



СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-3-313-321

EDN: OXPBRU

УДК 666.972.53

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Физико-математическое моделирование морозостойкости цементных бетонов

Л.М. Добшиц 

Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация

✉ levdobshits@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 1 марта 2023 г.

Доработана: 22 мая 2023 г.

Принята к публикации: 28 мая 2023 г.

Аннотация. Определяющим фактором возводимых из бетона и железобетона инженерных сооружений является недостаточная морозостойкость бетонов. Таким образом, актуальна задача выявления причин и предотвращения разрушения бетонов из-за мороза. Изложены основные положения разработанной физико-математической теории морозостойкости цементных бетонов. Рассмотрены процессы, протекающие при циклическом замораживании и оттаивании бетонов в водонасыщенном состоянии. Приведены результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований. На основе полученных результатов выведен критерий морозостойкости бетонов, оценивающий строение поровой структуры бетона. Представленный критерий имеет тесную корреляционную связь с морозостойкостью бетонов. Используя их взаимосвязь, предложен способ ускоренного определения фактической морозостойкости бетона, а также способ подбора составов бетонов на заданную проектную морозостойкость бетонов. Описаны способы ускоренного определения морозостойкости бетонов и пути ее повышения. С помощью разработанной физико-математической модели выполнено расчетное моделирование замораживания протяженной бетонной конструкции, которое позволило установить изменение влажности, температуры и давления в бетоне в процессе циклического замораживания и оттаивания на различных расстояниях от поверхности его замораживания и построить графики изменения этих параметров. Даны рекомендации по назначению проектных марок бетона по морозостойкости для различных элементов бетонных и железобетонных конструкций.

Ключевые слова: морозостойкость бетона, физическая модель, математическая модель, критерий морозостойкости, пути повышения морозостойкости, ускоренное определение морозостойкости, марка бетона

Для цитирования

Добшиц Л.М. Физико-математическое моделирование морозостойкости цементных бетонов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. Т. 19. № 3. С. 313–321. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-3-313-321>

Добшиц Лев Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры строительных материалов и технологий, Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-0057-2514; levdob-shits@yandex.ru

© Добшиц Л.М., 2023



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

Physical and mathematical modeling of frost resistance for cement concretes

Lev M. Dobshits 

Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation

✉ levdobshits@yandex.ru

Article history

Received: March 1, 2023

Revised: May 22, 2023

Accepted: May 28, 2023

For citation

Dobshits L.M. Physical and mathematical modeling of frost resistance for cement concretes. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2023;19(3):313–321. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-3-313-321>

Abstract. The key factor of engineering structures made of concrete and reinforced concrete is insufficient frost resistance of concretes. It is important to identify the causes and prevent concrete damage caused by frost. The research provides the basic points of the developed physical and mathematical theory of cement concretes frost resistance. Under consideration are the processes occurring during cyclic freezing and thawing of concrete in a water-saturated state. The results of the performed theoretical and experimental studies are presented. The criterion of concrete frost resistance, which estimates the pore structure of concrete, was derived on the basis of the obtained results. The suggested criterion has a close correlative relation with the frost resistance of concrete. Using this interrelation, the method was proposed for accelerated determination of actual frost resistance of concrete, as well as the method of selection concretes' compositions for a specified design frost resistance of concretes. The methods of accelerated determination of concrete frost resistance, as well as ways to increase it, are described. The developed physical and mathematical model was used to carry out computational modeling for freezing of an extended concrete structure. This made it possible to determine the changes in humidity, temperature, and pressure in concrete during cyclic freezing and thawing at different distances from the surface of its freezing and also draw graphs of changes in these parameters. The recommendations on assignment of concrete design grades by frost resistance for various elements of concrete and reinforced concrete structures are given.

Keywords: concrete frost resistance, physical model, mathematical model, criterion of frost resistance, ways to increase frost resistance, accelerated determination of frost resistance, concrete grade

1. Введение

В настоящее время проектирование и расчет транспортных, промышленных и гражданских сооружений ведется из условия, что их срок службы будет составлять десятки лет. Однако многие сооружения начинают разрушаться и требуют ремонта задолго до истечения расчетного срока их службы. Причина таких явления – низкая долговечность, обусловленная различными видами коррозионного разрушения материалов, элементов и конструкций сооружений. В связи с этим, сегодня во всем мире в области теоретического и практического материаловедения первостепенное внимание уделяется выявлению причин и предотвращению коррозионного разрушения строительных материалов для повышения их долговечности.

В современных условиях одними из основных конструкционных материалов для изготовления конструкций, зданий и сооружений являются бетон и железобетон; а одним из основных факторов, определяющих долговечность бетона, является его морозостойкость.

