



УДК 69.07

DOI: 10.22227/2949-1622.2026.1.46-52

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH ARTICLE

Тепло- и массоперенос при зимнем бетонировании плитного фундамента

А.М. Ибрагимов*

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Российская Федерация

*IbragimovAM@mgsu.ru

Ключевые слова: тепло- и массоперенос, граничные условия, зимнее бетонирование, термодиффузия, метод термоса, теплопотери

История статьи

Поступила в редакцию: 25.01.2026

Доработана: 08.02.2026

Принята к публикации: 10.02.2026

Для цитирования

Ибрагимов А.М. Тепло- и массоперенос при зимнем бетонировании плитного фундамента // Железобетонные конструкции. 2026. Т. 13. № 1. С. 46–46-52.

Аннотация. Работы по монолитному бетонированию ведутся круглогодично. Одной из проблем является ведение строительных работ в зимний период года, а именно влияние отрицательных температур на процесс твердения бетона в конструкции. Это связано с тем, что вода затвердения, не вступившая в реакцию с цементом, замерзает, увеличиваясь при этом в объеме на 9 %. В результате этого в бетоне возникают внутренние напряжения, приводящие к нарушению его структуры. В статье осуществлена постановка задачи определения температурных и массовых полей в плоской монолитной железобетонной конструкции в условиях зимнего бетонирования. Приведены исходные уравнения тепло-массопереноса и граничные условия, с помощью которых возможно моделирование восьми вариантов реальных ситуаций, возникающих при бетонировании.

Heat and Mass Transfer Processes during Winter Concreting of a Slab Foundation

А.М. Ibragimov*

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russian Federation

*IbragimovAM@mgsu.ru

Александр Майорович Ибрагимов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металлических и деревянных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus: 57189524528, ResearcherID: AFN-6830-2022, ORCID: 0000-0003-3761-9213, E-mail: IbragimovAM@mgsu.ru

© Ибрагимов А.М., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Keywords: heat and mass transfer, boundary conditions, winter concreting, thermal diffusion, thermos method, heat loss

Article history

Received: 25.01.2026

Revised: 08.02.2026

Accepted: 10.02.2026

For citation

Ibragimov A.M. Heat and Mass Transfer Processes during Winter Concreting of a Slab Foundation. *Reinforced Concrete Structures*. 2026; 1(13):46-52.

Abstract. Monolithic concreting works are carried out year-round. One of the challenges is construction work in the winter season, specifically the effect of subzero temperatures on the concrete hardening process in the structure. This is because the mixing water that has not reacted with the cement freezes, expanding in volume by 9 %. As a result, internal stresses arise in the concrete, leading to a disruption of its structure. This article presents the problem of determining temperature and mass fields in a flat monolithic reinforced concrete structure during winter concreting. The initial heat and mass transfer equations and boundary conditions are presented, allowing for the modeling of eight real-world situations that arise during concreting. During operation, building and structural systems may be subjected to various types of accidental actions, creating a risk of complete or partial collapse.

ВВЕДЕНИЕ

Наметившаяся в последние годы тенденция к увеличению строительства зданий и сооружений из монолитного бетона и железобетона ставит перед строительными организациями множество задач. Возведение зданий и сооружений из монолитного бетона и железобетона имеет несомненные преимущества (разнообразие архитектурных форм, гибкость объемно-планировочных решений, долговечность, надежность и т.д.). Работы по монолитному бетонированию ведутся круглогодично. Одной из проблем является ведение строительных работ в зимний период года, а именно влияние отрицательных температур на процесс твердения бетона в конструкции [1–6]. Это связано с тем, что вода затворения, не вступившая в реакцию с цементом, замерзает, увеличиваясь при этом в объеме на 9 %. В результате этого в бетоне возникают внутренние напряжения, приводящие к нарушению его структуры. При повышении температуры вода оттаивает и твердение бетона возобновляется, но структура связей уже нарушена. Кроме того, в результате замораживания снижается сцепление арматуры и зерен заполнителя с цементным камнем вследствие образования на их поверхности ледяных корок. Это ведет к недобору прочности бетоном в установленные нормами сроки. Для исключения негативных последствий при зимнем бетонировании применяют различные способы интенсификации твердения бетона, такие как: предварительный разогрев бетонной смеси, разного рода добавки и модификаторы, термосное выдерживание бетона, различные тепловые воздействия: тепловая обработка бетона путем прогрева греющими изолированными проводами, тепловая обработка с применением наружных источников тепла, форсированный электроразогрев бетона в конструкциях, тепловая обработка путем электродного прогрева, использование термоактивной опалубки и т.п.

