

С.В. ФЕДОСОВ<sup>1</sup>, И.С. ПУЛЯЕВ<sup>2</sup>, О.В. АЛЕКСАНДРОВА<sup>1\*</sup>, А.Н. МИТЯГИНА<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия<sup>2</sup>Московский политехнический университет, г. Москва, Россия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ БЕТОНИРОВАНИИ МАССИВНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**Аннотация.** Массивные железобетонные конструкции – фундаменты, стены, перекрытия, ригели, тела мостовых опор, плотины – подвержены значительным температурным деформациям из-за экзотермии бетона и внешнего теплового воздействия. Неравномерное распределение температур по массиву конструкции приводит к возникновению температурных напряжений, которые могут вызвать трещинообразование в бетоне и приводить к снижению долговечности конструкции. Теплофизическое моделирование позволяет с большой долей вероятности прогнозировать температурные поля возводимых конструкций и напряжения на этапе проектирования, оптимизируя технологии бетонирования (скорость оборачиваемости опалубки, термообработку, состав бетонной смеси и проч.). Методологическую основу исследования составляют: теория нестационарного нелинейного теплопереноса, подходы механики деформируемого твердого тела, позволяющие моделировать напряженно-деформируемое состояние массивных конструкций с учетом сопряженных термических, фазовых и химических процессов. При твердении бетона происходит экзотермическая реакция гидратации компонентов цемента, сопровождающаяся выделением тепла. В массивных конструкциях из-за низкой теплопроводности бетона тепло аккумулируется, что приводит к: неравномерному прогреву; температурным деформациям (расширению при нагреве и сжатию при остывании); возникновению напряжений из-за ограниченной свободы деформирования. Моделирование процессов теплопереноса позволяет прогнозировать температурные поля и напряжения, оптимизировать технологии бетонирования и предотвращать разрушение конструкций. Современные вычислительные методы обеспечивают высокую точность расчетов, что особенно важно для ответственных сооружений (плотин, мостов, фундаментов АЭС).

**Ключевые слова:** железобетонные конструкции, процессы теплопереноса, технология бетонирования, напряженно-деформируемое состояние.

S.V. FEDOSOV<sup>1</sup>, I.S. PULYAEV<sup>2</sup>, O.V. ALEKSANDROVA<sup>1\*</sup>, A.N. MITYAGINA<sup>2</sup><sup>1</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia<sup>2</sup> Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

## MODELING OF HEAT TRANSFER PROCESSES IN CONCRETING OF MASSIVE REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

**Abstract.** Massive reinforced concrete structures – foundations, walls, floors, crossbars, bridge support bodies, dams – are subject to significant temperature deformations due to concrete exothermy and external thermal effects. Uneven temperature distribution over the structure leads to the occurrence of temperature stresses, which can cause cracking in concrete and lead to a decrease in the durability of the structure. Thermophysical modeling makes it possible to predict with a high degree of probability the temperature fields of structures under construction and stresses at the design stage, optimizing concreting technologies (the rate of turnover of the formwork, heat treatment, the composition of the concrete mixture, etc.).

*The methodological basis of the research consists of the theory of unsteady nonlinear heat and mass transfer, approaches of mechanics of deformable solids, which allow modeling the stress-strain state of massive structures, taking into account the associated thermal, phase and chemical processes. When concrete hardens, an exothermic reaction of cement hydration occurs, accompanied by the release of heat. In massive structures, due to the low thermal conductivity of concrete, heat accumulates, which leads to: uneven heating; temperature deformations (expansion during heating and compression during cooling); stress due to limited freedom of deformation. Modeling of heat transfer processes makes it possible to predict temperature fields and stresses, optimize concreting technologies, and prevent structural failure. Modern computational methods ensure high accuracy of calculations, which is especially important for critical structures (dams, bridges, foundations of nuclear power plants).*

**Keywords:** reinforced concrete structures, heat and mass transfer processes, concreting technology, stress-strain state.

## 1. Введение

В строительной отрасли проблемы долговечности становятся все более актуальными. Это объясняется тем, что строительные объекты инфраструктуры, возведенные в середине прошлого века в настоящее время в ветхом (аварийном), состоянии. В западных странах в настоящее время расходуется около 50 процентов строительного бюджета на ремонт, реконструкцию и восстановление строительных объектов и сооружений. В конструкциях, эксплуатирующихся в агрессивных (неблагоприятных) условиях, работающих в интенсивном (форсированном) режиме; пролеты мостов, высотные и большепролетные здания, гидротехнические сооружения, туннели, береговые сооружения, процессы разрушения начинают проявляться в более ранние сроки эксплуатации, что приводит к сокращению проектных сроков службы.

Анализ современных нормативных и проектных документов, регламентирующих строительство объектов транспортной инфраструктуры и промышленных сооружений, выявил недостаточную проработку вопросов учета температурного фактора при формировании эксплуатационных свойств бетона, включая долговечность и надежность возводимых конструкций [1 - 3].

Эмпирические данные, полученные в ходе строительства искусственных сооружений [4, 5], демонстрируют, что пренебрежение температурными воздействиями на стадии проектирования приводит к возникновению дефектов и трещинообразования в бетонных конструкциях, что обуславливает существенные временные и финансовые затраты на их устранение.