Исследованием этого свойства бетонов занимались многие отечественные и зарубежные ученые [1–13]. Были предложены различные теории, описывающие процессы, протекающие в структуре бетонов при его попеременном замораживании и оттаивании в водонасыщенном состоянии [1–4; 8; 10], и причины разрушения бетона. При этом большинство из них брали за основу какой-то один фактор, в связи с чем они не получали практического подтверждения при экспериментальных исследованиях.

В начале XX в. известным российским ученым Н.А. Житкевичем была предложена гипотеза о влиянии гидростатического давления воды при ее замерзании в порах цементного камня [1]. В дальнейшем эта гипотеза была развита О.Е. Власовым, Г.И. Горчаковым, Т. Пауэрсом и другими учеными [2; 3].

На основе этой теории в 40-х гг. XX в. Т. Пауэрсом была выдвинута теория гидравлического воздействия воды, находящейся в бетоне при его замораживании [4; 5]. Эта гипотеза исследовалась и развивалась в работах О.В. Кунцевича и его учеников [6; 7]. Одним из основных положений данной гипотезы является введение параметра «эффективного радиуса», то есть среднего расстояния между микропорами цементного камня бетона. Несмотря на то что эта теория учитывала основные причины разрушения бетонов при циклическом попеременном замораживании и оттаивании, расчет по «эффективному радиусу» не коррелировал с экспериментальными и практическими результатами. Такое несоответствие связано с тем, что указанная теория не учитывает миграцию воды через поры цементного камня без его разрушения [8], а сам параметр «эффективный радиус» рассчитывался по формулам, предложенным Б. Паскалем, которые применимы только к ламинарному течению жидкости, в то время как движение жидкости под действием растущих кристаллов льда является турбулентными и происходит циклически. Оно начинается при появлении определенной величины давления в поровой жидкости и прекращается после начала ее движения [9].

В начале 80-х гг. XX в. учеными Российского университета транспорта (МИИТ) была предложена физико-математическая теория морозостойкости цементных бетонов [10; 11]. Она основана на создании физической модели процессов, протекающих при циклическом замораживании и оттаивании бетонов в водонасыщенном состоянии, и построении на ее основе математического описания изменения состояния бетона. Модель позволяет физически ясно и обосновано описать происходящие изменения в структуре бетонов.

2. Физическая модель работы бетона при попеременном замораживании и оттаивании в водонасыщенном состоянии

В основу физической модели положено представление о бетоне как о пористом материале, все поры которого в основном сосредоточены в затвердевшем цементном камне. Все поры в бетоне, независимо от условий их образования, разделяются на два вида: поры интегральные $\Pi_{\text{и}}$, или открытые, которые могут заполняться жидкостью (водой) при погружении в нее бетона, и условно замкнутые поры $\Pi_{\text{уз}}$, которые в обычных условиях заполнены воздухом или паровоздушной смесью (рис. 1). Открытые поры соединены с условно замкнутыми порами тонкими капиллярами, имеющими высокий капиллярный потенциал. В связи с этим в обычных условиях жидкость из капиллярных пор в условно замкнутые поры перемещаться не может.

В начале замораживания бетона его температура начинает уменьшаться, становясь отрицательной. При этом в бетоне возникает градиент температур, и первой начинает замерзать вода, находящаяся в открытых (интегральных) порах $\Pi_{\text{и}}$, выходящих на поверхность бетона. Она переходит в лед, образуя ледяные пробки, запирающие эти поры и препятствующие выходу из них воды. Дальнейшее замораживание бетона приводит к увеличению объема льда в открытых (капиллярных) порах и возникновению в них гидростатического давления на стенки пор и оставшуюся не замерзшую часть поровой жидкости.

Если открытые поры целиком заполнены жидкостью и не сообщаются с условно замкнутыми порами, то при первом же замораживании начнется разрушение стенок пор, так как возникающее при этом давление превосходит прочность бетона на растяжение. Однако бетоны способны выдерживать большое число циклов попеременного замораживания и оттаивания без видимых разрушений и снижения прочности. Это обусловлено наличием в бетоне второго вида пор – условно замкнутых $\Pi_{\text{уз}}$, в которые, преодолевая капиллярный потенциал, может перемещаться (отжиматься) жидкость из интегральных пор, и в цементном камне не будет возникать растягивающих напряжений. Такие поры являются резервным, так как они представляют собой тот воздушный резерв объема бетона, в который может перемещаться увеличивающийся объем воды при ее переходе в лед.

При оттаивании обратное перемещение жидкости из условно замкнутых пор в открытые поры невозможно, так как они соединяются с открытыми порами и между собой тонкими капиллярами (порами цементного геля), потенциал которых много больше, чем капиллярный потенциал открытых пор.