Только контроль параметров на всех стадиях процесса твердения бетона в монолитной конструкции может обеспечить надлежащее ее качество и, следовательно, долговечность. Математическое моделирование позволяет на стадии проектирования рассчитать температурные и массовые поля по толщине конструкции на любой стадии твердения и задать параметры процесса. Непосредственно при бетонировании и последующем твердении необходимо осуществлять мониторинг параметров процесса. При возникновении разночтений между проектными параметрами и фактической ситуацией появляется возможность активно вмешиваться в процесс твердения, корректируя его и приводя к оптимальным параметрам твердения.

Alexander M. Ibragimov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Metal and Wooden Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus: 57189524528, ResearcherID: AFN-6830-2022, ORCID: 0000-0003-3761-9213, E-mail: IbragimovAM@mgsu.ru

МЕТОД

В качестве примера в данной работе рассматривается твердение монолитного фундамента с реальными размерами в плане $32\,730 \times 16\,130$ мм и высотой 1100 мм под шестнадцатизэтажное жилое здание (для рассматриваемого фундамента был поставлен натуральный эксперимент, который подробно описан в работе [7]).

Так как размер плитного фундамента по высоте гораздо меньше размеров в плане, то фундамент можно рассматривать как неограниченную пластину.

Возможны 8 вариантов условий при твердении бетона в теле фундамента (рис.).

В варианте 1 бетон уложен на основание (контактная поверхность I). Верхняя поверхность II открыта и контактирует с атмосферой окружающей среды. Набор прочности идет в естественных условиях за счет теплоты, выделяемой при гидратации цемента. Этот вариант соответствует случаю летнего бетонирования, когда имеются положительные температуры наружного воздуха и подготовленного основания. В зимний период года такой вариант неприемлем, так как значительная часть тепла уходит в окружающую среду и основание, однако этот вариант реален в промежуток времени с начала укладки бетонной смеси и до момента, когда поверхность бетона может выдержать вес человека или трапа.

Вариант 2 аналогичен варианту 1. Открытая поверхность бетона покрыта слоем утеплителя для предотвращения удаления тепла из тела бетона в атмосферу. Этот вариант представляет собой так называемый метод термоса, часто применяемый для бетонирования массивных конструкций с модулем поверхности $M_{\text{п}} \leq 5$ и среднесуточной температурой наружного воздуха ниже $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ [8].

В варианте 3 бетон уложен на основание. Прогрев конструкции осуществляется снизу. Это промежуточный вариант, моделирующий условия зимнего бетонирования в промежуток времени с момента завершения укладки бетона до момента укрытия свободной поверхности бетона утепляющим слоем для предотвращения теплопотерь (см. вариант 4).

Вариант 4 аналогичен варианту 3. Открытая поверхность бетона утеплена.

Вариант 5 аналогичен варианту 3, только прогрев конструкции осуществляется сверху. Это промежуточный этап для варианта 6.

Вариант 6 аналогичен варианту 5 с утепленной открытой поверхностью.

В седьмом варианте обогрев бетонной конструкции ведется с двух сторон.

Вариант 8 аналогичен варианту 7 с утепленной открытой поверхностью.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