Установлено, что минимизация негативных последствий температурных колебаний требует комплексного учета как микронапряжений в бетонной матрице, так и макронапряжений в конструкции в целом. Разработанные на этой основе мероприятия направлены на предотвращение трещинообразования и обеспечение требуемых эксплуатационных характеристик бетона [6].

В настоящей статье представлены ключевые решения, реализованные при проектировании исследуемого объекта с целью оптимизации температурного фактора и повышения долговечности бетонных конструкций.

Традиционно [7, 8, 9], при проектировании технологических стадий производства массивных железобетонных конструкций и изделий одним из основных этапов расчёта является выполнение расчётов по определению прогнозного срока долговечности конструкций. Важными этапами этих расчётов, выбора технологических принципов, а также температурно-влажностных параметров для проведения операций бетонирования на начальном этапе развития являются гидратационные процессы и структурообразование в бетонируемой субстанции [4, 10, 11].

В публикациях по тематике производства строительных материалов [12] и технологиям возведения строительных объектов [13] справедливо отмечается, что структурирование и

набор прочности сопровождаются тепловыми эффектами реакций гидратации компонентов - составляющих цементной смеси, которые, с одной стороны, способствуют ускорению процессов твердения, а с другой стороны, структурирование твёрдой фазы и связывание воды в гидросиликаты, зачастую сопровождаются процессами усадки, ползучести.

Всё это происходит во многом вследствие возникновения и развития температурных напряжений в твёрдой фазе. Работы в этом направлении представлены в известных публикациях [14 - 20]. Отметим особо работы учёных Донского ГУ [21, 22], в которых исследуются проблемы формирования напряжённо-деформированного состояния в массивных фундаментных плитах.

Авторами настоящей статьи [6, 23, 24] также изучались вопросы учёта собственного термонапряженного состояния твердеющего бетона при обеспечении требуемых эксплуатационных свойств конструкций [25].

В настоящей работе рассматриваются проблемы математического моделирования процессов нестационарного теплопереноса бетона железобетонной массивной конструкции.

## **2. Модели и методы**

В основу методов математического анализа изучаемых процессов положены фундаментальные представления физико-математических принципов теории нелинейных нестационарных процессов взаимосвязанного тепломассопереноса [20], а также теорий и методов механики деформируемого твёрдого тела [26] в направлении динамики напряжённо-деформируемого состояния массивных объёмов конечных геометрических размеров, осложнённых явлениями термических фазовых и химических превращений.

Теория нелинейных нестационарных процессов взаимосвязанного тепломассопереноса базируется на системе сопряжённых дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих перенос тепла и массы в условиях их взаимного влияния. Фундаментальную основу составляют:

1. Уравнение энергии (нестационарное уравнение теплопроводности Фурье-Кирхгофа):

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) = \nabla(\lambda \nabla T) + Q_{\text{гидр}} + Q_{\text{фаз}} + Q_{\text{хим}} - \rho c_p (v \nabla T), \quad (1)$$

где  $\rho$  - плотность материала;  $c_p$  - удельная теплоёмкость,  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности;  $Q_{\text{гидр}}$ ,  $Q_{\text{фаз}}$ ,  $Q_{\text{хим}}$  - источники тепла, обусловленные гидратацией, фазовыми и химическими превращениями соответственно, а последнее слагаемое учитывает конвективный перенос тепла.

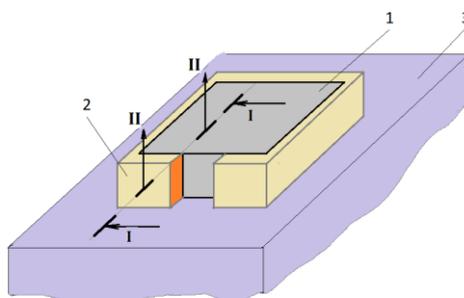
2. Уравнение массопереноса (обобщённый второй закон Фика):

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \nabla(D_i \nabla C_i) + R_i(T, C) - \nabla(v C_i), \quad (2)$$

где  $C_i$  - концентрация компонента  $i$ ;  $D_i$  - коэффициент диффузии;  $R_i(T, C)$  - скорость химической реакции, зависящая от температуры и состава, а последний член описывает конвективный перенос массы.

## **3. Результаты исследования и их анализ**

Процессы твердения бетонного раствора в форме опалубки сопровождаются явлениями гидратации основных составляющих цемента, тепловыми эффектами реакций гидратации. И всё это сопровождается непрерывным изменением по координатам и во времени как теплофизических, плотность -  $\rho$ , теплоёмкость -  $c$ , теплопроводность -  $\lambda$ , температуропроводность -  $a$ ; так и физико-механических характеристик: модуль упругости -  $E$ , модуль сдвига -  $G$ , коэффициент Пуассона -  $\nu$ .



**Рисунок 1 - Иллюстрация фундаментной плиты:**

1 – железобетонная конструкция; 2- опалубка; 3 – щебеночное основание; I-I, II-II – выделенные сечения к рисунку 2

На рисунке 1 приведена иллюстрация фундаментной плиты, часто применяемой в мостовом и дорожном строительстве [27].

