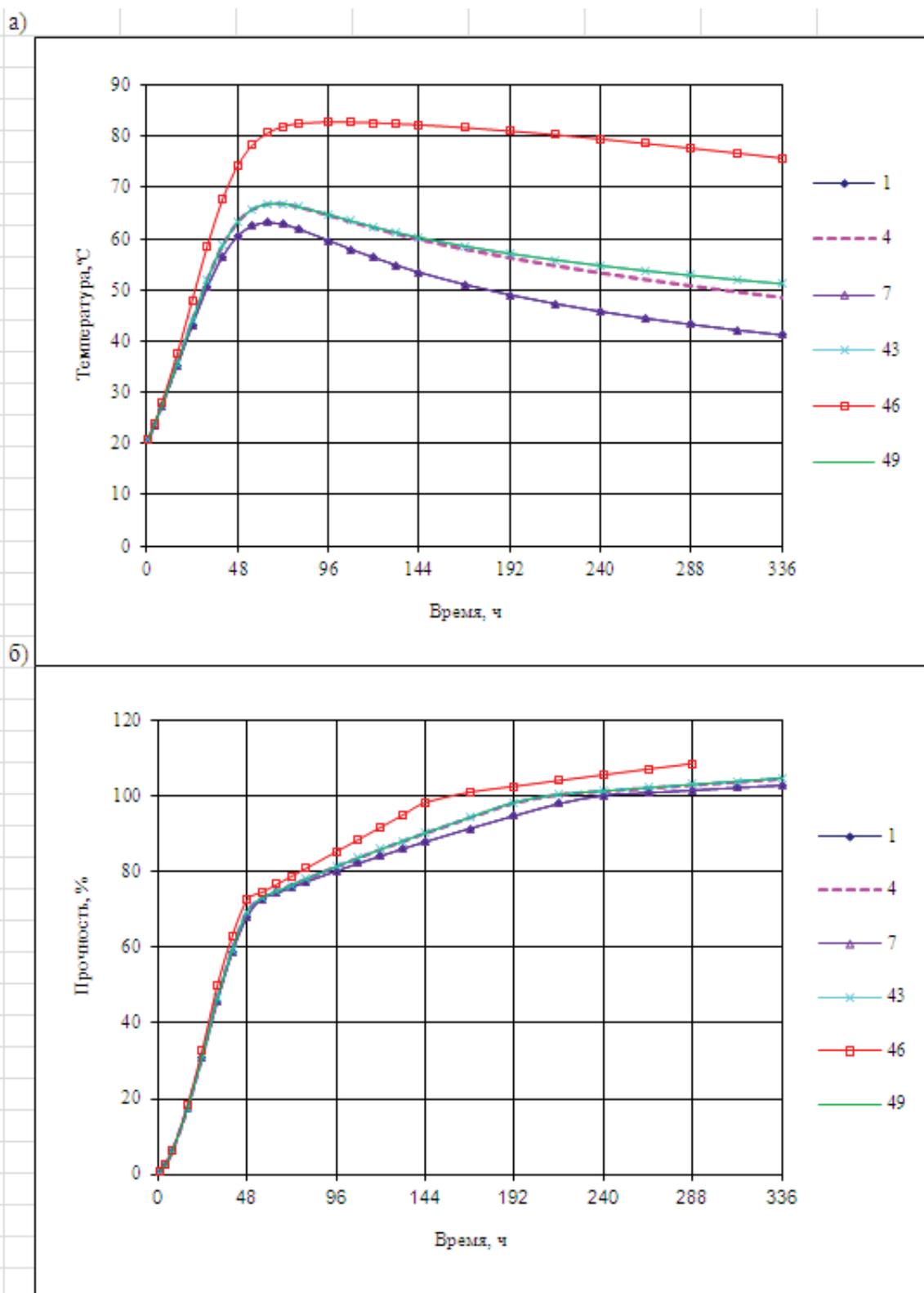


Рисунок 2 – Графики изменения температуры и прочности твердеющего бетона ростерка опоры при температуре бетонной смеси 20°C, температуре наружного воздуха 20°C

Figure 2 – Schemes of the temperature and strength of hardening concrete in grillage by 20°C concrete mixture temperature and by 20°C outdoor temperature