При следующем цикле все описанные процессы повторяются, и так происходит до тех пор, пока весь объем этой условно замкнутой поры не будет заполнен жидкостью. Если эта пора не соединяется капиллярами с другими условно замкнутыми порами, то при очередном цикле замораживания начнется разрушение бетона. В случае, когда эта заполненная пора имеет соединение с другими условно замкнутыми порами, еще не заполненными жидкостью, то жидкость будет перемещаться в эти резервные поры и разрушение бетона не происходит. Таким образом, при циклическом замораживании в структуре бето-

на работает своеобразный механизм перемещения жидкости из интегральных в условно замкнутые поры. Когда в каком-то микрообъеме бетона все условно замкнутые поры будут заполнены жидкостью, и перемещаться ей будет некуда, следовательно замораживание приведет к началу разрушения бетона [10].

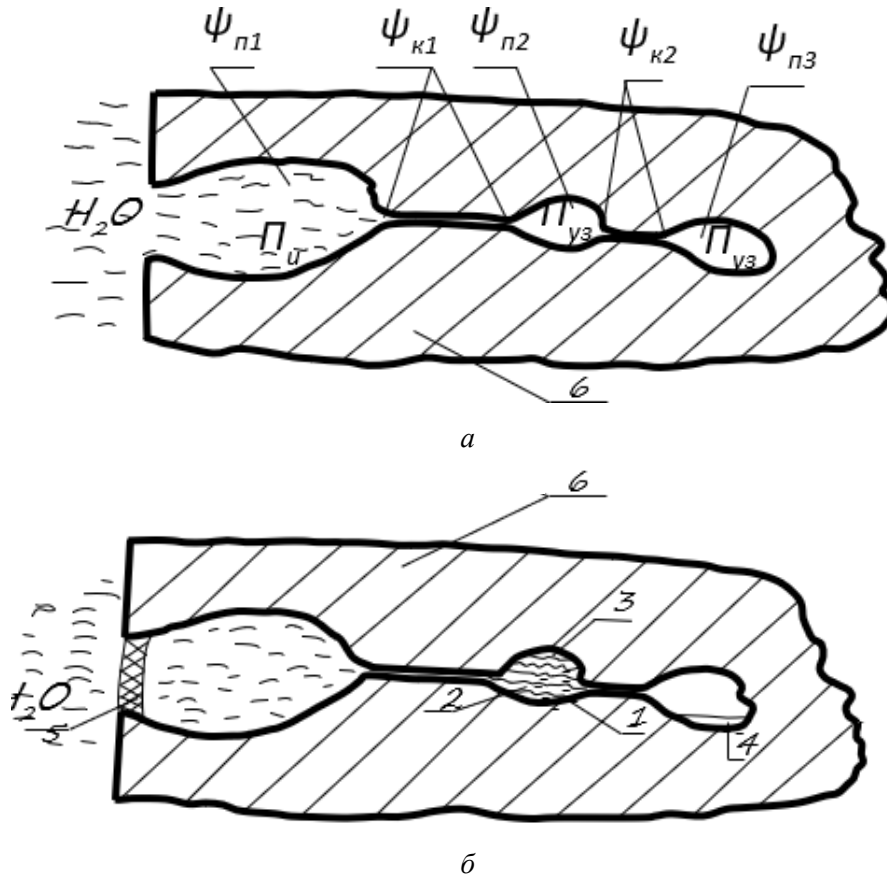


Рис. 1. Заполнение порового пространства бетона жидкостью при его замораживании и оттаивании: *a* – до замораживания; *б* – после *n*-го цикла замораживания; 1–4 – уровни заполнения условно замкнутых пор жидкостью после 1-го, 2-го, 3-го, ..., *n*-го цикла замораживания соответственно; $\psi_{n1}, \psi_{n2}, \psi_{n3}, \psi_{k1}, \psi_{k2}$ – капиллярные потенциалы пор и капилляров; 5 – ледяная пробка; 6 – бетон

Figure 1. Filling the pore space of concrete with liquid during its freezing and thawing: *a* – before freezing; *б* – after *n*th cycle of freezing; 1–4 – levels of filling conditionally closed pores with liquid after the 1st, 2^d, 3^d, ..., *n*th cycle of freezing; $\psi_{n1}, \psi_{n2}, \psi_{n3}, \psi_{k1}, \psi_{k2}$ – capillary potentials of the pores and capillaries; 5 – ice block; 6 – concrete; P_i – open pores; P_{uz} – nominally closed pores

Предлагаемая модель работы бетона позволяет объяснить различную кинетику и механизм разрушения высоко- и низкоморозостойких бетонов. На величину морозостойкости бетонов оказывает влияние целый ряд факторов, однако, как видно из вышесказанного, основным определяющим фактором является соотношение между объемами условно замкнутых P_{uz} и интегральных P_i пор. При этом морозостойкими будут те бетоны, у которых объем резервных условно замкнутых пор P_{uz} больше возможного приращения объема жидкой фазы, находящейся в интегральных порах бетона при его замерзании и равной $P_i \cdot 0,09$.