В общем случае, в трёхмерной постановке задача развития динамики температурного поля с учётом теплового эффекта реакций гидратации цементных компонентов запишется следующим образом:

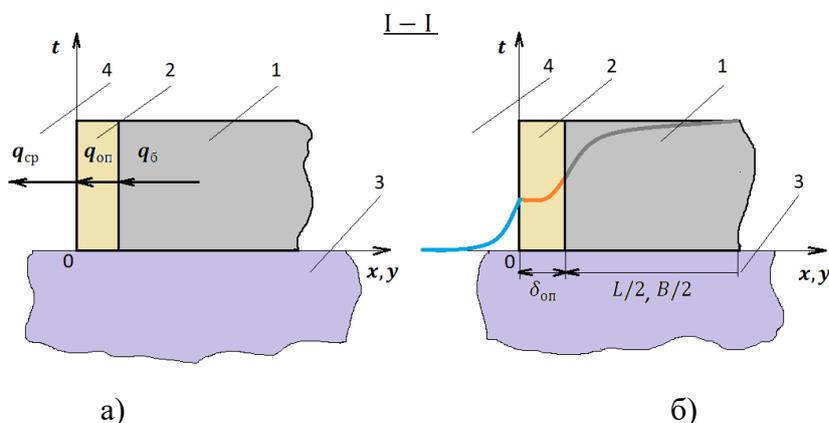
$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \nabla \cdot (a \cdot \nabla t) + \varepsilon \frac{r^*}{c} \frac{\partial u}{\partial \tau}, \quad (3)$$

$$t(x, y, z, \tau)|_{\tau=0} = t_0(x, y, z). \quad (4)$$

В большинстве технологических процессов тепловой обработки строительных материалов и изделий температура внутренних слоёв материала не достигает значений выше 100°C. В противном случае в отдельных частях объёма конструкции может происходить неконтролируемое вскипание воды затворения. А это явление способно приводить к изменению технологического параметра: водоцементного отношения - В/Ц. Результатом станет отклонение кинетики процесса от заданных параметров. В свою очередь, следствием таких отклонений станет невозможность достижения массивом заданных значений прочностных показателей, и значит, к экономическим потерям, как заказчика, так и производителя.

Возвращаемся к теоретической постановке задачи исследования. В одномерной постановке, например, для осей X и Y задача нестационарного теплопереноса может быть рассмотрена в симметричной постановке:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ a(x, \tau) \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \right] + \frac{qvT(\tau)}{\rho(t)c(t)}. \quad (5)$$



**Рисунок 2 - Фрагмент системы «бетон-опалубка» в сечении I – I:**

а) плотности тепловых потоков, б) график профиля температур в плоскости координат X – Y;  
1 – железобетонная конструкция; 2- опалубка; 3 – щебеночное основание; 4 - внешняя среда

Обратимся к рисунку 2, который показывает фрагмент системы «бетон – опалубка». Условия теплообмена фрагмента опалубки с окружающей средой в общем случае характеризуются граничным условием III - го рода:

$$\alpha [t_c(\tau) - t_{оп}(x^*, \tau)] = \lambda_{оп} \frac{\partial t_{оп}(x^*, \tau)}{\partial x} \Big|_{x^*=0} + q_{VT}, \quad (6)$$

здесь, величина  $t_{оп}(x^*, \tau)$  обозначает температуру материала опалубки в точке с координатой  $x^* = 0$  (здесь  $x^*$  - координата в отрицательном направлении);  $\lambda_{оп}$  - коэффициент теплопроводности материала опалубки.

На внутренней поверхности опалубки условия теплового взаимодействия значительно осложняются и записываются в форме граничных условий IV – го рода:

$$t_{оп}(x^*, \tau) \Big|_{x^*=\delta_{оп}} = t(x, \tau) \Big|_{x=\frac{B}{2}}, \quad (7)$$

$$-\lambda_{оп} \frac{\partial t_{оп}(x^*, \tau)}{\partial x} \Big|_{x^*=\delta_{оп}} = -\lambda \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\frac{B}{2}}. \quad (8)$$

Для упрощения записи уравнение (8) может быть представлено в следующем виде:

$$q_{оп}(\tau) = -\lambda_{оп} \frac{\partial t_{оп}(x^*, \tau)}{\partial x} \Big|_{x^*=\delta_{оп}}, \quad (9)$$

$$q(\tau) = -\lambda \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\frac{B}{2}}. \quad (10)$$

Аналогичным образом запишется краевая задача нестационарного теплопереноса для координаты  $Y$ . Отличие будет заключаться в физическом размере координаты граничного условия. А именно: при обозначении размеров плиты  $L \times B \times H$  на границе бетонного массива плиты с опалубкой будет:  $Y = L/2$ .

Дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности по оси  $Z$  запишется по уже принятой форме:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ a(z, \tau) \frac{\partial t(z, \tau)}{\partial z} \right] + \frac{q_{VT}(\tau)}{\rho(t)c(t)}. \quad (11)$$

Начальное условие также запишется по аналогии:

$$t(z, \tau) = t_0(z). \quad (12)$$

В то же время, на границах бетонного массива по вертикальной координате  $Z$  условия теплового взаимодействия будут существенно отличаться от предыдущих (см. рисунок 3).