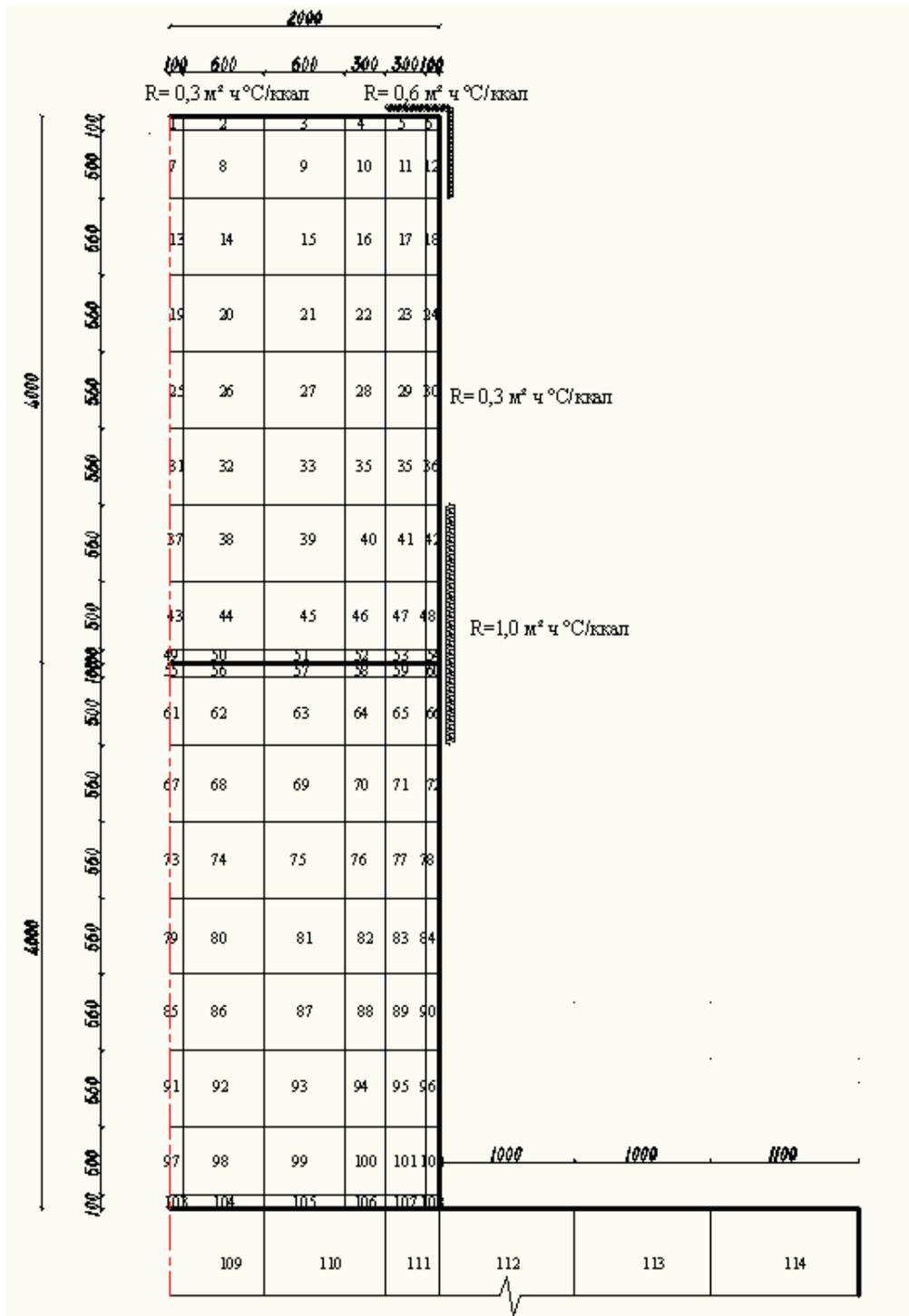


Рисунок 3 – Расчётная схема стойки опоры Крымского моста в продольном направлении

Figure 3 – Design scheme of the Crimean bridge support pillar in the longitudinal direction

и период максимального перепада температур превышает значение 20°C, при этом набор прочности бетона 75% от проектной обеспечивается уже через трое суток после окончания бетонирования.

Теперь рассмотрим стойку опоры Крымского моста, схема которой в продольном направлении представлена на рисунке 3, графики разогрева и остывания бетона, а также набора им прочности – на рисунке 4.

