УДК 693.557

ВЫБОР МЕТОДА СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЪЕКТА С УЧЁТОМ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ТВЕРДЕЮЩЕГО БЕТОНА В КОНСТРУКЦИИ В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ

И.С. Пуляев, С.М. Пуляев
НИУ МГСУ,
г. Москва, Россия
ivanes50@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. *Статья посвящена вопросам использования различных методов исследования температурного режима твердеющего бетона в зависимости от граничных условий, заданных в процессе проектирования и возведения объекта. К ним относятся температурный режим выдерживания бетона, скорость оборачиваемости опалубки и, как следствие, сроки строительства объекта, а также иные факторы. Целью работы является обобщение различных методов исследования температурного режима твердеющего бетона, направленных на обеспечение требуемых сроков оборачиваемости опалубки и технологического оборудования, с учётом обеспечения потребительских свойств конструкций. Научная новизна работы заключается в актуализации и апробации методов регулирования разогрева твердеющего бетона, обеспечивающих формирование требуемых потребительских свойств конструкций, ранее не применяемых в транспортном и гражданском строительстве, основанных на предварительном моделировании теплофизических процессов, происходящих в твердеющем бетоне, посредством расчётного программного комплекса. Авторами на примере строительства нескольких крупных объектов рассмотрены наиболее часто возникающие ситуации, связанные с подбором технологии строительства в сложных природных условиях с учётом обеспечения требуемых потребительских свойств – бетонирование крупномассивных конструкций в ограниченные сроки в теплый период года и маломассивных конструкций в условиях зимнего бетонирования. Данный вопрос представляется актуальным ввиду масштабного строительства в нашей стране большого числа внеклассовых, а также реконструкции ранее возведенных объектов.*

Материалы и методы. *Исследования проводились с учётом реальных климатических условий при использовании современных расчётно-измерительных и аналитических систем, учитывающих изменение термонапряжённого состояния твердеющего бетона в зависимости от изменения температуры бетонной смеси во времени. Применение современного расчетно-аналитического комплекса при физическом моделировании теплофизических процессов твердеющего бетона позволило получить результаты максимально точно сопоставимые с данными наблюдений, полученными в процессе строительства.*

Результаты. *Полученные результаты позволили разработать проекты производства работ по бетонированию объектов, возводимых в различных заданных условиях, с соблюдением требуемых сроков оборачиваемости опалубки и обеспечением необходимых потребительских свойств.*

Обсуждение и заключение. *На основании исследований с учетом основных положений теории собственного термонапряженного состояния бетона были предложены мероприятия, реализация которых позволила возвести сложные строительные объекты в сжатые сроки в особых климатических условиях. Статья будет полезна инженерно-техническому персоналу, ведущему свою деятельность в реальных условиях строительства, и специалистам, занятым вопросами изучения теплофизических процессов твердеющего бетона.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *бетон, экзотермия, тепловыделение, моделирование, расчет, температура, прочность, опалубка, термонапряженное состояние, водотрубное охлаждение, электропрогрев.*

© И.С. Пуляев, С.М. Пуляев

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

HARDENING CONCRETE IN STRUCTURES: CHOICE OF THE CONSTRUCTION METHOD BASED ON RESULTS OF THE TEMPERATURE REGIME MODELING IN SPECIAL CONDITIONS

I.S. Pulyaev, S.M. Pulyaev
National Research Moscow State University of Civil Engineering,
Moscow, Russia
ivanes50@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. *The paper discusses the use of different methods of the hardening concrete's temperature regime, depending on the boundary conditions specified in the design and construction of the object. Such conditions include the temperature regime of concrete holding, the turnover rate of the formwork and the construction time of the facility, as well as other factors. The aim of the research is a compilation of the various methods of investigation of the temperature regime of hardening concrete, aimed at providing the required timing of the formwork and technological equipment turnover to ensuring the consumer properties of the structures. The scientific novelty of the research lies in the updating and testing of methods for regulating the hardening concrete's heating, ensuring the formation of the required consumer structures' properties not previously used in transport and civil construction and based on preliminary modeling of thermal processes occurring in the hardening concrete through the calculation software. The authors on the example of several large objects' construction consider the most common situations associated with the selection of construction technology in difficult natural conditions by taking into account the required consumer properties: concreting of large-mass structures in a limited time in the warm season and low-mass structures in winter concreting. The research is relevant in view of the large-scale construction in our country as well as of the facilities' reconstruction.*

Materials and methods. *The authors carried out the research with the use of modern settlement-measuring and analytical systems taking into account the change in the thermal stress state of hardening concrete as a function of the temperature change of the concrete mix over time. The use of the modern computational and analytical complex in the physical modeling of the thermo physical processes of hardening concrete made it possible to obtain results as accurately as possible and comparable with observational data obtained during the construction process.*

Results. *The results allowed authors to project the objects' concreting of erected in various predetermined conditions while observing the required terms of formwork turnover and ensuring the necessary consumer properties.*

Discussion and conclusions. *The authors propose measures, the implementation of which makes it possible to build complex construction projects in a short time in special climatic conditions. The paper is useful for engineering and technical personnel and for professionals involved in the study of thermal processes of hardening concrete.*

KEYWORDS: *concrete, exothermic, heat generation, modeling, calculation, temperature, strength, formwork, thermally stressed state, water-tube cooling, electrical heating.*

© I.S. Pulyaev, S.M. Pulyaev

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

ВВЕДЕНИЕ

Широко известно, что физическое моделирование процесса твердения бетона, связанное в том числе с процессами его тепловыделения и сроками набора прочности, позволяет во многом оптимизировать технологию строительного производства, предупредить нежелательные дефекты и трещины, вызванные неучтённым критическим перепадом температур, а также повысить экономическую целесообразность проведения работ, связанную в первую очередь с прогнозной оборачиваемостью опалубки и снижением затрат на проведение ремонтных работ в случае возникновения необходимости их проведения [1, 2, 3].

Однако при этом недостаточно принимать во внимание только тот опыт и те знания, которые связаны исключительно с различными технологиями организации строительного производства и использование которых в повседневной практике применимо для унифицированных классовых объектов [4, 5]. Зачастую при строительстве сложных и уникальных конструкций, имеющих большую архитектурную выразительность, массивность, сложную конфигурацию и повышенную ответственность, реконструкции и реставрации ранее построенных и «законсервированных» объектов, кроме описанных выше факторов, необходимо принимать во внимание и те, которые напрямую касаются внутренней структуры бетона как строительного материала и оценивают его состояние во времени на протяжении всего технологического процесса производства – от момента приготовления бетонной смеси до снятия опалубки со всей конструкции и ввода ее в эксплуатацию. Практика, обзор имеющейся научно-технической литературы и существующий опыт показывают, что недоучёт этих факторов часто приводит к увеличению сроков возведения, снижению экономической целесообразности и, как следствие, удорожанию строительства всего объекта, а также к неоправданным затратам на проведение ремонтно-восстановительных работ в случае обнаружения дефектов и трещин [6, 7, 8, 9, 10].