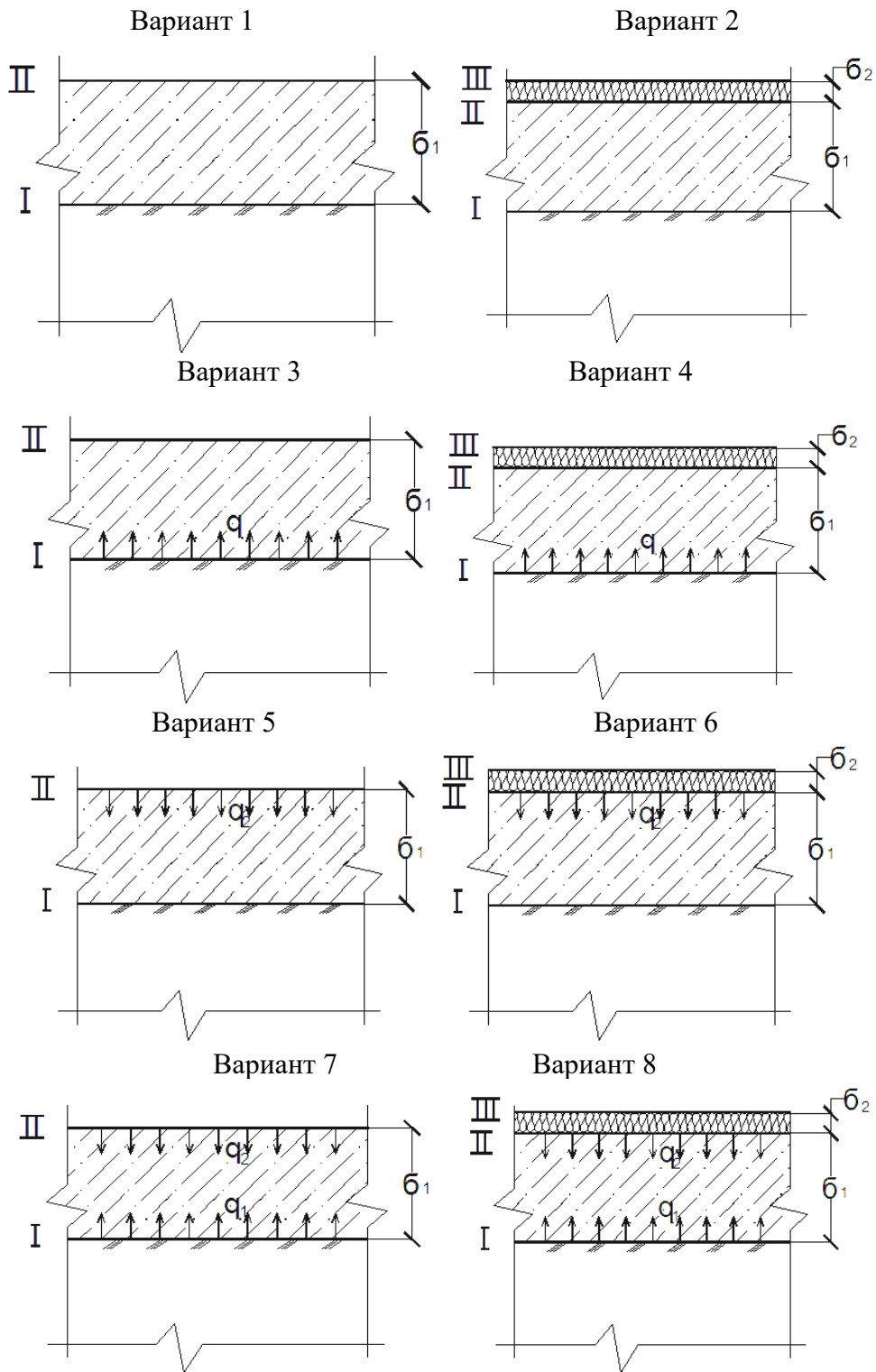
Для математического моделирования процессов, происходящих в теле фундамента, используем теорию тепло- и массопереноса А.В. Лыкова, Ю.А. Михайлова. В нижеприведенных формулах обозначения приняты согласно работам [9, 10].

Взаимосвязанный перенос теплоты и массы в твердом теле описывается системой уравнений в частных производных вида:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_q \nabla^2 t + \varepsilon r \frac{c_m}{c_q} \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + \frac{c_p k}{c_q \gamma_0} \nabla P \nabla t; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 \Theta + a_m \delta' \nabla^2 t + a_m \delta'' \nabla^2 P \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = a_p \nabla^2 P - \varepsilon \frac{c_m}{c_g} \frac{\partial \Theta}{\partial \tau}. \quad (3)$$



Варианты условий при твердении бетона в теле фундамента
Options for concrete hardening conditions in the foundation slab

Граничные условия на поверхности тела имеют вид:

$$-\lambda_q(\nabla t)_n + q_q(\tau) - (1 - \varepsilon)r q_m(\tau) = 0; \quad (4)$$

$$\lambda_m(\nabla \Theta)_n + \lambda_m \delta'(\nabla t)_n + \lambda_p(\nabla P)_n + q_m(\tau) = 0; \quad (5)$$

$$P_n = p = \text{const}. \quad (6)$$

Влияние эффекта бародиффузии для строительных конструкций мало, поэтому в инженерных расчетах им зачастую пренебрегают, тогда система (1)–(6) упрощается, так как из нее выпадает уравнение (3), условие (6) и третье слагаемое в выражении (5) обращается в ноль.