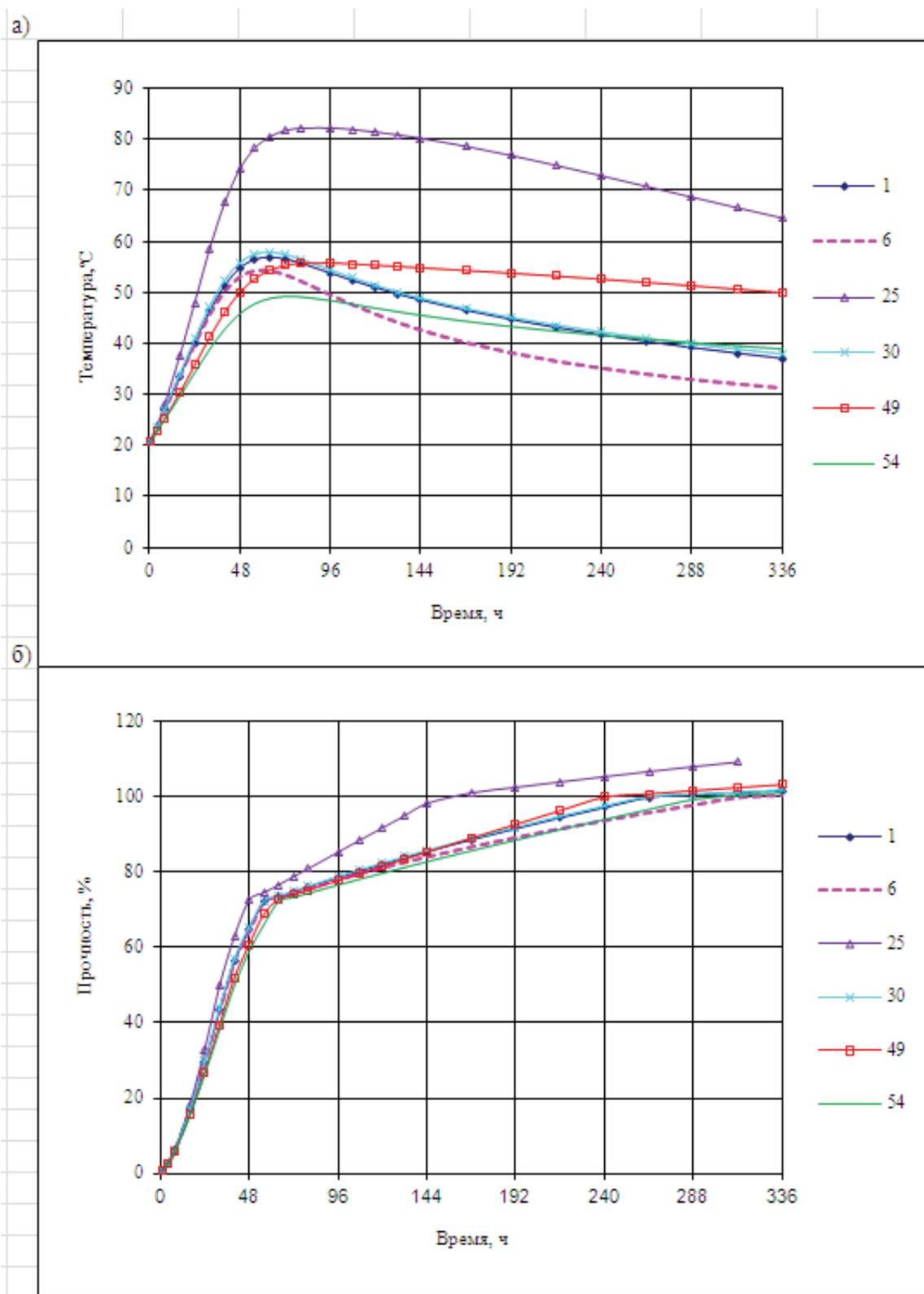


Рисунок 4 – Графики изменения температуры и прочности твердеющего бетона стойки опоры в продольном направлении при температуре бетонной смеси 20°C, температуре основания 20°C, температуре наружного воздуха 20°C

Figure 4 – Schemes of the temperature and strength of hardening concrete in grillage by 20°C concrete mixture temperature and by 20°C outdoor temperature in the longitudinal direction

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

На основе полученных данных можно сделать анализ о том, что в бетоне конструкции при дополнительном утеплении ее мало-массивных частей также формируется благоприятное собственное термонапряжённое состояние, однако при этом для обеспечения требуемых потребительских свойств необходимо осуществлять дополнительное утепление периметра основания, на которое укладывается бетонная смесь, во избежание массового оттока от бетонной смеси тепла и образования температурных трещин в зоне стыка уложенного бетона с затвердевшим. На рисунке 4 видно, что в момент формирования вогнутого температурного поля нулевых напряжений в бетоне разница температур, уве-

личивающая значение ее допустимого перепада по всей конструкции при максимальном разогреве бетона и период максимального перепада температур составляет 10 ... 12°C.

Как было сказано ранее, с целью уточнения величины тепловой изоляции и целесообразности дополнительного утепления конструктивных элементов, имеющих значительные габариты по одному из направлений, целесообразно провести расчёт в данном направлении, что и было сделано для указанной стойки опоры. Схема стойки опоры Крымского моста в поперечном направлении представлена на рисунке 5, графики разогрева и остывания бетона, а также набора им прочности – на рисунке 6.