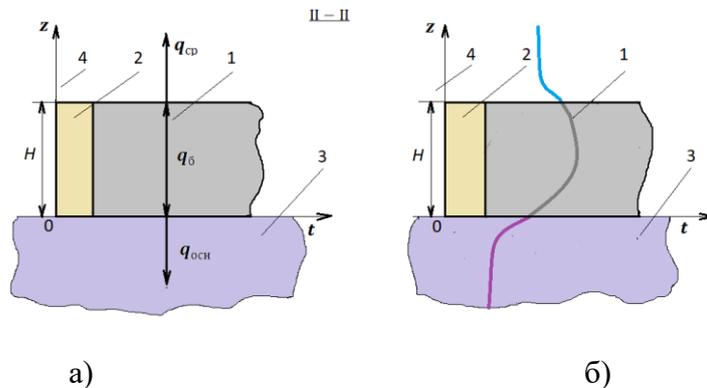


Рисунок 3 - Фрагмент системы «бетон-опалубка» в сечении II-II:

а) плотности тепловых потоков; б) график профиля температур, по координате  $Z$ ; 1 – железобетонная конструкция; 2- опалубка; 3 – щебеночное основание; 4- внешняя среда

Во-первых, как правило [4, 28, 29], при строительстве мостов и асфальтодорожных покрытий бетонная смесь укладывается на предварительно подготовленную площадку из уплотнённого сыпучего материала.

Кроме того, для условий данного случая задача не может быть представлена в симметричной постановке. Для этого случая, в качестве первого приближения можно принять допущение:

$$t(z, \tau)|_{z=0} = \varphi(\tau). \quad (13)$$

На верхней границе массива условия теплового взаимодействия также могут быть различны в зависимости как от температурно-влажностных состояний среды эксплуатации, так и поставленных заказчиком технических условий. Примем, в первом приближении, заданный закон изменения температуры поверхности. С учётом изложенного, краевая задача нестационарного теплопереноса по оси  $Z$  может быть представлена основным уравнением (11), начальным условием (12), граничным условием для  $z = 0$  - уравнение (13), и граничным условием для верхней поверхности, – в общем случае, условие III-го рода:

$$\alpha[t_c - t(z, \tau)]|_{z=H} = -\lambda \frac{\partial t(z, \tau)}{\partial z} |_{z=H}; \quad (14)$$

– в частном случае, условие I-го рода:

$$t(z, \tau)|_{z=H} = \psi(\tau). \quad (15)$$

Решение общей задачи определения динамики объёмных полей температур по координатам возможно *численными* методами [30]. Практика применения методов теории теплопереноса применительно к реальным задачам строительных технологий [31] показывает наибольшую эффективность методов решений, базирующихся на сочетании численных и аналитических методов расчета. Впервые в фундаментальной монографии А.В. Лыкова и Ю.А. Михайлова [32] было показано, что для решения задач нестационарного тепло- и массопереноса для тел канонической формы (пластина, цилиндр, сфера) эффективным способом является метод суперпозиции.

В соответствии с этим методом, решения краевых задач нестационарного переноса в трехмерной системе координат находится по двухэтапному способу.

1. Краевые задачи для каждой координатной оси представляются в безразмерном виде.
2. Находятся решения для каждой краевой задачи в форме выражений:

$$T(\bar{x}, Fo_{\bar{x}}) = \varphi(\bar{x}, Fo_{\bar{x}}), \quad T(\bar{y}, Fo_{\bar{y}}) = \psi(\bar{y}, Fo_{\bar{y}}), \quad T(\bar{z}, Fo_{\bar{z}}) = \phi(\bar{z}, Fo_{\bar{z}}). \quad (16)$$

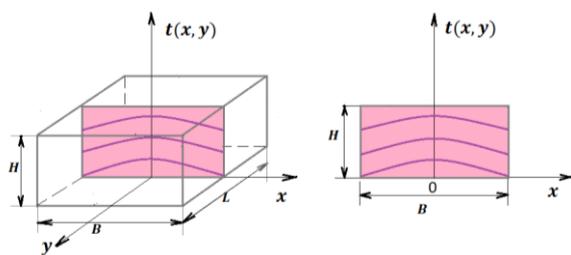
Здесь для безразмерных величин приняты обозначения:

$$\bar{x} = \frac{x}{L/2}; \quad \bar{y} = \frac{y}{B/2}; \quad \bar{z} = \frac{z}{H}; \quad Fo_{\bar{x}} = \frac{a \cdot \tau}{(L/2)^2}; \quad Fo_{\bar{y}} = \frac{a \cdot \tau}{(B/2)^2}; \quad Fo_{\bar{z}} = \frac{a \cdot \tau}{H^2}. \quad (17)$$

3. И, наконец, в соответствии с отмеченным принципом суперпозиции, общее решение будет представлено в форме выражения:

$$T(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, Fo) = T(\bar{x}, Fo_{\bar{x}}) \cdot T(\bar{y}, Fo_{\bar{y}}) \cdot T(\bar{z}, Fo_{\bar{z}}). \quad (18)$$

Численная реализация некоторых результатов математического моделирования приведена на рисунках 4 - 6. Вычисления выполнены для плоской модели в координатном пространстве  $t$ - $x$ - $y$ , при этом рисунки 4 и 5 иллюстрируют профили температур по соответствующим координатным осям, а рисунок 6 показывает типичный профиль температур в двумерной координатной плоскости.