В частном случае, когда влияние эффектов термодиффузии и внутренних фазовых превращений пренебрежимо мало и основной перенос массы осуществляется посредством теплопроводности, в уравнениях (1) и (2) исчезают последние слагаемые правой части. Система уравнений взаимосвязанного тепло-массопереноса распадается на две самостоятельные задачи переноса теплоты и массы, которые описываются параболическими уравнениями теплопроводности.

Первый член выражения (4) $-\lambda_q(\nabla t)_n$ представляет собой количество тепла, поступившего с поверхности внутрь тела теплопроводностью; второй член $q_q(\tau)$ соответствует количеству тепла, подведенному к поверхности тела; третий член $(1 - \varepsilon)r q_m(\tau)$ представляет собой количество тепла, затраченного на испарение жидкости. Если испарение происходит только внутри тела ($\varepsilon = 1$), то третий член обращается в ноль, в физическом понимании к поверхности тела подводится только пар. При ($\varepsilon = 0$) к поверхности тела подводится только жидкость, испарение происходит только на поверхности тела. Выражение (5) представляет собой уравнение баланса массы вещества. Физический смысл состоит в том, что с поверхности тела в окружающую среду отводится поток массы влаги $q_m(\tau)$, а к поверхности тела влага подводится за счет градиентов потенциала массопереноса $\lambda_m(\nabla \Theta)_n$, теплопереноса $\lambda_m \delta'(\nabla t)_n$ и общего давления $\lambda_p(\nabla P)_n$. Выражение (6) представляет собой реально существующее равенство давления парогазовой смеси у поверхности тела и барометрического давления окружающей среды.

Если задать поток тепла $q_q(\tau)$ и влаги $q_m(\tau)$, то граничные условия (4) и (5) представляют собой граничные условия *второго рода*.

Если задать закон взаимодействия тела с влажным воздухом:

- закон Ньютона:

$$q_q(\tau) = \alpha_q(t_c - t_n); \quad (7)$$

- закон Дальтона:

$$q_m(\tau) = \alpha_m(\Theta_n - \Theta_c); \quad (8)$$

и подставить выражения (7) и (8) в условия (4) и (5), то получают граничные условия *третьего рода*.

Если коэффициенты теплообмена α_q и массообмена α_m большие, то из граничных условий третьего рода получают граничные условия *первого рода*.

Граничные условия *четвертого рода* отражают собой идеальный тепловой и массовый контакт соприкасающихся поверхностей:

$$t_i = t_{i+1}, \Theta_i = \Theta_{i+1}; \quad (9)$$

$$-\lambda_{qi}(\nabla t)_{ni} = -\lambda_{q(i+1)}(\nabla t)_{n(i+1)}, (q_{mi})_n = q_{m(i+1)n} \quad (10)$$

Равенства (9) представляют собой равенство потенциалов тепло- и массопереноса на границе стыка i и $i + 1$ слоя, а равенства (10) — равенство потоков тепла и влаги.

Уравнения тепло- и массопереноса для одномерной системы выведены в работе [10] и имеют вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_q \nabla^2 t + \frac{\varepsilon r}{c\gamma} \frac{\partial u}{\partial \tau}; \quad (11)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 u + a_m \delta \nabla^2 t. \quad (12)$$

В работе [10] на основе теоремы подобия Кирпичева — Гухмана [11, 12] уравнения (11) и (12) записаны в безразмерных переменных и для неограниченной пластины в обозначениях [10] имеют вид:

$$\frac{\partial T(\bar{x}, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T(\bar{x}, Fo)}{\partial \bar{x}^2} - Ko^* \frac{\partial \Theta(\bar{x}, Fo)}{\partial Fo}; \quad (13)$$

$$\frac{\partial \Theta(\bar{x}, Fo)}{\partial Fo} = Lu \frac{\partial^2 \Theta(\bar{x}, Fo)}{\partial \bar{x}^2} - LuPn \frac{\partial^2 T(\bar{x}, Fo)}{\partial \bar{x}^2}. \quad (14)$$