В связи с этим предложен критерий морозостойкости бетонов $K_{мрз}$, который описывается уравнением [9]

$$K_{мрз} = P_{uz} / 0,09 \cdot P_i.$$

Проведенные исследования [9] позволили установить, что между морозостойкостью бетонов и критерием морозостойкости существует тесная корреляционная связь (рис. 2), в связи с чем этот критерий может применяться для прогнозирования и ускоренного определения морозостойкости.

Используя установленную зависимость между предложенным критерием $K_{мрз}$ и морозостойкостью бетонов (рис. 2), возможно, во-первых, по экспериментально определенному значению величины $K_{мрз}$ ускоренно определять морозостойкость затвердевшего бетона, а во-вторых, подбирать состав бетонов на заданную проектную морозостойкость.

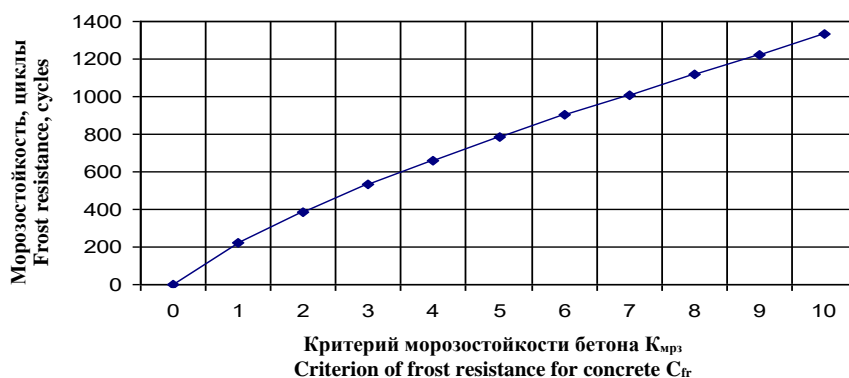


Рис. 2. Зависимость между морозостойкостью и критерием морозостойкости $K_{мрз}$ бетонов
 Figure 2. The dependency between frost resistance and the criterion of frost resistance C_{fr} for concretes.

3. Математическая модель работы бетона при попеременном замораживании и оттаивании в водонасыщенном состоянии

На основе изложенной физической модели процессов, протекающих при циклическом замораживании и оттаивании бетонов в водонасыщенном состоянии, разработана математическая модель описания изменения состояния бетона, позволяющая оценить происходящие изменения в структуре бетонов. При построении физико-математической модели были приняты следующие допущения. Предполагается, что вода, находящаяся в микропорах, обладает особыми свойствами и не замерзает при температурах $T > T_3$. Величина $T_3 < 0$ °C зависит от диаметра микропор и может иметь значение -65 °C и меньше. Начальная температура среды $T_0 \geq 0$ °C.

В начальный момент в бетоне температура равна $T_0 > 0$ °C, в частности $T_0 = +20$ °C. Предполагается, что процессы теплообмена между каркасом бетона и содержащим пор происходят намного быстрее, чем промерзание бетона, в силу чего температура в данной точке и в данный момент времени для них одинакова.

Все теплофизические характеристики, а также плотность воды и льда считаются постоянными. Цикл замораживания состоит в выдерживании водонасыщенного бетона при температуре T_0 , затем замораживании его при температуре $T = -T_0$ на воздухе, выдерживании его при этой температуре и последующем оттаивании при $T = T_0$ в воде, после чего цикл повторяется. Такие допущения могут быть приняты в связи с тем, что они аналогичны условиям испытания бетона на морозостойкость по первому базовому методу ГОСТ 10060–2012¹.

В начальный момент времени давление $P = p_0$, где p_0 – атмосферное давление, температура $T = T_0 > 0$ °C, влагосодержание в порах $\varphi = \varphi_0$. Замерзание воды происходит в фиксированном интервале температур (T_2, T_1) , где T_2 – температура на поверхности бетона, в области, где $T_3 < T_2 < T < T_1 = 0$, одновременно сосуществуют три фазы: лед, жидкость в капиллярах и паровоздушная смесь в порах. Предполагается, что вода в микропорах не замерзает при температурах $T > T_3$. Величина $T_3 < 0$ зависит от диаметра пор. Также предполагается, что капилляры всегда заполнены адсорбированной или гравитационной водой и фильтрация через капилляры осуществляется с начальным градиентом.

Таким образом, в области, где $T_3 < T_2 < T < T_1 = 0$ °C, сосуществуют три фазы: лед, паровоздушная смесь в порах и вода в микропорах и в тонком слое молекулярно-связанной воды на стенках пор. При этом замерзание воды, перешедшей из микропор в поры, происходит в фиксированном интервале температур $[T_1, T_2]$, $T_2 = T(0, t)$, где $x = 0$ – граница пористой среды. Вода в микропорах на поверхности пор соприкасается с пристеночным слоем связанной воды в порах, объем которой пренебрежимо мал по сравнению с объемом поры.