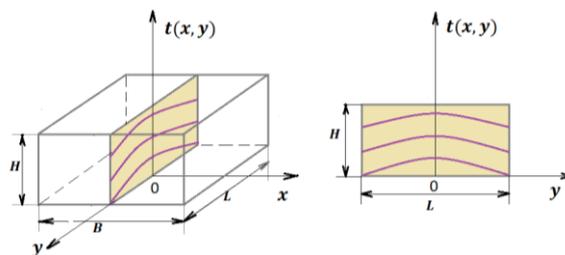


а)

б)

**Рисунок 4 - Модель размерного массивного тела: иллюстрация динамики полей температур в плоскости  $t-x$ :**

а) центральное сечение; б) профиль температур в плоскости сечения

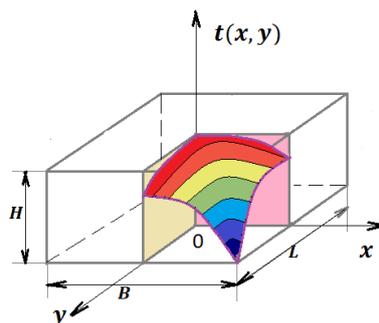


а)

б)

**Рисунок 5 - Модель размерного массивного тела: иллюстрация динамики полей температур в плоскости  $t-y$ :**

а) центральное сечение; б) профиль температур в плоскости сечения



**Рисунок 6 - Иллюстрация развития двумерного поля температур**

Результаты модельных расчетов показывают адекватность математической модели теплопереноса реальным физическим представлениям. Следующим этапом исследований предполагается «осложнение» модели дополнительными явлениями, такими как влияние опалубки, свойства которой существенно отражаются на границах тел, и значениями тепловых потоков. В свою очередь, именно соотношение этих величин влияют на динамику развития полей температур в пристенных слоях твердых тел, определяя величину температурных градиентов, которые являются источниками трещинообразования в бетоне.

#### 4. Заключение

1. Низкая теплопроводность бетона в массивных конструкциях приводит к неравномерному прогреву, температурным деформациям (расширению при нагреве и сжатию при охлаждении) и возникновению напряжений из-за ограниченной свободы деформирования.

2. Численное моделирование процессов теплопереноса позволяет прогнозировать температурные поля и напряжения в бетонных конструкциях, что способствует оптимизации технологий бетонирования и предотвращению разрушений.

3. Современные вычислительные методы обеспечивают высокую точность расчетов температурных полей и напряжений, что критически важно для проектирования и эксплуатации ответственных сооружений, таких как плотины, мосты и фундаменты АЭС.

4. На этом авторы статьи считают целесообразным завершить изложение результатов части настоящего исследования. В последующей статье предполагается изложение результатов по постановке, решению и анализу задачи термонапряженного деформированного состояния блока массивного железобетона с учетом влияния термоопалубки, подстилающего слоя грунтобетона и материалов верхнего покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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». 2005. №213. С. 89–117.
2. Евланов С.Ф. Технологические трещины на поверхности монолитных пролётных строений // Научные труды ОАО ЦНИИС «Проблемы нормирования и исследования потребительских свойств мостов». 2002. № 208. С. 27–36.
3. Васильев А.И., Вейцман С.Г. Современные тенденции и проблемы отечественного мостостроения // Научно-технический журнал «Вестник мостостроения». 2015. № 1. С. 2–17.
4. 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». 2006. № 230. С. 24–30.
5. Gakhova, L.N. Температурные напряжения в массивах железобетонных конструкций // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2017. № 4(3). С. 48-53. <http://jfams.ru/index.php/JFAMS/article/view/116>
6. Пуляев И.С., Александрова О.В., Пуляев С.М., Курицын В.С. Обоснование размеров блоков бетонирования при возведении тоннельных сооружений и подпорных стен мостовых конструкций // Вестник ВСГУТУ. 2023. № 4 (91). С. 56-64.
7. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований.
8. СП 46.13330.2012 Мосты и трубы.
9. СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции.
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. 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.
12. Баженов Ю.М. Технология бетона. М. : Изд-во АСВ. 2015. 528 с.
13. Лапидус А.А., Хубаев А.О., Бидов Т.Х., Топчий Д.В. Совершенствование процесса бетонирования монолитных конструкций в условиях арктической зоны // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 12. С. 9-16. DOI: 10.33622/0869-7019.2024.12.09-16
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». 1980. С. 97–103.
15. 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». 2005. №213. С. 167–172.
16. 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». 2005. №213. С. 89–117.
17. Шифрин С.А., Ткачёв А.В. Тепловое взаимодействие твердеющего бетона и бетонного основания в условиях солнечной радиации // Сборник трудов ВНИИПИ Теплопроект. 1985. С. 19-27.
18. Лукьянов В.С., Соловьянчик А.Р. Физические основы прогнозирования собственного термонапряжённого состояния бетонных и железобетонных конструкций // Сборник научных трудов ЦНИИС. 1972. №73. С. 36–42.
19. Величко В.П., Цимеринов А.И. Методика прогнозирования термонапряжённого состояния цилиндрических бетонных массивов // Сборник научных трудов ЦНИИС. 1972. №73. С. 117–129.
20. Гинзбург А.В. Обеспечение высокого качества и эффективности работ при возведении тоннелей из монолитного бетона // Научно-технический журнал «Вестник МГСУ». № 1. 2014. С. 98–110.
21. Nesvetaev, G.V., Koryanova, Yu.I., Yazyev, V.M. Autogenous shrinkage and early cracking of massive foundation slabs. Maazine of Civil Engineering. 2024. № 17(6). Article no. 13005. DOI: 10.34910/MCE.130.5
22. Несветаев Г.В., Корянова Ю.И., Шуть В.В. Учет влияния добавок на тепловыделение бетона с целью предотвращения раннего рещинообразования массивных монолитных конструкций // Вестник евразийской науки. - 2024. - Т.16. № 6. URL: <https://esj.today/PDF/50SAVN624.pdf>.
23. Пуляев И.С., Пуляев С.М. Учет температурного фактора твердеющего бетона при возведении объектов транспортной инфраструктуры // Вестник ВСГУТУ. 2020. № 4 (79). С. 92-100.
24. Пуляев И.С., Пуляев С.М. Учёт собственного термонапряженного состояния твердеющего бетона при обеспечении требуемых потребительских свойств конструкций крымского моста // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2018. Т. 15. № 5 (63). С. 742-759.