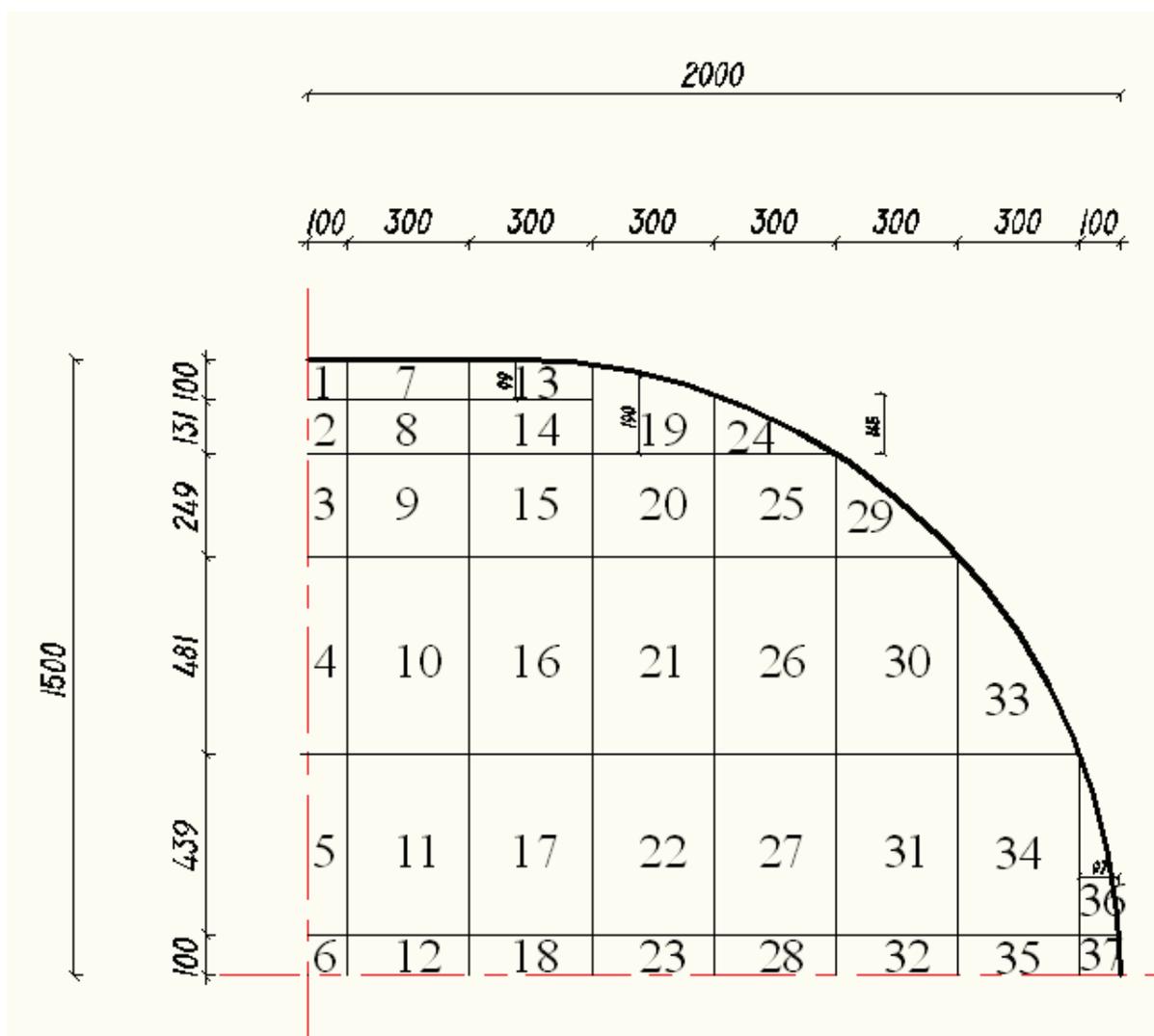


Рисунок 5 – Расчётная схема стойки опоры Крымского моста в поперечном направлении

Figure 5 – Design scheme of the Crimean bridge support pillar in the transverse direction

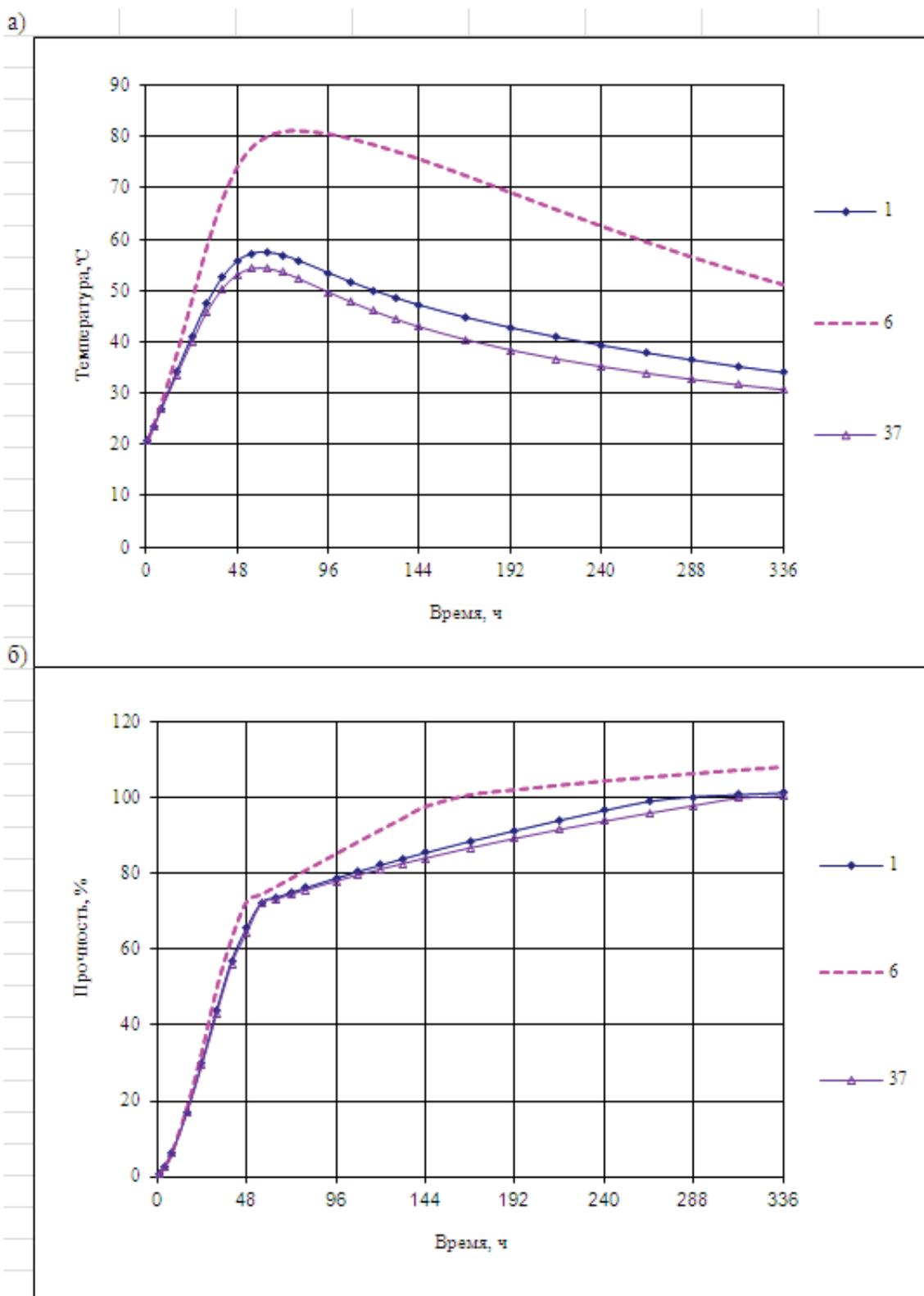


Рисунок 6 – Графики изменения температуры и прочности твердеющего бетона стойки опоры в поперечном направлении при температуре бетонной смеси 20°C, температуре основания 20°C, температуре наружного воздуха 20°C

Figure 6 – Schemes of the temperature and strength of hardening concrete in grillage by 20°C concrete mixture temperature and by 20°C outdoor temperature in the transverse direction

На графиках видно, что для обеспечения трещиностойкости бетона нет необходимости устраивать дополнительное утепление всей конструкции по высоте, а с учётом величины собственно температурных напряжений в бетоне перепад температур, в период которого обеспечивается заданное условие, составляет в среднем 30 ... 35°C. Кроме того, следует отметить, что числовые значения как температуры разогрева бетонной смеси, максимальных температурных перепадов, так и сроков набора прочности бетоном оказались схожими как при расчёте в поперечном, так и в продольном направлении, что подтверждает достоверность расчётного программно-аналитического комплекса.