При оттаивании вода не мигрирует там, где исчезают достаточные градиенты давления, превышающие по модулю значение начального градиента, при котором возникает фильтрация. Следующие циклы замораживания – оттаивания приводят к дальнейшему увеличению φ и P в порах до тех пор, пока давление в порах P не превзойдет величины, при которой бетон начинает разрушаться.

¹ ГОСТ 10060–2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости. М.: Стандартинформ, 2018. 33 с.

Такие исходные данные и принятые допущения являются физически обоснованными. Они соответствуют условиям испытания бетона на морозостойкость по первому базовому методу ГОСТ 10060–2012.

Для описания процессов промерзания бетонов мы использовали модель, в основу которой положена известная задача Стефана для решения на плоскости. Для описания процесса циклического замораживания бетона мы приняли следующие основные законы и уравнениями. Закон сохранения массы к слою толщиной Δx за время t , уравнение баланса тепла для слоя толщиной Δx за время Δt в области, где $T_2 < T < T_1$. Фазовый переход жидкости в порах, влагосодержание которых ϕ , при $x = s + 0$ происходит только при прохождении нулевой изотермы. Для его учета либо в уравнение теплопроводности вводится дополнительное слагаемое, содержащее δ -функцию Дирака, либо применяется граничное условие на поверхности сопряжения $s = s(t)$, на которой $T = T_1$, записав для этой поверхности условие Стефана в виде

$$\lambda_0 \partial T / \partial x \Big|_{s+0} - \lambda_0 \partial T / \partial x \Big|_{s-0} = (\rho_B \phi r) ds / dt.$$

При этом направление оси X перпендикулярно поверхности бетона и обратно движению теплового потока. Точка s расположена на оси X и является перемещающейся границей раздела поверхности лед – вода. Таким образом, в случае условно замкнутых пор давление на границе области замерзания уменьшается скачкообразно, так же как плотность при фазовом переходе воды в лед. Для решения задачи также используются: закон Дарси для фильтрации с начальным градиентом, закон состояния парогазовой смеси, законы сохранения массы при фазовом переходе вода – лед в порах.

4. Результаты

Решение поставленной выше задачи возможно лишь с помощью численных методов, которые реализуются в виде разностной схемы. Она решается в варианте, когда рассматриваемый материал разбивается на умозрительные ячейки, в каждой из которых определенное значение энергии и воды. Эти две величины соответствуют потокам тепла и жидкости и поэтому должны полностью определять состояние вещества внутри ячеек, то есть температуры, влажности, давления и т. п.

Для проверки возможности использования предложенной физико-математической модели разрушения бетонов при циклическом замораживании – оттаивании проведены экспериментальные исследования и сравнение полученных расчетных данных с результатами испытания бетонов по основному методу по ГОСТ 10060–95². Результаты приведены в таблице. Они показывают полные корреляции результатов, полученных расчетным и экспериментальным способами. При этом такое совпадение получено как для бетонов низкой морозостойкости ($F 25$), так и высокой ($F 900$). Разница в результатах для морозостойкости $F 50$ – 900 составляет не более 4–5 %. Такая хорошая сходимость результатов свидетельствует о возможности практического использования предлагаемого метода для ускоренного прогнозирования морозостойкости без проведения циклического замораживания и оттаивания.

Методы определения морозостойкости бетона и результаты

Метод определения	Морозостойкость бетона или число циклов до разрушения					
	25	50	100	300	500	900
По основному методу ГОСТ 10060–95	25	50	100	300	500	900
По предлагаемой математической модели	20	48	95	310	520	940

Methods for determining the frost resistance of concrete and the results

Method of determination	Frost resistance of concrete or the number of cycles before failure					
	25	50	100	300	500	900
According to the main method of GOST 10060–95	25	50	100	300	500	900
According to the proposed mathematical model	20	48	95	310	520	940

² ГОСТ 10060–95. Бетоны. Методы определения морозостойкости. М., 1997. 19 с.

С помощью физико-математической модели выполнено расчетное моделирование замораживания протяженной бетонной конструкции. Для этого в результате расчета определялись относительные значения температуры $U = (T_0 - T) / (T_0 - T_2)$, влажности $\Phi = \varphi/\mathfrak{M}$ и давления $Pa = 0,1P/P_0$ в структуре бетона, где T – текущая температура, $T_0 = +20\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = -20\text{ }^\circ\text{C}$; φ – влажность; \mathfrak{M} – пористость бетона; P – давление в бетоне; P_0 – атмосферное давление. Анализ выполненных до этого расчетов по описанной модели показал, что для бетонов (как низкой, так и высокой морозостойкости) изменение влажности и давления в начале и в конце (перед разрушением) циклического замораживания имеет идентичный характер, а разница заключается в продолжительности среднего периода, когда структура бетона может без разрушения воспринимать возникающие напряжения.