Цель настоящей работы заключается в обобщении накопленного опыта использования различных методов исследования температурного режима твердеющего бетона, которые направлены на соблюдение необходимых сроков оборачиваемости опалубки и технологического оборудования в условиях обеспечения качества возводимых конструкций при круглогодичном строительстве, а апробация данных методов, ранее не применяемых в транспортном и гражданском строительстве, позволяет говорить о взаимной возможности их применения для различных типов объектов без привязки к конкретной классификации. В статье показано, что при использовании определенных технологических приёмов в сочетании с основными положениями теории собственного термонапряженного состояния бетона можно обеспечить требуемые потребительские свойства всей конструкции с учётом заданных начальных граничных условий и заданной технологией строительства, соблюдения определенного темпа строительства объекта, используя в качестве подосновы рассматриваемого процесса применение физического моделирования технологических процессов, происходящих в твердеющем бетоне во времени.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Исследование температурного режима твердеющего бетона в условиях искусственного охлаждения посредством применения воды с учётом сложных начальных граничных условий и с применением апробированных аналитических методов математического анализа вызывает определенные трудности, а в некоторых случаях представляется невозможным [11]. Особо остро данный вопрос стоит в транспортном строительстве, где наиболее часто встречаются крупномассивные объекты, возведение которых проводится в сложных климатических условиях, в стесненной местности и в сжатые сроки [12, 13, 14]. Однако выбранная технология строительства моста через р. Оку в г. Муроме с использованием переставной опалубки могла оказаться оправданной и эффективной только в случае трубного охлаждения нижних ярусов верхних частей пилонов водой. Смоделировать проект трубного охлаждения твердеющего бетона водой можно было только на основании установления результатов исследования теплообмена протекающей в трубах воды с окружающим твердеющим бетоном.

В гидротехнике в своё время аналогичные задачи были решены с помощью приближённых методов расчёта, которые, однако, давали существенные погрешности [15]. К тому же при возведении массивных гидротехнических плотин используются по большей мере низкоклассовые бетоны с пониженным тепловыделением, а бетоны классов В30 … В45 и выше – наиболее распространенные в транспортном строительстве – вообще не применяются. Как следствие, применение номограмм, раз-

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

работанных в своё время для охлаждения водой бетонов марок М150 и М200, при использовании в современных реальных условиях транспортного строительства бетонов классов В30…В45 оказалось попросту невозможным. Решить математические трудности в определенной мере помогло применение метода непосредственного моделирования технологических процессов охлаждения бетона водой с использованием теории подобия, частично базирующемся на методе гидравлических аналогий, разработанном проф. В.С. Лукьяновым и усовершенствованным проф. А.Р. Соловьянчиком.[1] Этот метод в 50-е годы прошлого века был успешно использован для расчётов трубного охлаждения твердеющего бетона плотин гидроэлектростанций, показал достаточно высокую эффективность и обоснованность [16, 17, 18].

На сегодняшний день метод гидравлических аналогий практически не используется, но на его основе разработана расчётная программа для ПК, которая с достаточно высокой точностью позволяет решать задачи теплофизики твердеющего бетона в одномерной, двухмерной и трёхмерной постановках с заданными граничными условиями. В данной работе использовался программный комплекс «ZA 200» («ЗетА 200»), которая была разработана А.Р. Соловьянчиком, В.П. Величко и В.А. Зориной [19, 20], многократно апробирована и проверена на практике [21, 22]. В основу данного программного комплекса положен алгоритм численного решения краевых задач, предложенный В.П. Величко [23], гибкость которого достигнута за счёт применения специальных технологических приёмов, являющихся дальнейшим развитием метода гидравлических аналогий, разработанного ранее в ЦНИИС Минтрансстроя проф. В.С. Лукьяновым. Однако при постановке задачи для планируемого охлаждения твердеющего бетона транспортного объекта протекающей в трубах водой авторам статьи потребовалось довнести определенные изменения и дополнения в программу для ПК с целью ее усовершенствования и автоматизации и в первую очередь в указание исходной информации, в выбор и обоснование начальных и граничных условий [24], которые максимально приближены к реальным и учитывают изменения во времени, происходящие с твердеющим бетоном в зависимости от температуры наружного воздуха, окружающей среды и температуры его укладки в опалубку.

Известно, что при строительстве гидротехнических сооружений трубы искусственного охлаждения в бетонном массиве укладываются горизонтальными рядами змеевиков. При строительстве рассматриваемого моста подобный метод оказался малоэффективным, и в этой связи было принято решение о вертикальном расположении труб коридорным или шахматным порядком. При этом рассматриваемый бетонный массив разделялся на конечные микроэлементы, каждый из которых состоял из условно принятого бетонного блока в виде прямоугольной или шестигранной призмы с проходящей в центре трубой охлаждения. Схематическое иллюстрирование бетонного массива с заложенной в ней системой водяного охлаждения труб представлено на рисунке 1. Для пилона рассматриваемого моста авторами была принята коридорная схема расположения труб ввиду густоармированности возводимой конструкции и, как следствие, указанное расположение труб оказалось наиболее целесообразным и оправданным в дальнейшем при ведении работ.

Из теории подобия следует, что теплофизический расчет температурного режима твердеющего бетона в прямоугольном поле при применении искусственного охлаждения водой может быть проведен путем решения поставленной задачи для некого цилиндра с радиусом R_n, где R_n – радиус рассматриваемого цилиндра, преобразованного из фигуры прямоугольной призмы. Радиус рассматриваемого цилиндра определяется из условия равенства площадей поперечного сечения призмы и цилиндра.

При расположении труб коридорным порядком

$$R = \frac{\sqrt{BH}}{\pi},$$

где B и H – заданное расстояние между установленными трубами в блоке в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно.

[1] Лукьянов В.С., Соловьянчик 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.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

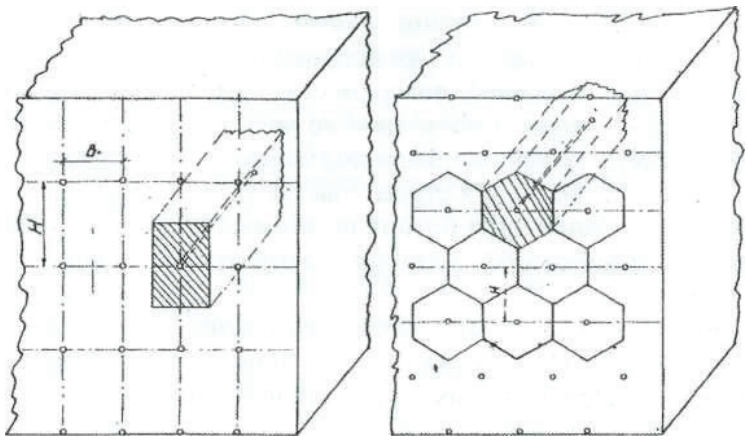


Рисунок 1 – Схема расположения труб коридорным и шахматным порядком

Figure 1 – Scheme of tubes in line and staggered order

Учёт изменения температурного режима и протекающих процессов в цилиндре может быть условно разделен на две задачи: определение теплопередачи в плоскости поперечного сечения цилиндра и определение температурного процесса по длине рассматриваемой трубы.

Полагая, что теплообмен в бетоне вдоль трубы практически отсутствует, а изменение температуры охладителя в данном сечении происходит достаточно медленно ввиду заданной скорости ее подачи, допустимо считать, что закономерность распределения температуры в плоскости поперечного сечения и среднее ее значение для первой плоской задачи может быть выражена через начальную температуру бетона до охлаждения, температуру охладителя (воды) и адиабатический подъем температуры бетона от экзотермии цемента.

При возведении рассматриваемого объекта в расчётах рассматривалась плоская задача по охлаждению цилиндра с заданным радиусом *R*. На первом этапе было принято, что радиус *R* = 0,56 м (при расстоянии между трубами равным примерно 1 м). При этом в процессе решения задачи был принят ряд допущений, среди которых в частности:

– значение температуры поверхности труб принималось равным значению температуры охладителя в трубе и было постоянным во времени. Такое положение вещей является правомерным, так как оно нашло подтверждение ранее при охлаждении бетона водой при возведении гидроэлектростанций;

– значение начальной температуры бетона по всему сечению было одинаковым, и верхняя поверхность расчетного цилиндра находилась в адиабатических условиях.

