УДК 691.327

Е.М. ЧЕРНЫШОВ[1], д-р техн. наук, академик РААСН (chem@vgasu.vrn.ru),
Г.С. СЛАВЧЕВА[1], д-р техн. наук (gslavcheva@yandex.ru); Л.В. КИМ[2], канд. техн. наук (kimlv2@yandex.ru)

[1] Воронежский государственный архитектурно-строительный университет (394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84)
[2] Инженерная школа Дальневосточного федерального университета (690922, г. Владивосток, ОПС Русский-2, ДВФУ, корп. 12)

О конструкционном потенциале структуры высокотехнологичных бетонов с учетом температурно-влажностных эксплуатационных состояний

Представлена обобщенная интерпретация механизма взаимосвязи прочности, закономерностей влажностного деформирования и морозостойкости бетонов с их температурно-влажностным состоянием. Представлена система структурных характеристик, влияющих на проявление и реализацию конструкционного потенциала материала. Обобщение результатов исследований позволило выявить взаимосвязь между параметрами состава и структурой высокотехнологичных бетонов и реализацией их конструкционного потенциала в различном температурно-влажностном состоянии.

Ключевые слова: высокотехнологичные бетоны, структура, прочность, влажностные деформации, морозостойкость.

E.M. CHERNYSHOV[1], Doctor of Sciences (Engineering), Academician of RAACS (chem@vgasu.vrn.ru),
G.S. SLAVCHEVA[1], Doctor of Sciences (Engineering) (gslavcheva@yandex.ru); L.V. KIM[2], Candidate of Sciences (Engineering) (kimlv2@yandex.ru)
[1] Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering (84, 20-letija Oktjabrja Street, 394006, Voronezh, Russian Federation)
[2] School of Engineering of the Far Eastern Federal University (Far Eastern Federal University, Housing 12, OPS Russian-2, Vladivostok, 690922, Russian Federation)

About Constructional Potential of High Performans Concretes Structures with Due Regard for Temperature-Humidity Operational Conditions

A generalized interpretation of the mechanism of interrelation of strength, regularities of humidity deformation and frost-resistance of concretes with their temperature-humidity state is presented. The system of structural characteristics influencing on the manifestation and realization of the structural potential of the material is also presented. The generalization of the study results makes it possible to reveal the interrelation between parameters of composition and structure of high performans concretes and the realization of their structural potential under various temperature-humidity conditions.

Keywords: high performans concretes, structure, strength, humidity deformations, frost-resistance.

К обсуждению предлагается материаловедческая проблема закономерностей поведения современных высокотехнологичных бетонов в эксплуатационном цикле, с которой прямо связаны вопросы реализации потенциала сопротивления их структуры разрушению при действии температурно-влажностных факторов среды в возникающих вариантах состояний материала в конструкциях.

Актуальность проблемы

На первый взгляд название публикации и ее ключевые слова не несут в себе ничего нового и оригинального и не являются чем-то достаточно актуальным и значимым. Действительно, проблема конструкционного потенциала бетонов как функции их температурно-влажностного состояния более полувека является предметом рассмотрений, исследований и разработок. Обобщенно это отражено в фундаментальных трудах специалистов по теории расчета, проектирования и применения строительных конструкций (труды С.В. Александровского, О.Я. Берга, В.М. Бондаренко, К.З. Галустова, Е.А. Гузеева, Ю.В. Зайцева, В.И. Ильинского, Н.И. Карпенко, Б.Д. Колотилкина, В.И. Колчунова, В.И. Морозова, В.М. Москвина, К.А. Пирадова, И.Е. Прокоповича, В.С. Федорова и др. [1–9]) и получило регламентацию в строительных нормах.

Принимая имеющиеся достижения в качестве базовых, вместе с тем акцентируем внимание на необходимости развития и актуальности формирования новых подходов к обозначенной проблеме. Обоснованность этого диктуется следующими обстоятельствами и соответствующими им положениями.

Первое и определяющее из них касается понятия «высокотехнологичные бетоны», к которым относятся

It is proposed to discuss the material science issue of behavior regularities of modern high performans concretes (HPC) during their operating cycle; problems of the realization of resistance potential of their structures to deterioration under the effect of temperature-humidity factors of environment in arising variants of the material condition in structures are directly connected with this issue.

Problem Statement and its actuality

At first glance, the title of the publication and its key words don't contain anything new and original and are not sufficiently actual and meaningful. Truly, the issue of structural potential of concretes, as a function of their temperature-humidity conditions, is the subject of consideration, research and development more than half a century. Generally, this has been reflected in the fundamental works of specialists on the theory of computation, design, and application of building structures (works by S.V. Alexandrovsky, O.Ya. Berg, V.M. Bondarenko, K.Z. Galustov, E.A. Guzeev, Yu.V. Zaytsev, V.I. Il'insky, N.I. Karpenko, B.D. Kolotilkin, V.I. Kolchunov, V.I. Morozov, V.M. Moskvin, K.A. Piradov, I.E. Prokopovich, V.S. Fedorov et. al. [1–9]) and got the reglamentation in building codes.

Taking the existing achievements as basic ones, along with it, we focus attention on the need for development and the relevance of the formation of new approaches to this problem. The validity of this is dictated by the following factors and regulations corresponding to them.