При постановке начальных и граничных условий можно получить аналитические решения уравнений (13) и (14) для каждого из рассматриваемых восьми вариантов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье осуществлена постановка задачи определения температурных и массовых полей в плоской монолитной железобетонной конструкции в условиях зимнего бетонирования. Приведены исходные уравнения тепломассопереноса и граничные условия, с помощью которых возможно моделирование восьми вариантов реальных ситуаций, возникающих при бетонировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миронов С.А. Теория и методы зимнего бетонирования. Изд. 3-е, перераб. и доп. М. : Стройиздат, 1975. 700 с.
2. Баженов Ю.М. Технология бетона. М. : Издательство АСВ, 2002. 500 с.
3. Арбеньев А.С. Технология бетонирования с электрообогревом смеси. М. : Стройиздат, 1975. 108 с.
4. Головнев С.Г. Оптимизация методов зимнего бетонирования. Л. : Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1983. 235 с.
5. Тамразян А.Г., Мешков В.Р., Геращенко В.С., Гришин А.С. Аппроксимация теплофизических свойств бетона для решения нелинейной задачи теплопроводности железобетонных конструкций в условиях пожара // Вестник МГСУ. 2025. № 20 (8). С. 1135–1153.
6. Тамразян А.Г. Бетон и железобетон — взгляд в будущее // Вестник МГСУ. 2014. № 4. С. 181–189.
7. Федосов С.В., Ибрагимов А.М., Редькина А.С., Нестеров С.А. Контроль тепловых процессов, происходящих в теле монолитной железобетонной конструкции при зимнем бетонировании // Строительные материалы. 2010. № 3. С. 40–42.
8. Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях / под ред. Б.А. Крылова, С.А. Амбарцумяна, А.И. Звездова. М., 2005. 275 с.
9. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М. : Изд-во «Высшая школа», 1967. 600 с.
10. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. М.–Л. : Госэнергоиздат, 1963. 536 с.
11. Гухман А.А. Физические основы теплопередачи. М. : ОНТИ, 1934.
12. Кирпичев М.В., Конаков П.К. Математические основы теории подобия. М. : Госэнергоиздат, 1949.

REFERENCES

1. Mironov S.A. *Theory and Methods of Winter Concreting*. 3rd ed., revised and expanded. Moscow, Stroyizdat, 1975; 700. (in Russian).

2. Bazhenov Yu.M. *Concrete Technology*. Moscow, ASV Publishing House, 2002; 500. (in Russian).
3. Arbenyev A.S. *Technology of Concreting with Electric Heating of the Mixture*. Moscow, Stroyizdat, 1975; 108. (in Russian).
4. Golovnev S.G. *Optimization of Winter Concreting Methods*. Leningrad, Stroyizdat, Leningrad Branch, 1983; 235. (in Russian).
5. Tamrazyan A.G., Meshkov V.R., Gerashchenko V.S., Grishin A.S. Approximation of Thermophysical Properties of Concrete for Solving the Nonlinear Heat Conduction Problem of Reinforced Concrete Structures under Fire Conditions. *Vestnik MGSU*. 2025; 20(8):1135-1153. (in Russian).
6. Tamrazyan A.G. Concrete and Reinforced Concrete — A Look into the Future. *Vestnik MGSU*. 2014; 4:181-189. (in Russian).
7. Fedosov S.V., Ibragimov A.M., Redkina A.S., Nesterov S.A. Control of Thermal Processes Occurring in the Body of a Monolithic Reinforced Concrete Structure during Winter Concreting. *Construction Materials*. 2010; 3:40-42. (in Russian).
8. *Guide for Heating Concrete in Monolithic Structures*. Ed. by B.A. Krylov, S.A. Ambartsumyan, A.I. Zvezdov. Moscow, 2005; 275. (in Russian).
9. Lykov A.V. *Theory of Heat Conduction*. Moscow, Vysshaya Shkola Publishing House, 1967; 600. (in Russian).
10. Lykov A.V., Mikhailov Yu.A. *Theory of Heat and Mass Transfer*. Moscow – Leningrad, Gosenergoizdat, 1963; 536. (in Russian).
11. Gukhman A.A. *Physical Foundations of Heat Transfer*. Moscow, ONTI, 1934. (in Russian).
12. Kirpichev M.V., Konakov P.K. *Mathematical Foundations of Similarity Theory*. Moscow, Gosenergizdat, 1949. (in Russian).