При учёте указанных выше параметров дифференциальное уравнение и краевые условия, характеризующие процесс изменения температуры в расчётном цилиндре, будут иметь следующий вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a\left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\cdot\frac{\partial T}{\partial r}\right] + Эц - B\,.$$

Начальные и граничные условия:

при $\tau = 0$ для $r_o \le r \le R$ $T = t_б$;

$\tau > 0$ $r < r_o$ $T = t_в$;

$r = R$ $\dfrac{\partial T}{\partial x} = 0$,

где r – расстояние от центра цилиндра, *м*;
r_o – радиус установленной трубы, *м*;
R – радиус расчётного цилиндра, *м*;
T – искомая температура в определенной точке, *°C*;
$t_в$ – температура охладителя (воды), *°C*;
$t_б$ – начальная температура уложенного бетона, *°C*.

При проведении расчетов за центры элементарных слоев были приняты их центры тяжести, определение которых было осуществлено по формуле

$$r_{ц.п} = r_{п\text{-}1} + \xi,$$

где $\xi = l\cdot\dfrac{3r_{n-1} + 2l}{6r_{n-1} + 3l}$ – расстояние центра тяжести расчетного слоя от его внутренней поверхности, *м*.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

$$l = r_n - r_{n-1},$$

где r_n – радиус наружной поверхности слоя, *м*;
r_{n-1} – радиус внутренней поверхности слоя, *м*.

Термическое сопротивление *R* между смежными слоями определялось по формуле

$$R = \frac{1}{\frac{\lambda}{n}} \times \frac{r_{ц(n)}}{r_{ц(n-1)}} \qquad м^2 \cdot {}^{o}C / Вт,$$

где λ – коэффициент теплопроводности бетона, *Вт/(м·°С)*;
$r_{ц(n)}$, $r_{ц(n-1)}$ – радиусы поверхностей, проходящих через центр тяжести произвольного *n*-го слоя и смежного слоя *n-1, м*.

При указанной разбивке температурного поля теплоемкость элементарных слоев сосредоточена в цилиндрических поверхностях, проходящих через центры тяжести этих слоев, величина которой определяется по формуле

$$C_n = C_б \gamma_б \cdot \frac{r_n^{\,2} - r_{n-1}^{\,2}}{2},$$

где $C_б$ – удельная теплоемкость бетона;
$\gamma_б$ – средняя плотность бетона, *кг/м³*;
r_n – радиус наружной поверхности слоя *n*, *м*;
r_{n-1} – радиус внутренней поверхности слоя *n*, *м*.

Теперь рассмотрим пример моделирования технологических процессов, происходящих в твердеющим бетоне, связанный с выдерживанием бетона в определенных климатических условиях, например при зимнем бетонировании. Данная проблематика широко освещена в различных источниках [25, 26], в том числе в трудах Б.М. Красновского [27], однако технология возведения конструкций из монолитного железобетона с учётом расконсервации объекта, при которой бетон «прибетонируется» к ранее возведенной конструкции с учётом обеспечения заданных темпов строительства освещена недостаточно. Такая технология в частности применялась при возведении академии дзюдо в подмосковном Звенигороде, где в условиях ускоренных темпов строительства объекта было принято решение применять при производстве работ в зимних условиях прогрев бетона для конструкций стен и перегородок с помощью тепловых генераторов, а для перекрытий – с применением комбинированного способа, включающего обеспечение требуемого температурного режима воздушной среды в помещении под перекрытием с помощью тепловых генераторов и электропрогрев бетона перекрытия с помощью греющих проводов при наличии тепловой изоляции с термическим сопротивлением R=1,15м²·°С/Вт на верхней поверхности перекрытия.

При прогреве бетона с помощью тепловых генераторов работы выполнялись в следующей последовательности:

- устраивались тепляки;
- отогревался бетон перекрытия и примыкающие к бетонируемому участку ранее забетонированные конструкции, опалубка и арматура до температуры не ниже +5 ºС;
- укладывалась бетонная смесь;
- производился прогрев бетона в технологическом укрытии при температуре окружающей среды +35 … +40 ºС с передачей нагретого воздуха в течение времени, необходимого для набора бетоном прочности не менее 70% от R28;
- прекращался прогрев бетона, после чего он выдерживался в течение времени, необходимого для обеспечения перепада температур между наружной поверхностью бетона и окружающей средой не более 10 ºС;
- после достижения требуемого перепада температур разбирались тепляки и снималось утепление и опалубка.

При использовании другого вида прогрева с применением греющих проводов был установлен следующий порядок работ:

- устанавливалась опалубка;
- устанавливалась арматура в случае её отсутствия;
- устанавливались прокладки-фиксаторы, обеспечивающие требуемую толщину защитного слоя;
- укладывались греющие провода вдоль арматуры. Во избежание обгорания тепловой изоляции, замыкания на массу и перегорания токопроводящих жил в контакте с арматурой защитного слоя на оконцовки нагревательного провода надевались трубки из термоусадочного полиэтилена или создавались отводы из бетона монтажным проводом расчётного сечения. Отвод производился при использовании нагревательных проводов в полиэтиленовой изоляции при погонной нагрузке, превышающей 25 Вт/м;
- устанавливались коммутирующие провода;
- устанавливалась и испытывалась на холостом ходу трансформаторная подстанция;
- поверхность, на которую укладывался бетон, продувкой воздуха от компрессора очищалась от снега и мусора;

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

− устанавливался электрокалорифер с гибким шлангом для отогрева основания, опалубки и арматуры;

− устанавливались трубки для контроля температуры;

− над бетонируемой поверхностью устанавливался полог (колпак);

− опалубка, арматура и прилегающие поверхности стен и перекрытий отогревались до температуры не ниже +5º С электрокалорифером с гибким шлангом;

− бетонировались конструктивные элементы перекрытия. При этом размер захватки определялся исходя из объёмов поступающего бетона и имеющихся электрических мощностей и целесообразных размеров блоков бетонирования (продолжительность бетонирования не превышала 1,5 … 2 ч);

− укладывалось влаготеплозащитное укрытие с требуемым термическим сопротивлением тепловой изоляции;

− пробником проверялась работоспособность каждого нагревательного элемента;

− начинался подъём температуры с установленной скоростью.

Отдельно стоит отметить тот фактор, что зачастую при строительстве крупных промышленных и гражданских объектов требуется оперативное применение различных методов, связанных с использованием современных технологических приёмов, направленных на обеспечение заданных свойств железобетонных конструкций исходя из условий строительства того или иного объекта [28, 29]. Таким примером может служить разработка авторами мероприятий по тепловой обработке и выдерживанию бетона при изготовлении балок из самоуплотняющейся бетонной смеси в г. Ростове-на-Дону при различных климатических условиях без дополнительного обогрева и с обогревом в холодный период года, рекомендациями по управлению прогревом бетона, созданию системы автоматического управления и контролю качества работ. Указанная работа была проведена исходя из условия, что бетонные работы проводились в полигонных условиях и путем моделирования технологических процессов при применении беспрогревного выдерживания бетона в теплый период года и разработки режимов электропрогрева бетона и был обеспечен требуемый темп выпуска балок при рациональном использовании электроэнергии.

Применение описанных выше мероприятий без проведения физического моделирования процессов, происходящих в твердеющем бетоне, было бы неполным, а зачастую невозможным. И, к сожалению, при проектировании и строительстве большого числа объектов, возводимых в настоящее время в нашей стране, этот фактор остаётся не всегда учтённым. А опыт показывает [30, 31, 32, 33], что для правильной оценки процессов, происходящих в твердеющем бетоне, её необходимо производить посредством применения современных расчётно-аналитических комплексов, позволяющих в реальном времени отследить процессы, происходящие в твердеющем бетоне. При написании данной работы указанные факторы были учтены авторами в полном объёме, и результаты, полученные при этом, представлены ниже.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Для изучения температурного процесса в охлаждаемом цилиндре при расчёте водотрубного охлаждения были проведены несколько серий расчетов. При этом были заданы следующие технологические параметры:

– температура бетона (начальная) – 10 °С … 20 °С;

– температура воды (охлаждаемой) – 5 °С ... 20 °С;

– радиусы R цилиндров (расчётных) – 0,56 … 0,8 м;

– радиус трубы r_o = 12,5 мм (с последующим изменением на r_o=20 мм).