Помимо вопросов температурного и прочностного режимов твердеющего бетона одним из важных условий ускорения процесса возведения опор Крымского моста является скорость оборачиваемости опалубки, которая, в том числе при бетонировании захватками по высоте, во многом определяется температурой ранее забетонированного основания, на которое укладывается бетонная смесь. При проведении данной работы был применен опыт, описанный авторами статьи ранее [24], согласно которому за такую температуру принималась величина, равная 40°C.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённая работа позволила обобщить и уточнить полученные ранее выводы [25, 26], а также установить требуемые расчетные параметры термонапряжённого состояния твердеющего бетона моста, разработать мероприятия по предупреждению трещинообразования в бетоне с учётом жаркого климата и того фактора, что обеспечение высоких технологических свойств бетона конструкций зависит не только от соответствующих свойств бетонной смеси, её теплообмена с окружающей средой и температурных перепадов, но и от условий образования благоприятного собственного термонапряжённого состояния. Также в работе показано, что применительно к внеклассовым транспортным сооружениям для каждого конструктивного элемента можно разработать собственный подход к процессу бетонирования, который оказывает весомое влияние на гарантию получения требуемых потребительских свойств всей возводимой конструкции.

Опыт научного сопровождения строительства подобных объектов доказал, что существующая в настоящее время практика данного сопровождения исключительно на стадии его строительства не оправдывает себя в полной мере. С целью подбора эффективных материалов и технологий строительства научное сопровождение объекта требуется вести уже на стадии проектирования, что на деле оказывается выгодным как с финансовой, так и с практической точки зрения.

Обобщенные исследования напряжённого состояния твердеющего бетона показывают, что вне зависимости от особенностей конструктивных элементов транспортных сооружений применительно к ним возможно разработать различные технологии защиты от возникновения температурных дефектов даже с учётом заданного темпа строительства.

На основании полученных данных и обобщения имеющегося опыта авторами статьи были разработаны технологические регламенты на производство подготовительных, опалубочных, арматурных и бетонных работ при возведении массивных опор (ростверки, стойки, ригели), возводимых на суше и в акватории, при строительстве автодорожного и железнодорожного мостов через Керченский пролив в условиях круглогодичного строительства с проведением теплофизических расчётов твердеющего бетона, основные положения которых позволили обеспечить требуемый темп бетонирования конструктивных элементов Крымского моста с соблюдением требуемых сроков оборачиваемости опалубки, что позволило ускорить процесс пуска автомобильного движения по мосту, задать темп строительства железнодорожной части моста при неукоснительном соблюдении требований по обеспечению высоких потребительских свойств конструктивных элементов рассматриваемого объекта и сформировать важный опыт строительства подобных внеклассных, но все более распространённых в нашей стране объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Космин В.В., Мозалев С.В. Проблемы исследований, проектирования и строительства мостов больших пролётов // Научно-технический журнал «Вестник мостостроения». 2014. № 1. С. 19–24.