25. Травуш В.И., Никифоров С.В. Технология бетонирования массивных конструкций фундаментов зданий МФК «Лакта Центр» // Строительство и реконструкция. 2025. № 2. С. 44-55. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2025-118-2-44-55>
26. Елисеев В.В. Механика деформируемого твёрдого тела. С.-П(б), 2006, 231 с.
27. Fedosov S., Pulyaev I., Aleksandrova O., Cherednichenko N., Derbasova E., Lezhnina Yu. Thermophysical processes in hardening concrete as a factor for quality assurance of erected reinforced concrete structures of transport facilities. *Architecture and Engineering*. 2024. Vol. 9. № 4. Pp. 75-86.
28. Васильев А.И., Вейцман С.Г. Современные тенденции и проблемы отечественного мостостроения // Научно-технический журнал «Вестник мостостроения». 2015. № 1. С. 2–17.
29. Балючик Э.А., Черный К.Д. Повышение трещиностойкости опор мостов из монолитного бетона конструктивными методами // Сборник научных трудов ЦНИИС. 2010. № 257. С. 49–57.
30. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. М.: Госэнергоиздат. 1963, 536 с.
31. Федосов С.В., Баканов М.О., Федосеев В.Н. Методы теории теплопроводности в приложении к задачам моделирования процессов сушки и термической обработки твёрдых материалов. Москва - Вологда, «Инфра-Инженерия», 2024, 212 с.
32. Лыков А.В. Теоретические основы строительной теплофизики. Изд. АН БССР, 1961, 525 с.

## REFERENCES

1. Smirnov N.V., Antonov E.A. The role of concrete creep in the formation of the thermally stressed state of monolithic reinforced concrete structures during its construction [Rol polzuchesti betona v formirovanii termonapryazhennogo sostoyaniya monolitnykh zhelezobetonnykh konstruksiy v protsesse eye vozvedeniya]. *Scientific works of JSC TSNIS "From hydraulic integrator to modern computers"*. 2005. No. 213. Pp. 89-117. (rus)
2. Evlanov S.F. Technological cracks on the surface of monolithic superstructures [Tekhnologicheskiye treshchiny na poverkhnosti monolitnykh proletnykh stroyeniy]. *Scientific papers of JSC TSNIS "Problems of rationing and research of consumer properties of bridges"*. 2002. No. 208. Pp. 27-36. (rus)
3. Vasiliev A.I., Weizman S.G. Modern trends and problems of domestic bridge construction. *Scientific and technical journal [Sovremennyye tendentsii i problemy otechestvennogo mostostroyeniya]. Bulletin of Bridge Construction*". 2015.No. 1. Pp. 2–17. (rus)
4. Solovyanchik A.R., Shifrin S.A., Ilyin A.A., Sokolov S.B. Selection of technological parameters for the production of concrete work during the construction of massive grillages and supports of the arched pylon of a cable-stayed bridge across the Moscow River [Vybor tekhnologicheskikh parametrov proizvodstva betonnykh rabot pri vozvedenii massivnykh rostverkov i opor arochnogo pilona vantovogo mosta cherez reku Moskvu]. *Scientific works of JSC TsNIIS "Research of transport structures"*. 200. No. 230. Pp.24–30. (rus)
5. Gakhova, L.N. Temperature stresses in arrays of reinforced concrete structures [Температурные напряжения в массивах железобетонных конструкций]. *Fundamental and applied issues of mining sciences*. 2017. No. 4(3). Pp. 48-53. (rus). <http://jfams.ru/index.php/JFAMS/article/view/116>
6. Pulyaev I.S., Aleksandrova O.V., Pulyaev S.M., Kuritsyn V.S. Justification of the size of concreting blocks during the construction of tunnel structures and retaining walls of bridge structures [Obosnovaniye razmerov blokov betonirovaniya pri vozvedenii tonnelnykh sooruzheniy i podpornykh sten mostovykh konstruksiy]. *Bulletin of VSGUT*. 2023. No. 4 (91). Pp. 56-64. (rus)
7. GOST 27751-2014 Nadezhnost stroitelnykh konstruksiy in osnovaniy [GOST 27751-2014 Nadezhnost stroitelnykh konstruksiy i osnovaniy]. (rus)
8. SP 46.13330.2012 Mosty i truby [SP 46.13330.2012 Mosty i truby]. (rus).
9. SP 63.13330.2018 Betonnyye i zhelezobetonnyye konstruksii. [SP 63.13330.2018 Betonnyye i zhelezobetonnyye konstruksii]. (rus)
10. Solovyanchik A.R., Korotin V.N., Shifrin S.A., Weizman S.G. Experience in reducing cracking in concrete from temperature influences during the construction of the Gagarin tunnel [Opyt snizheniya treshchinoobrazovaniya v betone ot temperaturnykh vozdeystviy pri sooruzhenii Gagarinskogo tonnelya]. *Scientific and technical journal "Bulletin of Bridge Construction"*. 2002 No. 3(4). Pp. 53–59. (rus)
11. Velichko V.P., Cherny K.D Accounting for the stress-strain state in prefabricated monolithic bridge supports at the stage of their construction [Uchet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya v sborno-monolitnykh oporakh mostov na stadii ikh sooruzheniya]. *Scientific and technical journal "Transport Construction"*. 2013. No 2. Pp. 11–13. (rus)
12. Bazhenov Yu.M. Technology of concrete [Tekhnologiya betona]. Moscow : Publishing house of the DIA. 2015. 528 p. (rus)
13. Lapidus A.A., Hubaev A.O., Abidov T.Kh., Topchiy D.V. Improvement of the concreting process of monolithic structures in the Arctic zone [Sovershenstvovaniye protsesssa betonirovaniya monolitnykh konstruksiy v usloviyakh arkticheskoy zony]. *Industrial and civil engineering*. 2024. No. 12. Pp. 9-16. DOI:10.33622/0869-7019.2024.12.09-16. (rus)
14. Passek V.V., Solovyanchik A.R. Methodology for studying the temperature regime of bridge span beams during heat and moisture treatment [Metodika issledovaniy temperaturnogo rezhima balok proletnykh stroyeniy mostov v protsesse teplovlazhnostnoy obrabotki]. *Collection of scientific papers of TSNIS "Temperature regime and issues of increasing the stability and durability of transport structures at BAM"*. 1980. Pp. 97-103. (rus)