Теплофизические характеристики бетона: теплопроводность λ=2,1 Вт/м·°С; теплоемкость $C_б$=0,96 кДж/кг·°С; средняя плотность $\gamma_б$=2600 кг/м^3.

Расход цемента – 400 кг/м^3.

Схема охлаждения водой твердеющего бетона, принятая при проведении расчётов, при расстоянии между трубами 1 м приведена на рисунке 2.

В процессе работы авторами проведено несколько серий теплофизических расчётов, в которых изменялась скорость движения воды в трубах и расстояние между ними. Расчёты показали, что при скорости воды в трубах 0,6 м/с в летний период года требуемые сроки оборачиваемости опалубки не обеспечиваются и только при температуре бетонной смеси 15 °С, при скорости движения воды 1 м/с и температуре охлаждающей жидкости 20 °С, разогреваемый от экзотермии цемента бетон охлаждается до +40 °С, при которой допускается распалубливание конструкции за 10 …12 суток, то есть то время, обеспечивающее требуемые сроки строительства объекта.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

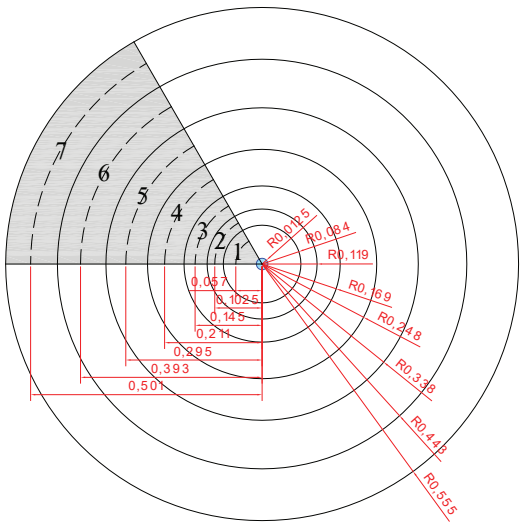


Рисунок 2 – Расчётная схема охлаждения твердеющего бетона вокруг трубы при расстоянии между трубами 1 м при диаметре труб 25 мм

Figure 2 – Design scheme for cooling the hardening concrete around the pipe at the 1 m distance between the pipes of 25 mm diameter

Исследования показали, что расстояния между трубами должны назначаться с учётом массивности конструктивных элементов. Таким образом, для более массивных частей пилонов расстояние между трубами составило 1 м, а для менее массивных – 1,2 м.

Для определения сроков выдерживания бетона в тепляках при использовании тепловых генераторов и с применением греющих проводов были произведены теплофизические расчёты твердеющего бетона с помощью программного комплекса «ZA 200», однако в данном случае авторам также потребовалось внести корректировки в работу программного комплекса, направленные на получение достоверных расчётов по тепловому взаимодействию между элементарными блоками системы исходя из установки по арматурному контуру греющего провода.

Например, при расчёте парапета сечением 300x1000 мм (рисунок 3) конструктивный элемент разбивался на элементарные блоки, после чего в программе рассматривалось тепловое взаимодействие между этими блоками и окружающей средой. В результате расчётов были построены графики изменения температур и прочности твердеющего бетона, один из которых приведён на рисунке 4. По указанным графикам легко определить время выдерживания бетона для достижения им необходимой прочности.

До начала производства работ также были произведены теплофизические расчёты температурного режима твердеющего бетона для условий прогрева с применением греющих проводов, позволяющих определить как максимальную температуру прогрева бетона, так и сроки его выдерживания до набора требуемой прочности.

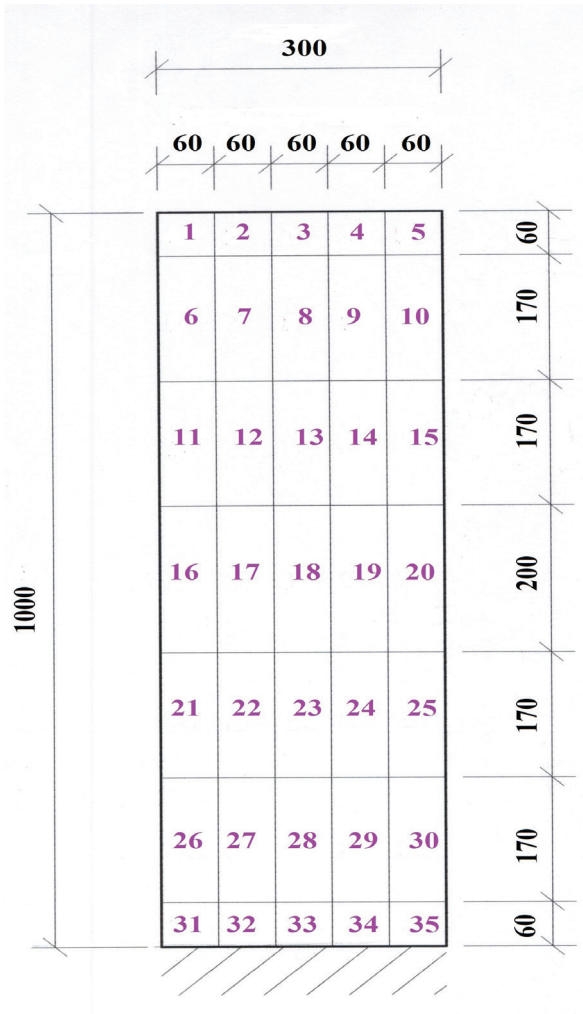


Рисунок 3 – Расчётная схема парапета сечением 300x1000 мм

Figure 3 – Design scheme of the 300x1000 mm section parapet

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

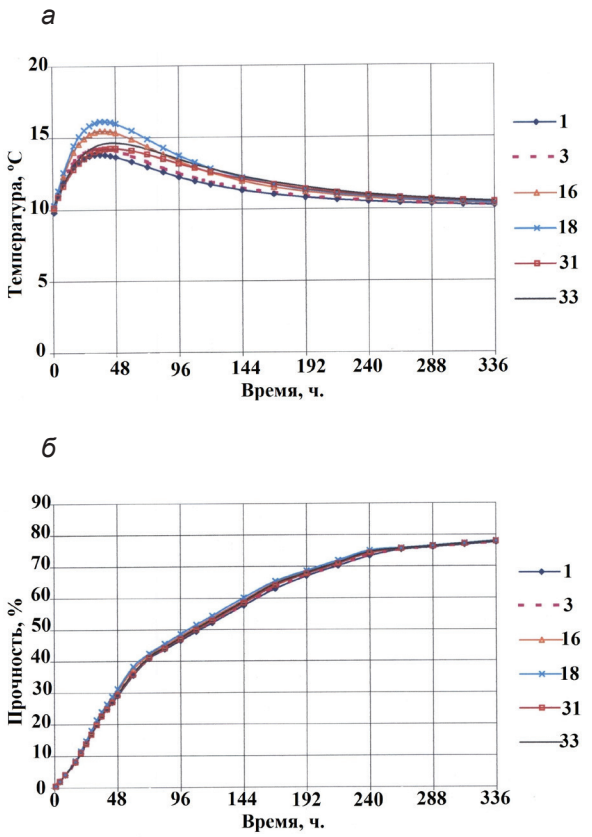


Рисунок 4 – Графики изменения температуры (а) и прочности (б) твердеющего бетона парапета при $t_{б.см.}$=10°С, $t_{н.в.}$=10°С, $t_{осн.}$=10°С

Figure 4 – Graphs of temperature (a) and strength (b) of the hardening concrete parapet

При этом на этапе подготовки расчётных моделей в программный комплекс «ZA 200» авторами были внесены некоторые коррективы физического моделирования, связанные с заданием начальных граничных условий. Так, начальная температура бетонной смеси, уложенной в конструкцию, принималась из расчёта

$$t_{б.н.} = t_{б.см.} – (t_{б.см.} – t_{н.в.})0{,}01\tau_{тр},$$

где $t_{б.н.}$ – начальная температура бетонной смеси, уложенной в конструкцию, °С;
$t_{б.см.}$ – температура бетонной смеси, отпускаемой с бетоносмесительного узла, °С;
$t_{н.в.}$ – температура наружного воздуха, °С.