2. Красновский Б.М. Инженерно-физические основы методов зимнего бетонирования. М. : ГАСИС, 2004. 470 с.
3. Соколов С.Б. Влияние колебаний температуры воздуха в тепляках на температуру твердеющего бетона при возведении монолитных плитно-ребристых пролётных строений в холодный период года. Научные труды ОАО ЦНИИС «От гидравлического интегратора к современным компьютерам», №213. М.: ЦНИИС, 2002. С. 167–172.
4. Пассек В.В., Заковенко В.В., Антонов Е.А., Ефремов А.Н. Применение искусственного охлаждения в процессе управления температурным режимом возводимых железобетонных арок. Научные труды ОАО ЦНИИС «От гидравлического интегратора к современным компьютерам», №213. М.: ЦНИИС, 2002. С. 73–75.
5. Смирнов Н.В., Антонов Е.А. Роль ползучести бетона в формировании термонапряжённого состояния монолитных железобетонных конструкций в процессе её возведения. Научные труды ОАО ЦНИИС «От гидравлического интегратора к современным компьютерам», №213. М.: ЦНИИС, 2005. С. 89–117.
6. Евланов С.Ф. Технологические трещины на поверхности монолитных пролётных строений. Научные труды ОАО ЦНИИС «Проблемы нормирования и исследования потребительских свойств мостов», № 208. М.: ЦНИИС, 2002. С. 27–36.
7. Васильев А.И., Вейцман С.Г. Современные тенденции и проблемы отечественного мостостроения // Научно-технический журнал «Вестник мостостроения». 2015. № 1. С. 2–17.
8. Соловьянчик А.Р., Шифрин С.А., Ильин А.А., Соколов С.Б. Выбор технологических параметров производства бетонных работ при возведении массивных ростверков и опор арочного пилона вантового моста через реку Москву. Научные труды ОАО ЦНИИС «Исследование транспортных сооружений», №230. М.: ЦНИИС, 2006. С. 24–30.
9. Соловьянчик А.Р., С.М. Пуляев, И.С. Пуляев. Исследование тепловыделения цементов, используемых при строительстве мостового перехода через Керченский пролив // Вестник СибАДИ. 2018. № 2. С. 283–293.
10. Соловьянчик А.Р., Коротин В.Н., Шифрин С.А., Вейцман С.Г. Опыт снижения трещинообразования в бетоне от температурных воздействий при сооружении Гагаринского тоннеля // Научно-технический журнал «Вестник мостостроения». 2002. №3–4. С. 53–59.
11. Гинзбург А.В. Обеспечение высокого качества и эффективности работ при возведении тоннелей из монолитного бетона // Научно-технический журнал «Вестник МГСУ». 2014. № 1. С. 98–110.
12. Соловьянчик А.Р., Шифрин С.А., Коротин В.Н., Вейцман С.Г. Реализация концепции «качество» при сооружении Гагаринского тоннеля в г. Москве. Научные труды ОАО ЦНИИС «Технологии и качество возводимых конструкций из монолитного бетона», № 217. М.: ЦНИИС, 2003. С. 206–212.
13. Балючик Э.А., Величко В.П., Черный К.Д. Изготовление блоков облицовки в зимний период строительства моста через реку Анггару // Научно-технический журнал «Транспортное строительство». 2012. № 10. С. 4–7.
14. Соловьянчик А.Р., Пуляев И.С. Предупреждение трещинообразования в бетоне при возведении нижних частей пилонов вантового моста через р. Оку на обходе г. Муром // Научно-технический журнал «Вестник МГСУ». 2008. № 1. С. 285–295.
15. Solovyanchik A.R., Krylov B.A., Malinsky E.N. Inherent thermal stress distributions in concrete structures and method for their control. Thermal Cracking in Concrete at Early Ages. Proceedings of the International RILEM Symposium. Munich, 1994. 5 p.
16. Пуляев И.С., Дудаева А.Н. Исследование температурного режима твердеющего бетона верхних ярусов верхней части пилонов при строительстве моста через р. Оку на обходе г. Мурома. Научные труды ОАО ЦНИИС «Испытания и расчёты конструкций транспортных сооружений», №251. М.: ЦНИИС, 2009. С. 45–52.
17. Соловьянчик А.Р., Шифрин С.А., Коротин В.Н., Вейцман С.А. Опыт использования неполного обжатия бетона для предупреждения появления трещин в конструктивных элементах транспортных сооружений. Научные труды ОАО ЦНИИС «Технология и качество возводимых конструкций из монолитного бетона», № 217. М.: ЦНИИС, 2003. С. 200–205.
18. Тарасов А.М., Бобров Ф.Ю., Пряхин Д.В. Применение физического моделирования при строительстве мостов и других сооружений // Научно-технический журнал «Вестник мостостроения». 2007. № 1. С. 21–26.
19. Пряхин Д.В. Исследование работы

вантового пролётного строения моста методами физического моделирования // Научно-технический журнал «Транспортное строительство». 2009. № 10. С. 11–13.

20. Величко В.П., Черный К.Д. Учет напряженно-деформированного состояния в сборно-монолитных опорах мостов на стадии их сооружения // Научно-технический журнал «Транспортное строительство». 2013. № 2. С. 11–13.

21. Лукьянов В.С., Соловьяничик А.Р. Физические основы прогнозирования собственного термонапряжённого состояния бетонных и железобетонных конструкций. Сборник научных трудов ЦНИИС, №73. М.: ЦНИИС, 1972. С. 36–42.

22. Лукьянов В.С., Соловьяничик А.Р. Исследование тепловыделения цемента в термосном калориметре ЦНИИСа. Сборник докладов «Методы экспериментального определения и расчёта тепловыделения в бетоне». М.: ВНИИПИ Теплопроект, 1971. С. 45–58.

23. Лукьянов В.С., Денисов И.И. Расчёт термоупругих деформаций массивных бетонных опор мостов для разработки мер по повышению их трещиностойкости. Сборник научных трудов ЦНИИС, №36. М.: ЦНИИС, 1970. С. 4–43.

24. Пуляев И.С., Пуляев С.М. К вопросу о максимальной температуре основания, при которой допускается укладка бетонной смеси при возведении транспортных сооружений // Научно-технический журнал «Вестник МГСУ». 2011. № 2. С. 295–304.

25. Коротин В.Н. Конструктивно – технологические особенности сооружения монолитных пролётных строений эстакады // Научно-технический журнал «Вестник мостостроения». 2002. № 3–4. С. 3–8.

26. Пассек В.В., Соловьяничик А.Р. Методика исследований температурного режима балок пролётных строений мостов в процессе тепловлажностной обработки. Сборник научных трудов ЦНИИС «Температурный режим и вопросы повышения устойчивости и долговечности транспортных сооружений на БАМ». М.: ЦНИИС, 1980. С. 97–103.

REFERENCES

1. Kosmin V.V., Mozalev S.V. Problemy issledovaniy, proyektirovaniya i stroitel'stva mostov bol'shikh prolotov [Research problems, design and construction of large span bridges].

Nauchno-tehnicheskiy zhurnal *Vestnik mostostroyeniya*, 2014, no 1, pp. 19–24. (in Russian)

2. Krasnovskiy B.M. *Inzhenerno-fizicheskiye osnovy metodov zimnego betonirovaniya* [Engineering and physical foundations of winter concreting methods]. Moscow, GASIS, 2004. 470 p. (in Russian)

3. Sokolov S.B. Vliyaniye kolebaniy temperatury vozdukha v teplyakakh na temperaturu tverdeyushchego betona pri vozvedenii monolitnykh plitno-rebristyykh prolotnykh stroyeniy v kholodnyy period goda [Influence of air temperature fluctuations in hotbeds on the temperature of hardening concrete during the erection of monolithic slab-ribbed spans during the cold period of the year]. Nauchnyye trudy OAO TSNIIS *Ot gidravlicheskogo integratora k sovremennym komp'yuteram*, 2002, no 213. Moscow, TSNIIS, pp. 167–172. (in Russian)