15. Sokolov S.B. The influence of air temperature fluctuations in greenhouses on the temperature of hardening concrete during the construction of monolithic slab-ribbed span structures in the cold season [Vliyaniye kolebaniy temperatury vozdukh na temperaturu tverdeyushchego betona pri vozvedenii monolitnykh plitno-rebristyykh proletnykh stroyeniy v kholodnyy period goda]. *Scientific works of OJSC TsNIIS "From hydraulic integrator to modern computers"*. 2002. No. 213. Pp.167–172. (rus)
16. Smirnov N.V., Antonov E.A. The role of concrete creep in the formation of the thermally stressed state of monolithic reinforced concrete structures during its construction [Rol polzuchesti betona v formirovaniy termonapryazhennogo sostoyaniya monolitnykh zhelezobetonnykh konstruksiy v protsesse eye vozvedeniya]. *Scientific works of JSC TSNIIS "From hydraulic integrator to modern computers"*. 2005. No. 213. Pp. 89-117. (rus)
17. Shifrin S.A., Tkachev A.V. Thermal interaction of hardening concrete and concrete base in conditions of solar radiation [Rol polzuchesti betona v formirovaniy termonapryazhennogo sostoyaniya monolitnykh zhelezobetonnykh konstruksiy v protsesse eye vozvedeniya]. *Proceedings of VNIIPITeploproekt*. 1985. Pp. 19-27. (rus)
18. Lukyanov V.S., Solovyanchik A.R. Physical basis for predicting the own thermally stressed state of concrete and reinforced concrete structures [Fizicheskiye osnovy prognozirovaniya sobstvennogo termonapryazhennogo sostoyaniya betonnykh i zhelezobetonnykh konstruksiy]. *Collection of scientific works of TsNIIS*. 1972. No. 73. Pp. 36–42. (rus)
19. Velichko V.P., Tsimerinov A.I. Methodology for predicting the thermally stressed state of cylindrical concrete massifs Metodika prognozirovaniya termonapryazhennogo sostoyaniya tsilindricheskikh betonnykh massivov]. *Collection of scientific papers of TSNIIS*. 1972. No. 73. Pp. 117-129. (rus)
20. Ginzburg A.V. Ensuring high quality and efficiency of work during the construction of tunnels made of monolithic concrete. Scientific and technical journal [Obespecheniye vysokogo kachestva i effektivnosti rabot pri vozvedenii tonneley iz monolitnogo betona]. *"Bulletin of MGSU"*. 2014. No. 1. Pp. 98–110. (rus)
21. Nesvetaev, G.V., Koryanova, Yu.I., Yazyev, B.M. Autogenous shrinkage and early cracking of massive foundation slabs. *Maazine of Civil Engineering*. 2024. № 17(6). Article No. 13005. DOI: 10.34910/MCE.130.5
22. Nesvetaev G.V., Koryanova Yu.I., Shut V.V. Taking into account the influence of additives on the heat dissipation of concrete in order to prevent early cracking of massive monolithic structures [Uchet vliyaniya dobavok na teplovydeleniye betona s tselyu predotvrashcheniya rannego reshchinoobrazovaniya massivnykh monolitnykh konstruksiy]. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024. Vol. 16. No. 6: 50SAVN624. (rus). Available at: <https://esj.today/PDF/50SAVN624.pdf>
23. Pulyaev I.S., Pulyaev S.M. Consideration of the temperature factor of hardening concrete during the construction of transport infrastructure facilities [Uchet temperaturnogo faktora tverdeyushchego betona pri vozvedenii obyektov transportnoy infrastruktury]. *Bulletin of VSGUT*. 2020. No. 4 (79). Pp. 92-100. (rus)
24. Pulyaev I.S., Pulyaev S.M. Accounting for the intrinsic thermally stressed state of hardening concrete while ensuring the required consumer properties of the Crimean bridge structures [Uchet sobstvennogo termonapryazhennogo sostoyaniya tverdeyushchego betona pri obespechenii trebuyemykh potrebitelskikh svoystv konstruksiy krymskogo mosta]. *Bulletin of the Siberian State Automobile and Road University*. 2018. Vol. 15.No. 5 (63). Pp. 742-759. (rus)
25. Travush V.I., Nikiforov S.V. Technology of concreting massive structures of the foundations of the Lakhta Center multifunctional complex [Tekhnologiya betonirovaniya massivnykh konstruksiy fundamentov zdaniy MFK «Lakhta Tsentr»). *Building and Reconstruction*. 2025. No. 2. Pp. 44-55. (rus.) <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2025-118-2-44-55>
26. Eliseev V.V. Mechanics of a deformable solid [Mekhanika deformiruemogo tvordogo tela.]. S.-P(b), 2006, 231 p. (rus)
27. Fedosov S., Pulyaev I., Aleksandrova O., Cherednichenko N., Derbasova E., Lezhnina Yu. Thermophysical processes in hardening concrete as a factor for quality assurance of erected reinforced concrete structures of transport facilities. *Architecture and Engineering*. 2024. Vol. 9. No. 4. Pp. 75-86.
28. Vasiliev A.I., Veitsman S.G. Modern trends and problems of domestic bridge construction [Sovremennyye tendentsii i problemy otechestvennogo mostostroyeniya]. *Scientific and technical journal "Bulletin of Bridge Engineering"*. 2015. No. 1. Pp. 2-17. (rus)
29. Balyuchik E.A., Cherny K.D. Increasing the crack resistance of monolithic concrete bridge supports by constructive methods [Povysheniye treshchinostoykosti opor mostov iz monolitnogo betona konstruktivnymi metodami]. *Collection of scientific papers of TSNIIS*. 2010. No. 257. Pp. 49-57. (rus)
30. Lykov A.V., Mikhailov Yu.A. Theory of heat and mass transfer [Teoriya teplo- i massoperenosa]. Moscow: Gosenergoizdat. 1963, 536 p. (rus)
31. Fedosov S.V., Bakanov M.O., Fedoseev V.N. Methods of the theory of thermal conductivity in application to the problems of modeling the processes of drying and heat treatment of solid materials [Metody teorii teploprovodnosti v prilozhenii k zadacham modelirovaniya protsessov sushki i termicheskoy obrabotki tverdyykh materialov]. Moscow - Vologda, Infra-Engineering, 2024, 212 p. (rus)
32. Lykov A.V. Theoretical foundations of building thermophysics [Teoreticheskiye osnovy stroitelnoy teplofiziki]. Publishing House of the Academy of Sciences of the BSSR, 1961, 525 p. (rus)