Были отдельно разработаны расчётные модели прогрева как непосредственно плиты перекрытия, так и плиты перекрытия с ригелем. Модель последнего элемента приведена на рисунке 5, а один из результатов расчётов – на рисунке 6.

При использовании греющих проводов особое внимание было уделено контролю температурного режима твердеющего бетона. По расчётам скорость остывания бетонных конструкций с модулем поверхности 5 …10 $м^{-1}$ была обеспечена в диапазоне не более 5 °С в ч.

Исходя из того, что работы по бетонированию конструктивных элементов здания академии дзюдо проводились в холодный период года, основание, на которое укладывался бетон, потребовалось отогреть до температуры

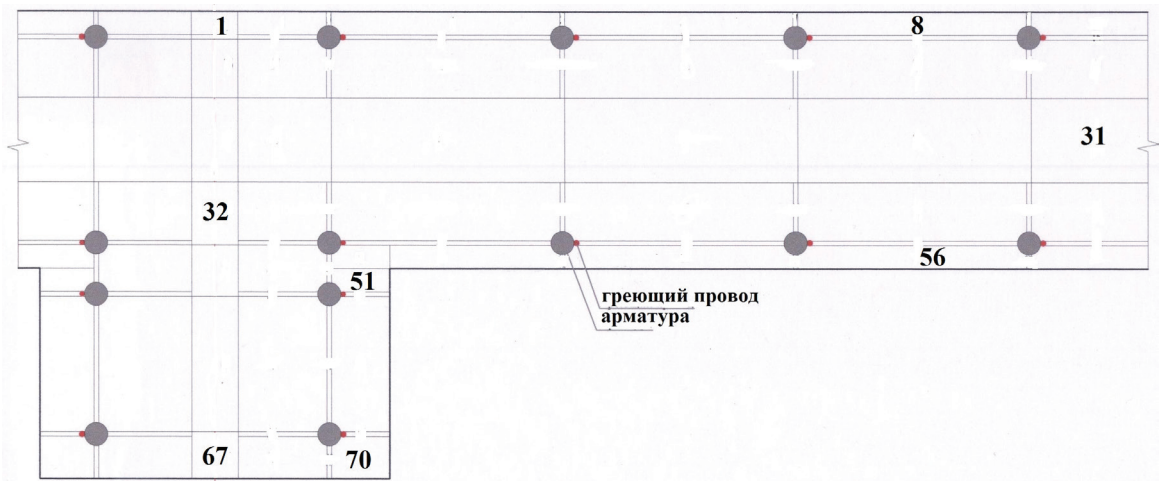


Рисунок 5 – Расчётная схема плиты перекрытия с ригелем при бетонировании с электропрогревом с шагом проводов 200 мм

Figure 5 – Calculation scheme of the floor bolt plate's concreting with 200 mm electrical warming

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

+ 5 °С, при том что скорость подъема температуры бетона основания при отогреве не превышала 3 °С в ч. Продолжительность отогрева основания из бетона, на которое укладывалась бетонная смесь, или конструкций из затвердевшего бетона, к которым прибетонировалась новая конструкция, зависела от фактической температуры основания, его массивности, условий подвода тепловой энергии и температуры греющей среды.

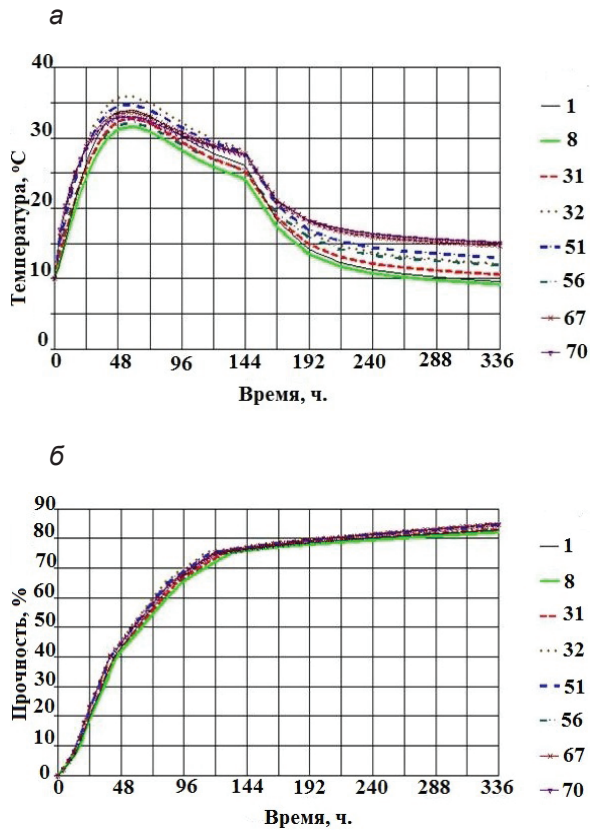


Рисунок 6 – Графики изменения температуры (а) и прочности (б) твердеющего бетона ригеля при $t_{б.см.}$=10°С, $t_{н.в.}$=-20°С, $t_{в.укр.}$=20°С, $t_{гр.пр.}$=80°С

Figure 6 – Graphs of temperature change (a) and strength () of hardening concrete crossbar

Особое внимание при бетонировании конструктивных элементов перекрытий, колонн и ригелей было уделено выдерживанию бетона. Оказалось, что при выдерживании бетона перекрытий и ригелей уложенный бетон в теплый период года должен быть укрыт тепловлагозащитным покрытием с термическим сопротивлением R = 0,30 ... 0,50 м²·°С/Вт (слой влагозащитной пленки, слой дорнита толщиной 3 ... 5 мм, слой влагозащитной пленки). При выдерживании бетона перекрытий в холодный период года теплый воздух подводился к нижней поверхности перекрытия, создавая определённый температурный режим в помещении под перекрытием, и осуществлялся прогрев бетона перекрытия греющими проводами с нижней и верхней поверхности перекрытий. Следует обратить внимание, что при наличии ригелей греющие провода устанавливались с таким расчётом, чтобы обеспечить одинаковые условия для прогрева разномассивных частей конструктивных элементов. При этом термическое сопротивление тепловой изоляции над перекрытием при прогреве греющими проводами составляло сверху 1,15 м²·°С/Вт, а под перекрытием снизу R=0,23 … 0,50 м²·°С/Вт. Такое решение было принято с целью уменьшения затрат на тепловую изоляцию и снижения трудоёмкости работ. При выдерживании бетона ригелей и перекрытий под ними поддерживалась температура воздуха не менее 10 … 20 ºС.

При бетонировании перекрытия греющие провода устанавливались по арматуре соразмерно толщине защитного слоя бетона с верхней и с нижней поверхностей перекрытий конструкции. Общий вид расположения греющих проводов показан на рисунке 7. Примерная схема электрообогрева перекрытия Академии дзюдо греющими проводами приведена на рисунке 8.