4. Passek V.V., Zakovenko V.V., Antonov Ye.A., Yefremov A.N. Primeneniye iskusstvennogo okhlazhdeniya v protsesse upravleniya temperaturnym rezhimom vozvodimykh zhelezobetonnykh arok [Application of artificial cooling in the process of the temperature regime controlling of erected reinforced concrete arches]. Nauchnyye trudy OAO TSNIIS *Ot gidravlicheskogo integratora k sovremennym komp'yuteram*, 2002, no 213. Moscow, TSNIIS, pp. 73–75. (in Russian)

5. Smirnov N.V., Antonov Ye.A. Rol' polzuchesti betona v formirovaniy termonapryazhonnogo sostoyaniya monolitnykh zhelezobetonnykh konstruksiy v protsesse yeyo vozvedeniya [Role of concrete in the formation of the thermo-stress state of monolithic reinforced concrete structures in the process of its erection]. Nauchnyye trudy OAO TSNIIS *Ot gidravlicheskogo integratora k sovremennym komp'yuteram*, 2005, no 213. Moscow, TSNIIS, pp. 89–117. (in Russian)

6. Yevlanov S.F. Tekhnologicheskiye treshchiny na poverkhnosti monolitnykh prolotnykh stroyeniy [Technological cracks on the surface of monolithic building structures]. Nauchnyye trudy OAO TSNIIS *Problemy normirovaniya i issledovaniya potrebitel'skikh svoystv mostov*, 2002, no 208. Moscow, TSNIIS, pp. 27–36. (in Russian)

7. Vasil'yev A.I., Veytsman S.G. Sovremennyye tendentsii i problemy otechestvennogo mostostroyeniya [Modern

trends and problems of domestic bridge construction]. *Vestnik mostostroyeniya*, 2015, no 1, Moscow, pp. 2 - 17. (in Russian)

8. Solov'yanchik A.R., Shifrin S.A., Il'in A.A., Sokolov S.B. Vybor tekhnologicheskikh parametrov proizvodstva betonnykh rabot pri vozvedenii massivnykh rostverkov i opor arochnogo pilona vantovogo mosta cherez reku Moskvu [Selection of technological parameters for the production of concrete works during the erection of massive grillage and support of the arch bridge of the cable bridge over the Moscow River]. *Nauchnyye trudy OAO TSNIIS Issledovaniye transportnykh sooruzheniy*, 2006, no 230, Moscow, TSNIIS, pp. 24–30. (in Russian)

9. Solov'yanchik A.R., S.M. Pulyayev, I.S. Pulyayev. Issledovaniye teplovydeleniya tsementov, ispol'zuyemykh pri stroitel'stve mostovogo perekhoda cherez Kerchenskiy proliv [Investigation of the cements heat release used in the construction of the bridge across the Kerch Strait]. *Vestnik SibADI*, 2018, no 2, pp. 283–293. (in Russian)

10. Solov'yanchik A.R., Korotin V.N., Shifrin S.A., Veytsman S.G. Opyt snizheniya treshchinoobrazovaniya v betone ot temperaturnykh vozdeystviy pri sooruzhenii Gagarinskogo tonnelya [Experience in reducing cracking in concrete from thermal effects during the construction of the Gagarinsky tunnel]. *Vestnik mostostroyeniya*, 2002, no 3–4, pp. 53–59. (in Russian)

11. Ginzburg A.V. Obespecheniye vysokogo kachestva i effektivnosti rabot pri vozvedenii tonneley iz monolitnogo betona [Ensuring the high quality and efficiency of work in the construction of tunnels from monolithic concrete]. *Vestnik MGSU*, 2014, no 1, pp. 98–110. (in Russian)

12. Solov'yanchik A.R., Shifrin S.A., Korotin V.N., Veytsman S.G. Realizatsiya kontseptsii «kachestvo» pri sooruzhenii Gagarinskogo tonnelya v g. Moskve [Realization of the quality concept in the construction of the Gagarinsky tunnel in Moscow]. *Nauchnyye trudy OAO TSNIIS «Tekhnologii i kachestvo vozvodimyykh konstruksiy iz monolitnogo betona»*, 2003, no 217, pp. 206–212. (in Russian)

13. Balyuchik E.A., Velichko V.P., Chernyy K.D. Izgotovleniye blokov oblitsovki v zimniy period stroitel'stva mosta cherez reku Angaru [Manufacturing of cladding units during the winter construction of the bridge across the

Angara River]. *Transportnoye stroitel'stvo*, 2012, no 10, pp. 4–7. (in Russian)

14. Solov'yanchik A.R., Pulyayev I.S. Preduprezhdeniye treshchinoobrazovaniya v betone pri vozvedenii niznykh chastey pilonov vantovogo mosta cherez reku Oku na obkhode goroda Muroma [Prevention of cracking in concrete when erecting the lower parts of the pylons of the cable-stayed bridge across the Oka River on the bypass of the Murom city]. *Vestnik MGSU*, 2008, no 1, pp. 285–295. (in Russian)

15. Solov'yanchik A.R., Krylov B.A., Malinsky E.N. Inherent thermal stress distributions in concrete structures and method for their control. Thermal Cracking in Concrete at Early Ages. Proceedings of the International RILEM Symposium. Munich, 1994. 5 p.