**Информация об авторах**

**Федосов Сергей Викторович**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия,  
академик РААСН, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Технологии и организация строительного производства»,  
E-mail: [fedosov-academic53@mail.ru](mailto:fedosov-academic53@mail.ru)

**Пуляев Иван Сергеевич**

ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Россия,  
канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой «Промышленное, гражданское и подземное строительство»,  
E-mail: [ivanes50@mail.ru](mailto:ivanes50@mail.ru)

**Александрова Ольга Владимировна**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия,  
канд. техн. наук, доц., доц. кафедры «Технологии и организация строительного производства»,  
E-mail: [aleks\\_olvl@mail.ru](mailto:aleks_olvl@mail.ru)

**Митягина Анастасия Николаевна**

ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Россия,  
аспирант кафедры «Промышленное, гражданское и подземное строительство»,  
E-mail: [raschetiv@gmail.com](mailto:raschetiv@gmail.com)

**Information about authors**

**Fedosov Sergey V.**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering", Moscow, Russia,  
Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), doctor in tech. sc., prof.,  
prof. of the dep. of Technology and Organization of Construction Production,  
E-mail: [fedosov-academic53@mail.ru](mailto:fedosov-academic53@mail.ru)

**Pulyaev Ivan S.**

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia,  
candidate in tech. sc., docent, Head of the dep. of Industrial, Civil and Underground Construction,  
E-mail: [ivanes50@mail.ru](mailto:ivanes50@mail.ru)

**Aleksandrova Olga V.**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering", Moscow, Russia,  
candidate in tech. sc., docent, Associate Prof. of the dep. of Technology and Organization of Construction Production,  
E-mail: [aleks\\_olvl@mail.ru](mailto:aleks_olvl@mail.ru)

**Mityagina Anastasia N.**

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia,  
postgraduate student of the dep. of Industrial, Civil and Underground Construction,  
E-mail: [raschetiv@gmail.com](mailto:raschetiv@gmail.com)

Статья поступила в редакцию 30.05.2025  
Одобрена после рецензирования 23.07.2025  
Принята к публикации 13.08.2025

The article was submitted 30.05.2025  
Approved after reviewing 23.07.2025  
Accepted for publication 13.08.2025