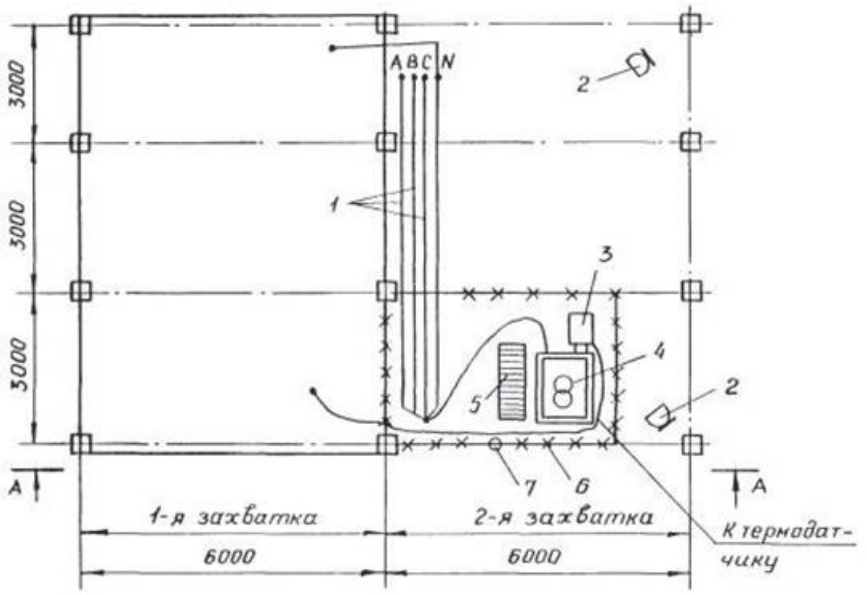
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведённых исследований были разработаны технологические регламенты на производство подготовительных, опалубочных, арматурных и бетонных работ, а также технические задания на устройство трубного охлаждения твердеющего бетона пилонов водой, по которому были разработаны рабочие чертежи, устройство и подключение греющих проводов в бетоне в период зимнего бетонирования.

Для охлаждения воды было принято решение использовать стальные трубы с внутренним диаметром $d_{вн}$ = 40 мм, которые устанавливались вертикально. При охлаждении нижних ярусов верхних частей пилонов трубы устанавливались на расстоянии не более 1 м друг от друга. При охлаждении нижних – менее массивных ярусов верхних частей пилонов – трубы устанавливались на расстоянии 1 ... 1,2 м друг от друга. В частности, схема расположения труб охлаждения на одной из захваток пилона представлена на рисунке 9. Вода в трубы подавалась из реки с помощью насоса через регистры и удалялась из труб через регистры. Трубы между собой соединя-

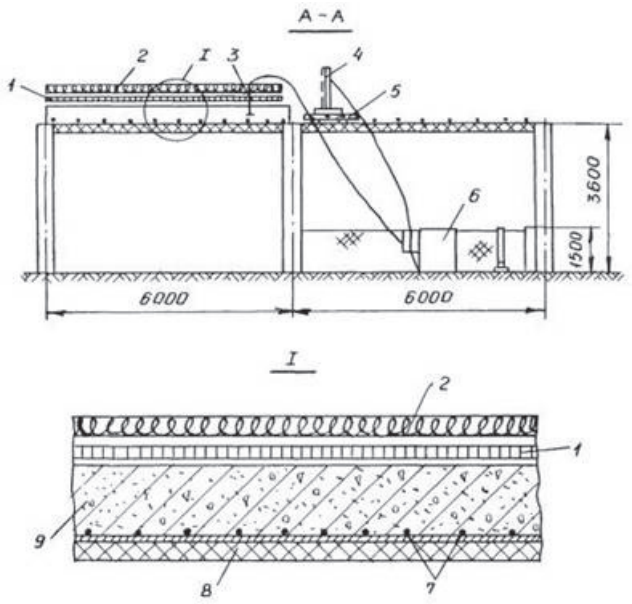
© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

а



1 – инвентарная трехфазная секция шинопроводов; 2 – прожектор; 3 – блок-приставка АРТ-2; 4 – трансформаторная подстанция КТП-63-06; 5 – диэлектрический коврик; 6 – инвентарное ограждение; 7 – сигнальная лампочка красного цвета

б



1 – греющие плоские элементы (ГЭП); 2 – теплоизоляционное гибкое покрытие (ТИГП); 3 – термодатчик; 4 – блок- приставка АРТ-2; 5 – деревянные переносные щиты; 6 – трансформаторная подстанция НТЛ-63-06; 7 – нагревательные провода; 8 – утепленная опалубка; 9 – бетон плиты

Рисунок 7 – Примерная схема электрообогрева перекрытия: а – общий вид, б – в разрезе А-А

Figure 7 – Approximate scheme of electrical heating floor: a – general view, b –in A-A section

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

лись снизу попарно с устройством закруглений во избежание образования острых углов. Горизонтально расположенные внизу яруса трубы находились на расстоянии не более 0,3 ... 0,5 м от поверхности ранее забетонированного яруса. Трубы надежно закреплялись для исключения их сдвижки в процессе укладки бетонной смеси. При этом стоит отметить, что принципиальных отличий в порядке бетонирования конструкции с использованием водотрубного охлаждения от обычного ведения бетонных работ, а также дополнительных требований, кроме описанных выше, не предусмотрено. Слив воды из регистров обратно в реку был устроен таким образом, чтобы вода при удалении из системы охлаждения не попадала на ранее забетонированные ярусы верхних частей пилонов и нижнюю часть пилона.

Отдельно стоит сказать о требованиях к насосам для подачи воды. Мощность насоса для системы водяного охлаждения подбиралась с учетом общего расхода воды при возведении захватки с максимальным объемом укладываемого бетона. Скорость движения воды по трубам при работе системы охлаждения составляла 0,6 ... 0,9 м/с. Объем подаваемой воды для каждой захватки определялся с учетом общего сечения вертикально установленных труб на захватке и принятой минимальной скорости движения воды в трубах. Насосы при этом обеспечивали возможность их непрерывной работы в течение 15 сут (с возможными перерывами в работе согласно требованиям технологического регламента на производство бетонных работ).

Рисунок 8 – Процесс установки греющих проводов при подготовке перекрытия здания академии дзюдо к бетонированию

Figure 8 – Process of the heating wires' installing in the preparation of the Academy of Judo building for concreting

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

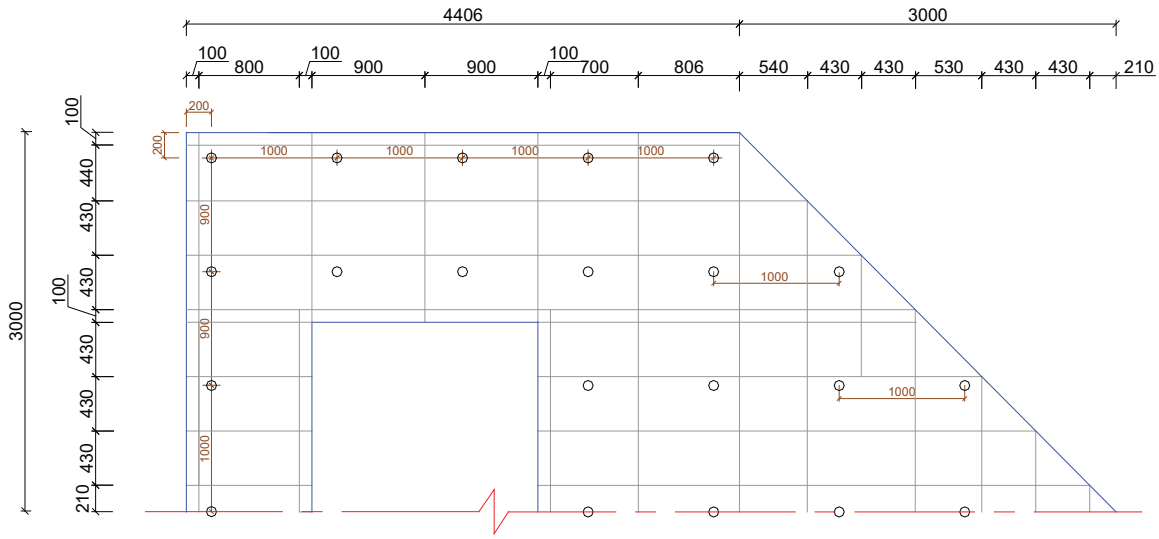


Рисунок 9 – Эскизная схема установки труб водяного охлаждения нижних ярусов верхних частей пилона