В связи с этим для сокращения времени счета принимался бетон низкой морозостойкости и повышалась суровость испытаний путем увеличения времени замораживания и оттаивания до 12 ч каждое. Полученные результаты приведены на рис. 3 и 4.

Анализ результатов моделирования позволяют сделать следующие выводы.

Влагосодержание и давление в бетоне вначале испытаний практически не меняются по его сечению. Однако затем начинают возрастать, принимая вид трапеции с широким нижним основанием. При этом внутренняя часть бетона все больше насыщается влагой, а давление в ней непрерывно растет.

Влажность бетона в процессе циклического замораживания растет непрерывно, достигая величины 90–95 % к моменту разрушения. В процессе циклического замораживания и оттаивания температура бетона на его поверхности и на расстоянии до 20 см от поверхности повторяет колебания температуры среды, в которой находится бетон. На расстоянии более 25 см колебания температуры происходят с очень небольшой амплитудой, оставаясь после 8–10 цикла все время в области отрицательных температур, в связи с чем колебаний температуры с переходом через $0\text{ }^\circ\text{C}$ не происходит. В дальнейшем была построена пространственная физико-математическая модель протекающих процессов, расчеты по которой подтвердили результаты, полученные при решении плоской задачи.

Таким образом, можно рекомендовать назначение более низкой проектной марки по морозостойкости бетонов для внутренних слоев массивных конструкций.

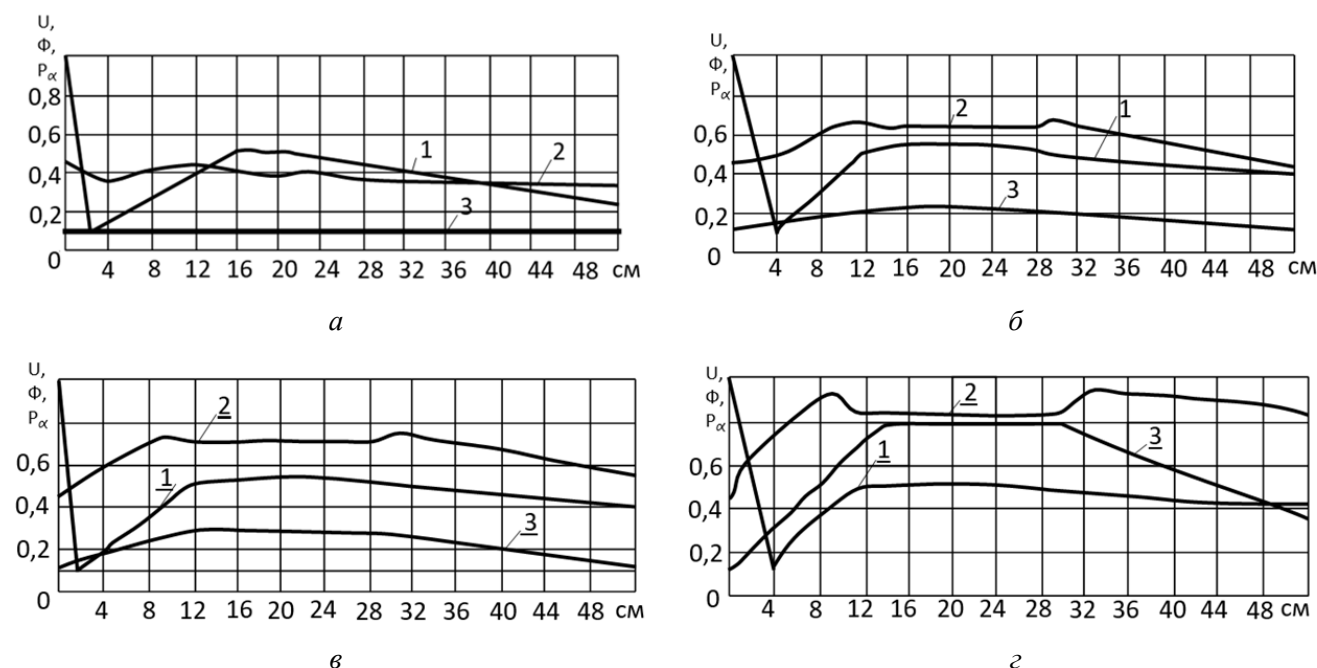


Рис. 3. Кривые изменения относительных величин (1 – температуры U ; 2 – влагосодержания Φ ; 3 – давления Pa) в зависимости от числа циклов замораживания и оттаивания:

a – перед 5 циклом; $б$ – перед 11 циклом; $в$ – перед 16 циклом; $г$ – перед 19 циклом

Figure 3. Curves of changes the relative values (1 – temperature U ; 2 – moisture content Φ ; 3 – pressure Pa) depending on the number of cycles of freezing and thawing:

a – before the 5th cycle; $б$ – before the 11th cycle; $в$ – before the 16th cycle; $г$ – before the 19th cycle