16. Pulyayev I.S., Dudayeva A.N. Issledovaniye temperaturnogo rezhima tverdeyushchego betona verkhnykh yarusov verkhney chasti pilonov pri stroitel'stve mosta cherez r. Oku na obkhode g. Muroma [Investigation of the temperature regime of hardening concrete of the upper layers of the upper part of the pylons during the construction of the bridge over the Oka River on the bypass of the city of Murom]. *Nauchnyye trudy OAO TSNIIS Ispytaniya i raschoty konstruksiy transportnykh sooruzheniy*, 2009, no 251. Moscow, TSNIIS, pp. 45–52. (in Russian)

17. Solov'yanchik A.R., Shifrin S.A., Korotin V.N., Veytsman S.A. Opyt ispol'zovaniya nepolnogo obzhatiya betona dlya preduprezhdeniya poyavleniya treshchin v konstruktivnykh elementakh transportnykh sooruzheniy [Experience in the use of incomplete compression of concrete to prevent the appearance of cracks in structural elements of transport structures]. *Nauchnyye trudy OAO TSNIIS Tekhnologiya i kachestvo vozvodimyykh konstruksiy iz monolitnogo betona*, 2003, no 217. Moscow, TSNIIS, pp. 200–205. (in Russian)

18. Tarasov A.M., Bobrov F.YU., Pryakhin D.V. Primeneniye fizicheskogo modelirovaniya pri stroitel'stve mostov i drugikh sooruzheniy [Application of physical modeling in the construction of bridges and other structures]. *Vestnik mostostroyeniya*, 2007, no 1, pp. 21–26. (in Russian)

19. Pryakhin D.V. Issledovaniye raboty vantovogo prolotnogo stroyeniya mosta metodami fizicheskogo modelirovaniya [Investigation of the cable-stayed bridge

structure using physical modeling methods]. *Transportnoye stroitel'stvo*, 2009, no 10, pp. 11–13. (in Russian)

20. Velichko V.P., Chernyy K.D. Uchet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya v sborno-monolitnykh oporakh mostov na stadii ikh sooruzheniya [The account of the stress-strain state in the team-monolithic bridge supports at the stage of their construction]. *Transportnoye stroitel'stvo*, 2013, no 2, pp. 11–13. (in Russian)

21. Luk'yanov V.S., Solov'yanchik A.R. Fizicheskiye osnovy prognozirovaniya sobstvennogo termonapryazhonnogo sostoyaniya betonnykh i zhelezobetonnykh konstruksiy [Physical basis for predicting the intrinsic thermo-stress state of concrete and reinforced concrete structures]. *Sbornik nauchnykh trudov TSNIIS*, no 73. Moscow, TSNIIS, 1972. pp. 36–42. (in Russian)

22. Luk'yanov V.S., Solov'yanchik A.R. Issledovaniye teplovydeleniya tsementa v termosnom kalorimetre TSNIISa [Investigation of the heat release of cement in a thermosensitive calorimeter of CNIIS]. *Sbornik dokladov Metody eksperimental'nogo opredeleniya i raschota teplovydeleniya v betone*. Moscow, VNIPI Teploproyekt, 1971. pp. 45–58. (in Russian)

23. Luk'yanov V.S., Denisov I.I. Raschot termouprugikh deformatsiy massivnykh betonnykh opor mostov dlya razrabotki mer po povysheniyu ikh treshchinostoykosti [Calculation of thermoelastic deformations of massive concrete bridge supports to develop measures to increase their fracture toughness]. *Sbornik nauchnykh trudov TSNIIS*, no 36. Moscow, TSNIIS, 1970. pp. 4–43. (in Russian)

24. Pulyayev I.S., Pulyayev S.M. K voprosu o maksimal'noy temperature osnovaniya, pri kotoroy dopuskayetsya ukladka betonnoy smesi pri vozvedenii transportnykh sooruzheniy [To the question of the maximum temperature of the substrate, at which it is allowed to lay a concrete mixture in the construction of transport facilities]. *Vestnik MGSU*, 2011, no 2, pp. 295–304. (in Russian)

25. Korotin V.N. Konstruktivno – tekhnologicheskiye osobennosti sooruzheniya monolitnykh prolotnykh stroyeniy estakady [Structurally – technological features of the construction of monolithic bridge structures of the flyover]. *Vestnik mostostroyeniya*, 2002, no 3–4, pp. 3–8. (in Russian)

26. Passek V.V., Solov'yanchik A.R. Metodika issledovaniy temperaturnogo rezhima balok prolotnykh stroyeniy mostov v protsesse teplovlazhnostnoy obrabotki [Technique for studying the temperature conditions of the beams of bridge building structures in the process of heat and moisture treatment]. *Sbornik nauchnykh trudov TSNIIS Temperaturnyy rezhim i voprosy povysheniya ustoychivosti i dolgovechnosti transportnykh sooruzheniy na BAM*. Moscow, TSNIIS, 1980. pp. 97–103. (in Russian)

Поступила 02.08.2018, принята к публикации 19.10.2018.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пуляев Иван Сергеевич (г. Москва, Россия) – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Технологии вяжущих веществ и бетонов», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26).

Пуляев Сергей Михайлович (г. Москва, Россия) – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Строительные материалы и материаловедение», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pulyaev Ivan Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Technologies of Binders and Concrete Department, National Research Moscow State University of Civil Engineering (129337, Russia, Moscow, 26, Yaroslavl'skoe Hw.).

Pulyaev Sergey Mihaylovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Construction Materials and Engineering Department, National Research Moscow State University of Civil Engineering (129337, Russia, Moscow, 26, Yaroslavl'skoe Hw.).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Пуляев И.С. Постановка задачи, проведение расчётов, анализ результатов расчётов, оформление статьи.

Пуляев С.М. Обработка результатов расчётов, редактирование статьи.

AUTHORS CONTRIBUTION

Pulyaev I.S. Statement of the problem, calculations' carrying out, analysis of the calculations results.

Pulyaev S.M. Processing of the calculations' results, article editing.