Figure 9 – Schematic diagram of the water cooling pipes' installation of the lower tiers of the upper pylon parts

Проект был реализован в частности при строительстве моста через р. Оку в г. Муроме, с соблюдением требуемых сроков оборачиваемости опалубки и забетонированные конструкции не имели дефектов и трещин. В результате проведенной работы было установлено, что с целью моделирования процесса твердения бетона, его тепловыделения и сроков набора прочности для обеспечения ускоренных режимов возведения пилонов и сокращения сроков оборачиваемости опалубки можно применять различные методы, в том числе трубное охлаждение твердеющего бетона водой.

А физическое моделирование процесса прогрева бетона с помощью тепловых генераторов и греющих проводов и практика его использования при строительстве здания академии дзюдо позволили существенно сократить потребность в электроэнергии, уменьшить сроки строительства объекта и получить готовые конструктивные элементы высокого качества.

В работе также показано, что применительно к внеклассовым сооружениям для каждого конструктивного элемента возможно установить индивидуальный подход к процессу бетонирования с помощью рационального физического моделирования теплофизических процессов, происходящих в твердеющем бетоне конструкций, использования различных методов исследования температурного режима твердеющего бетона в зависимости от граничных условий, заданных в процессе проектирования и возведения объекта, которые в совокупности оказывают весомое влияние на гарантию получения требуемых потребительских свойств всей возводимой конструкции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тарасов А.М., Бобров Ф.Ю., Пряхин Д.В. Применение физического моделирования при строительстве мостов и других сооружений // Научно-технический журнал «Вестник мостостроения». № 1. 2007. С. 21–26.

2. Пряхин Д.В. Исследование работы вантового пролётного строения моста методами физического моделирования // Научно-технический журнал «Транспортное строительство». № 10. М.: 2009. С. 11–13.

3. 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.

4. Соловьянчик А.Р., Коротин В.Н., Шифрин С.А., Вейцман С.Г. Опыт снижения трещинообразования в бетоне от температурных

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

воздействий при сооружении Гагаринского тоннеля // Научно-технический журнал «Вестник мостостроения». 2002. № 3–4. С. 53–59.

5. Величко В.П. Методика использования гидравлических аналогий В.С. Лукьянова при разработке алгоритма и решении на ЭВМ задач транспортного строительства // Сборник научных трудов ЦНИИС. № 100. М.: ЦНИИС, 1987. С. 15–22.

6. 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.

7. Соловьянчик А.Р., Пуляев И.С. Предупреждение трещинообразования в бетоне при возведении нижних частей пилонов вантового моста через реку Оку на обходе города Мурома // Научно-технический журнал «Вестник МГСУ». 2008. № 1. С. 285–295.

8. 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.

9. Xu, G., He, C., Lu, D., Wang, S. The influence of longitudinal crack on mechanical behavior of shield tunnel lining in soft-hard composite strata // Thin-Walled Structures. 2019. v. 144, 23 p.

10. Concu, G., Trulli, N. Concrete defects sizing by means of ultrasonic velocity maps // Buildings. 2018. v. 8(12). 19 p.

11. 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.

12. Васильев А.И., Вейцман С.Г. Современные тенденции и проблемы отечественного мостостроения // Научно-технический журнал «Вестник мостостроения». 2015. № 1. С. 2–17.

13. Соловьянчик А.Р., Шифрин С.А., Коротин В.Н., Вейцман С.Г. Реализация концепции «качество» при сооружении Гагаринского тоннеля в Москве // Научные труды ОАО ЦНИИС «Технологии и качество возводимых конструкций из монолитного бетона». № 217. М.: ЦНИИС, 2003. С. 206–212.

14. Пассек В.В., Соловьянчик 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.

15. Zvorykin, A., Mahdi, M., Popov, R., Barati Far, K., Pioro, I. Heat transfer to supercritical water (liquid-like state) flowing in a short vertical bare tube with upward flow. // International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE 9. 2017. 14 p.

16. 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.

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

18. 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.

19. Соловьянчик А.Р., Величко В.П., Зорина В.А. Разработка новой методики исследования температурного режима, прочности твердеющего бетона и термонапряжённого состояния конструкций транспортных сооружений с помощью ПК // Сборник научных трудов ЦНИИС. № 112. М.: ЦНИИС, 1992. С. 75–77.

20. Соловьянчик А.Р., Величко В.П., Зорина В.А. Расчёт теплового и термонапряжённого состояния бетонных и железобетонных конструкций с изменённой геометрией в процессе их изготовления. (ZA200) // Сборник научных трудов ЦНИИС. № 108. М.: ЦНИИС, 1989. С. 10–15.

21. Pulyaev, S., Pulyaev, I., Korovyakov, V., Sitkin, A. Research of hydration heat of Portland cement used in bridge construction of Kerch Strait. // MATEC Web of Conferences. 2018. v. 251, 7 p.

22. Pulyaev, I., Pulyaev, S., Bazhenov, Y., Fetisova, A., Shcherbeneva, O. Effect of thermal induced stress of concrete on performance characteristics of constructions // 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019. 2019. v. 97, 10 p.

23. Kollegger, J., Kromoser, B., Suza, D. Erection of bridges and shells without formwork—

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

challenges for the computational modelling // Computational Modelling of Concrete Structures, EURO-C 2018. 2018. pp. 43–54.

24.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.

25.Балючик Э.А., Величко В.П., Черный К.Д. Изготовление блоков облицовки в зимний период строительства моста через реку Ангару // Научно-технический журнал «Транспортное строительство». 2012. № 10. С. 4–7.

26.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.

27.Красновский Б.М. Инженерно-физические основы методов зимнего бетонирования. М.: ГАСИС, 2004. 470 с.

28.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.

29.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.

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

31.Соловьянчик А.Р., С.М. Пуляев, И.С. Пуляев. Исследование тепловыделения цементов, используемых при строительстве мостового перехода через Керченский пролив // Научно-технический журнал «Вестник СибАДИ». 2018. № 2. С. 283–293.

32.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.

33.Балючик Э.А., Черный К.Д. Повышение трещиностойкости опор мостов из монолитного бетона конструктивными методами // Сборник научных трудов ЦНИИС. № 257. М.: ЦНИИС, 2010. С. 49–57.

REFERENCES

1. 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]. Nauchno-tekhnicheskiy zhurnal *Vestnik mostostroyeniya*. 2007; 1: 21–26 (in Russian).

2. Pryakhin D.V. Issledovaniye raboty vantovogo prolotnogo stroyeniya mosta metodami fizicheskogo modelirovaniya [Investigation of the cable-stayed bridge structure using physical modeling methods]. Nauchno-tekhnicheskiy zhurnal *«Transportnoye stroitel'stvo»*. 2009; 10: 11–13 (in Russian).

3. 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; 230: 24–30 (in Russian).

4. 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]. Nauchno-tekhnicheskiy zhurnal *Vestnik mostostroyeniya*. 2002; 3–4: 53–59 (in Russian).