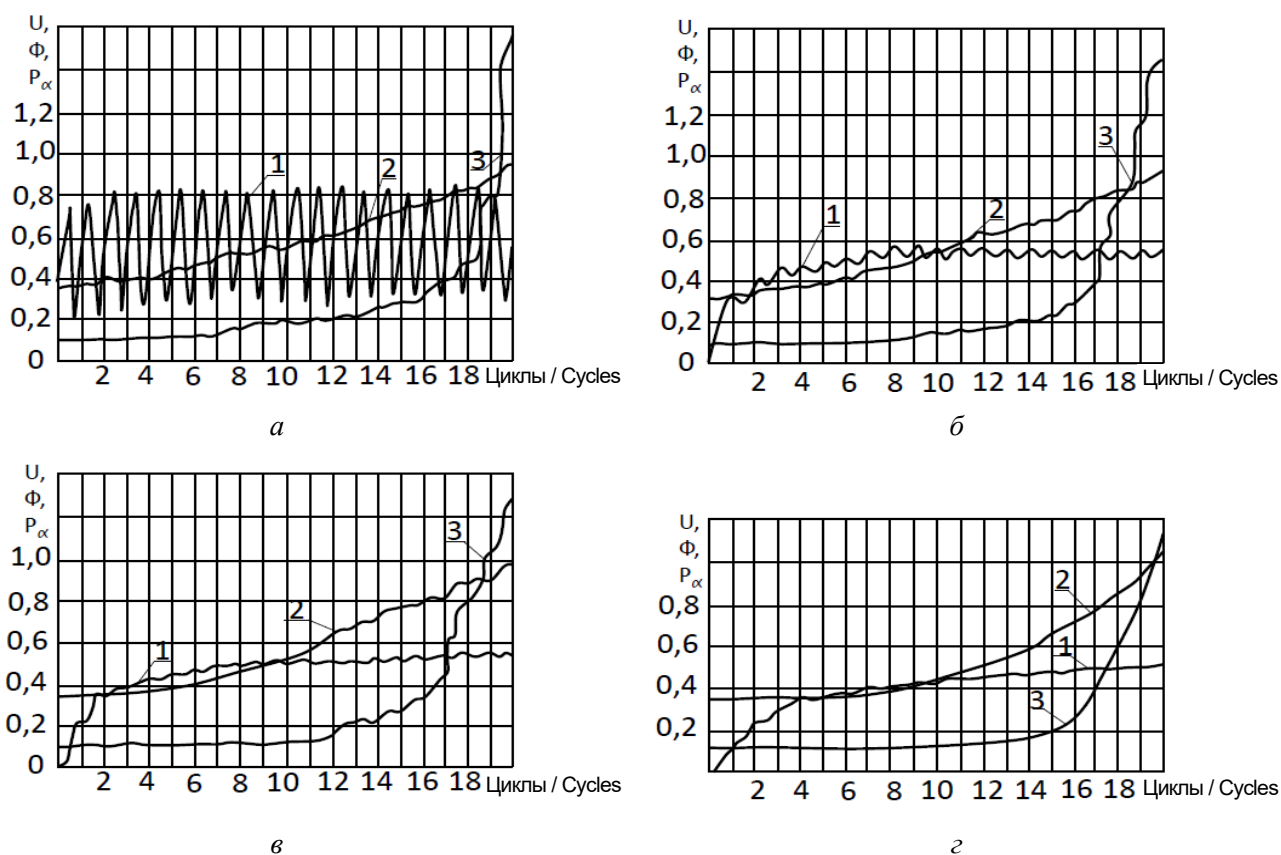


Рис. 4. Кривые изменения относительных величин (1 – температуры U ; 2 – влагосодержания Φ ; 3 – давления P_{α}) от числа циклов замораживания и оттаивания по глубине бетона на расстоянии от поверхности бетона:
 a – 6 см; $б$ – 20 см; $в$ – 30 см; $з$ – 40 см

Figure 4. Curves of changes the relative values (1 – temperature U ; 2 – water content Φ ; 3 – pressure P_{α}) on the number of freeze and thaw cycles by the depth of concrete at a distance from the concrete surface:
 a – 6 cm; $б$ – 20 cm; $в$ – 30 cm; $з$ – 40 cm

5. Заключение

Разработана физико-математическая модель процессов, протекающих при циклическом замораживании и оттаивании бетонов, позволяющая физически ясно и обосновано описать происходящие изменения в структуре бетонов.

На основе физико-математической модели процессов, протекающих при циклическом замораживании и оттаивании бетонов, предложен критерий морозостойкости $K_{\text{мрз}}$, который имеет тесную корреляционную зависимость с фактической морозостойкостью бетонов. Это дает возможность ускоренно прогнозировать морозостойкость изготовленных бетонов без проведения длительных испытаний.