5. Velichko V.P. Metodika ispol'zovaniya gidravlicheskih analogij V.S. Luk'yanova pri razrabotke algoritma i reshenii na EVM zadach transportnogo stroitel'stva [Method of using hydraulic analogies of V. S. Lukyanov in the development of the algorithm and the solution of computer problems of transport construction]. *Sbornik nauchnyh trudov TsNIIS*. 1987; 100: 15–22 (in Russian).

6. Ginzburg A.V. Obespecheniye vysokogo kachestva i effektivnosti rabot pri vozvedenii tonneley iz monolitnogo betona [Ensuring the high

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

quality and efficiency of work in the construction of tunnels from monolithic concrete]. *Vestnik MGSU*. 2014; 1: 98–110 (in Russian).

7. Solov'yanchik A.R., Pulyayev I.S. Preduprezhdeniye treshchinoobrazovaniya v betone pri vozvedenii nizhnikh 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 Murom bypass]. *Vestnik MGSU*. 2008; 1: 285–295 (in Russian).

8. 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; 208: 27–36 (in Russian).

9. Xu, G., He, C., Lu, D., Wang, S. The influence of longitudinal crack on mechanical behavior of shield tunnel lining in soft-hard composite strata. Thin-Walled Structures. 2019; 144: 23 p.

10. Concu, G., Trulli, N. Concrete defects sizing by means of ultrasonic velocity maps. Buildings. 2018: 8(12): 19 p.

11. 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 controlling the temperature regime of erected reinforced concrete arches]. Nauchnyye trudy OAO TSNIIS *Ot gidravlicheskogo integratora k sovremennym komp'yuteram*, 2002; 213: 73–75 (in Russian).

12. Vasil'yev A.I., Veytsman S.G. Sovremennyye tendentsii i problemy otechestvennogo mostostroyeniya [Modern trends and problems of the domestic bridge construction]. *Vestnik mostostroyeniya*. 2015; 1: 2–17 (in Russian).

13. 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 vozvodimykh konstruktsiy iz monolitnogo betona*. 2003; 217: 206–212 (in Russian).

14. 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*. Mscow: TSNIIS, 1980: 97–103 (in Russian).

15. Zvorykin, A., Mahdi, M., Popov, R., Barati Far, K., Pioro, I. Heat transfer to supercritical water (liquid-like state) flowing in a short vertical bare tube with upward flow. International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE 9. 2017. 14 p.

16. 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.

17. Luk'yanov V.S., Solov'yanchik A.R. Fizicheskiye osnovy prognozirovaniya sobstvennogo termonapryazhonnogo sostoyaniya betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsiy [Physical basis for predicting the intrinsic thermo-stress state of concrete and reinforced concrete structures]. *Sbornik nauchnykh trudov TSNIIS*. 1972; 73: 36–42 (in Russian).

18. 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*. 1970; 36: 4–43 (in Russian).

19. Solov'yanchik A.R., Velichko V.P., Zorina V.A. Razrabotka novoj metodiki issledovaniya temperaturnogo rezhima, prochnosti tverdeyushchego betona i termonapryazhyonnogo sostoyaniya konstrukcij transportnyh sooruzhenij s pomoshch'yu PK [Development of a new methodology for the temperature regime, the strength of hardening concrete and the thermal stress state of structures of transport structures with the PC]. *Sbornik nauchnyh trudov TsNIIS*. 1992; 112: 75–77 (in Russian).

20. Solov'yanchik A.R., Velichko V.P., Zorina V.A. Raschyot teplovogo i termonapryazhyonnogo sostoyaniya betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukcij s izmenyonnoj geometriej v processe ih izgotovleniya. (ZA200) [Calculation of thermal and thermal stress state of concrete and reinforced concrete structures with changed geometry during their manufacture. (ZA200)]. *Sbornik nauchnyh trudov TsNIIS*. 1989; 108: 10–15 (in Russian).

21. Pulyaev S., Pulyaev I., Korovyakov V., Sitkin, A. Research of hydration heat of Portland ce-

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

ment used in bridge construction of Kerch Strait. MATEC Web of Conferences. 2018; 251: 7 p.

22. Pulyaev, I., Pulyaev, S., Bazhenov, Y., Fetisova, A., Shcherbeneva, O. Effect of thermal induced stress of concrete on performance characteristics of constructions. *22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment*, FORM 2019. 2019; 97: 10 p.

23. Kollegger, J., Kromoser, B., Suza, D. Erection of bridges and shells without formwork-challenges for the computational modelling. Computational Modelling of Concrete Structures, EURO-C 2018. 2018: 43–54.

24. Pulyayev I.S., Dudayeva A.N. Issledovaniye temperaturnogo rezhima tverdeyushchego betona verkhnikh 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 Murom bypass]. Nauchnyye trudy OAO TSNIIS *Ispytaniya i raschoty konstruktsiy transportnykh sooruzheniy*. 2009; 251: 45–52 (in Russian).

25. 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 a bridge across the Angara River]. *Transportnoye stroitel'stvo*. 2012; 10: 4–7 (in Russian).

26. Sokolov S.B. Vliyaniye kolebaniy temperatury vozdukha v teplyakakh na temperaturu tverdeyushchego betona pri vozvedenii monolitnykh plitno-rebristykh 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; 213: 167–172 (in Russian).

27. Krasnovskiy B.M. Inzhenerno-fizicheskiye osnovy metodov zimnego betonirovaniya [Engineering and physical foundations of winter concreting methods]. Moscow, GASIS, 2004. 470 p.

28. 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 vozvodimykh konstruktsiy iz monolitnogo betona*. 2003; 217: 200–205 (in Russian)

29. Velichko V.P., Chernyy K.D. Uchet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya v sborno-monolitnykh oporakh mostov na stadii ikh sooruzheniya [Account of the stress-strain state in the team-monolithic bridge supports at the stage of their construction]. *Transportnoye stroitel'stvo.* 2013; 2: 11–13 (in Russian).

30. Kosmin V.V., Mozalev S.V. Problemy issledovaniy, proyektirovaniya i stroitel'stva mostov bol'shikh prolotov [Problems of research, design and construction of large span bridges]. *Vestnik mostostroyeniya.* 2014; 1: 19–24 (in Russian).

31. 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 heat release of cements used in the construction of a bridge across the Kerch Strait]. *Vestnik SibADI*. 2018; 2: 283–293 (in Russian).

32. 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; 2: 295–304 (in Russian).

33. Balyuchik E.A., Chernyy K.D. Povysheniye treshchinostoykosti opor mostov iz monolitnogo betona konstruktivnymi metodami [Increasing the crack resistance of bridge supports made of solid concrete with constructive methods]. *Sbornik nauchnykh trudov TSNIIS*. 2010; 257: 49–57 (in Russian).

Поступила 06.05.2018, принята к публикации 27.08.2019.

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 – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Технологии вяжущих веществ и бетонов», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», ORCID ID 0000-0002-7785-2784 (129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26).

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal

Пуляев Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Строительные материалы и материаловедение», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», ORCID ID 0000-0002-6368-0547 (129337, г.Москва, Ярославское шоссе, д. 26).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivan S. Pulyaev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Binders and Concretes' Technologies, National Research Moscow State University of Civil Engineering, ORCID ID 0000-0002-7785-2784 (Russia, 129337, Moscow, 26, Yaroslavskoe Hw).

Sergey M. Pulyaev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Construction Materials and Engineering Department , National Research Moscow State University of Civil Engineering ORCID ID 0000-0002-6368-0547 (129337, Moscow, 26, Yaroslavskoe Hw).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

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

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

AUTHORS' CONTRIBUTION

Ivan S. Pulyaev – statement of the problem; calculations; analysis of the calculation results.

Sergey M. Pulyaev – processing of the calculation results; article editing; article structuring.

© 2004–2019 Вестник СибАДИ
The Russian Automobile
and Highway Industry Journal