Разработанная физико-математическая модель имеет большой практически выход. Она позволяет обосновано назначать проектные марки по морозостойкости бетонов, подбирать составы бетонов на заданную морозостойкость, определять минимально необходимый расход цемента на 1 м³ бетона для обеспечения проектной морозостойкости, предложить пути ухода за бетоном в процессе его эксплуатации, что увеличивает на 3–4 марки его морозостойкость.

Список литературы

1. Житкевич Н.А. Бетон и бетонные работы. СПб., 1912. 524 с.
2. Власов О.Е. Физические основы теории морозостойкости // Труды НИИ Стройфизика. 1967. Вып. 3. С. 163–178.
3. Горчаков Г.И., Капкин М.М., Скрамтаев Б.Г. Повышение морозостойкости бетона промышленных и гражданских сооружений. М.: Стройиздат, 1965. 195 с.
4. Powers T.C. The air requirement of frost resistance concrete // Highway Research Board Proceedings. 1949. Vol. 29. Pp. 184–209. URL: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbproceedings/29/29-010.pdf> (accessed: 22.02.2023).

5. Powers T.C., Brownyard T.L. *Studies of the physical properties of hardened portland cement paste*. Skokie: Portland Cement Association, 1947. Bull. 22. 892 p.
6. Кунцевич О.В. Бетоны высокой морозостойкости для сооружений Крайнего Севера. Л.: Стройиздат, 1983. 131 с.
7. Кунцевич О.В., Магомедэминов И.И. Исследование прочности и морозостойкости растворов с комплексными добавками // Повышение долговечности бетона транспортных сооружений: межвузовский сборник научных трудов. М.: МИИТ, 1980. Вып. 662. С. 26–34.
8. Москвин В.М. Коррозия бетона. М.: Стройиздат, 1952. 341 с.
9. Шейкин А.Е., Добшиц Л.М. О связи критерия морозостойкости с реальной морозостойкостью бетонов // Бетон и железобетон. 1981. № 1. С. 19–20.
10. Шейкин А.Е., Добшиц Л.М. Цементные бетоны высокой морозостойкости. Л.: Стройиздат, 1989. 128 с.
11. Добшиц Л.М. Долговечность бетонов транспортных сооружений и пути ее повышения // Технологии бетонов. 2014. № 4 (93). С. 32–36.
12. Шейкин А.Е., Добшиц Л.М., Баранов А.Т. Критерии морозостойкости ячеистых бетонов автоклавного твердения // Бетон и железобетон. 1986. № 5. С. 31–32.
13. Добшиц Л.М., Николаева А.А. Повышение стойкости бетонов к действию окружающей среды // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2019. № 3. С. 18–27. <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2019.3.18>

References

1. Zhitkevich N.A. *Concrete and works with concrete*. St. Petersburg; 1912. (In Russ.)
2. Vlasov O.E. Physical foundations of the frost resistance theory. *Trudy NII Strojfizika*. 1967;(3):163–178. (In Russ.)
3. Gorchakov G.I., Kapkin M.M., Skramtaev B.G. *Increasing the frost resistance of concrete for industrial and civil structures*. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1965. (In Russ.)
4. Powers T.C. The air requirement of frost resistance concrete. *Highway Research Board Proceedings*. 1949;29:184–209. Available from: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbproceedings/29/29-010.pdf> (accessed: 22.02.2023).
5. Powers T.C., Brownyard T. *Studies of the physical properties of hardened portland cement paste* (bull. 22.). Skokie: Portland Cement Association; 1947.
6. Kuncovich O.V. *Concretes with high frost resistance for structures in the Far North*. Leningrad: Stroyizdat Publ.; 1983. (In Russ.)
7. Kuncovich O.V., Magomedehminov I.I. *Study of strength and resistance to frost of mortars with complex additives*. Moscow: MIIT; 1980. (In Russ.)
8. Moskvin V.M. *Corrosion of concrete*. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1952. (In Russ.)
9. Shejkin A.E., Dobshic L.M. On the relationship between the frost resistance criterion and the real frost resistance of concretes. *Beton i Zhelezobeton*. 1981;(1):19–20. (In Russ.)
10. Shejkin A.E., Dobshic L.M. *Cement concretes with high frost resistance*. Leningrad: Stroyizdat Publ.; 1989. (In Russ.)
11. Dobshits L.M. Durability of transport structures concrete and ways of its improvement. *Concrete Technologies*. 2014;(4):32–36. (In Russ.)
12. Shejkin A.E., Dobshic L.M., Baranov A.T. Criteria of frost resistance for cellular concrete of autoclaved curing. *Beton i Zhelezobeton*. 1986;(5):31–32. (In Russ.)
13. Dobshits L.M., Nikolaeva A.A. Increasing the resistance of concretes to environmental factors. *Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies*. 2019;(3):18–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2019.3.18>