The first and defining of them is a term "high performans concretes". They are concretes on the basis of binders of low water demand, filled and fine-ground cements, fast hardening and especially fast hardening cements as well as super and hyper-plasticized, hyper-pressed, porous, superfine (powder), fiber-reinforced concretes and concretes of last genera-

бетоны на основе вяжущих низкой водопотребности, наполненных и тонкомолотых цементов, быстротвердеющих и особо быстротвердеющих цементов, а также бетоны супер- и гиперпластифицированные, гиперпрессованные, поризованные, высокодисперсные (порошковые), дисперсно-армированные, бетоны последних поколений, получаемые с введением в их состав микро- и наноразмерных структурных составляющих. Особенностью всех этих бетонов является то, что достигаемый на момент изготовления существенно более высокий уровень показателей конструкционных свойств (табл. 1) определяется принципиально отличной от традиционных бетонов структурой (табл. 2). Эта структура, формируемая на принципах механофизико-химической и нанохимической технологических платформ [10], характеризуется другим масштабно-размерным типом, более высокой энергетической неравновесностью и, как следствие, активным ее проявлением в эксплуатационных условиях, в том числе и прежде всего при действии температурно-влажностных факторов среды [11–13].

Повышенная активность структур связана с развитой площадью поверхности раздела фаз в нано-, микро- и мезомасштабном диапазоне строения бетона, особенностями размерно-геометрических параметров пористости с высокой объемной долей в ней нано- и микропор. Все это сильно меняет кинетические и энергетические параметры гигромеханики взаимодействия материала с водяным паром и водой в процессах адсорбции-десорбции, капиллярной конденсации, водонасыщения-обезвоживания [7–9, 13]. В целом создается другая картина баланса сил при изменении температурно-влажностных параметров материала и соответственно другая картина напряженно-деформированного состояния структуры высокотехнологичных бетонов в сравнении с традиционными классическими бетонами.

Учитывая вышеизложенное, наука и практика материаловедения должны быть готовы к проблемам применения (применимости) высокотехнологичных бетонов в нестандартных и экстремальных условиях эксплуатации конструкций из них, для чего необходимо знать особенности и закономерности механики реализации конструкционного потенциала их специфичной структуры.

В контексте обсуждения проблемы следует обратиться ко второму положению в ее постановке и обоснованности актуальности.

Это второе положение касается того, что осуществленные ранее исследования конструкционного потенциала бетонов базируются преимущественно на феноменологическом подходе, преследующем цель получения количественной информации о мере, степени влияния и коэффициентах изменения механических свойств бетона в различных температурно-влажностных его состояниях как квазиоднородной системы. Феноменологический подход с практической точки зрения вполне удовлетворяет специалистов по расчету и проектированию конструкций и сегодня, так как позволяет учитывать и нормировать влияние температурно-влажност-

Таблица 1
Table 1

Уровень конструкционных свойств традиционных и высокотехнологичных цементных бетонов [4]
Level of Structural Properties of Traditional and High Performans Cement Concretes [4]

Конструкционные свойства Structural Properties	Значения для бетонов Values for concretes	
	традиционных traditional	высокотехнологичных high performans
Средняя плотность, кг/м^3 Average density, kg/m^3	2250–2300	2400–2450
Предел прочности при сжатии, МПа Ultimate compressive strength, MPa	40–60	до 125–150
Модуль упругости, МПа Modulus of elasticity, MPa	(32–35)·10^3	(45–50)·10^3
Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа Ultimate tensile strength in bending, MPa	4,7–4,9	10,5–11,5
Отношение $R_{изг}/R_{сж}$ Ratio R_{bend}/R_{comp}	0,13–0,14	0,08–0,09
Коэффициент Пуассона Poisson's Ratio	0,20–0,21	0,14–0,15
Предел трещинообразования Limit of cracking	0,5–0,6	0,85–0,9
Предельная растяжимость, мм/м Ultimate elongation, mm/m	1,1–1,2	0,7–0,8
Критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IC}, МН/м$^{3/2}$ Critical stress intensity factor, K_{IC}, MN/m$^{3/2}$	0,85–0,95	0,7–0,8
Удельная энергия разрушения, Дж/м^2 Specific crushing energy, Joule/m^2	75–80	280–300

tions produced by introducing micro- and nano-sized structural components into their compositions.

The peculiarity of all these concretes is a higher level of their structural properties (Table 1) achieved by the moment of production which is characterized by the structure fundamentally different from traditional concretes (Table 2). This structure, formed on the principles of mechanical-physical-chemical and nano-chemical technological platforms [10], is characterized by a different scale- dimensional type, higher energy non-equilibrium and, as a consequence, by its active manifestation under operational conditions, including primarily under the effect of temperature-humidity environmental factors [11–13].

The increased activity of structures is associated with the developed area of the phase interface within the nano-, micro- and meso-scale range of the concrete structure, peculiarities of dimension-geometric parameters of porosity with a high volume fraction of nano- and micro-pores in it.

All this strongly changes the kinetic and energetic parameters of hygromechanics of interaction of the material with water steam and water in the processes of adsorption and desorption, capillary condensation, water saturation-dehydration [7–9, 13]. In general, there is a different picture of the force balance when changing the temperature-humidity parameters of the material and, correspondingly, a different picture of the stress-strain state of structures of high performans concretes in comparison with traditional classical concretes.

Having in mind above mentioned, the science and practice of the materiology should be ready for problems of the application (applicability) of high performans concretes under non-standard and extreme conditions of operation of structures made of these concretes, for this, it is necessary to know peculiarities and regularities of the mechanics of implementation of the structural potential of their specific structures.

ного фактора среды, вводить корректировки по показателям реализации конструкционного потенциала бетонов в эксплуатационном цикле. Но он не вполне отвечает возможностям современного материаловедения и современных высоких технологий по конструированию бетонов как композитных систем с новым уровнем качества, новым потенциалом сопротивления разрушению.

Реально бетон является структурированной системой, поэтому практическое достижение новых возможностей должно основываться на другом подходе в оценке конструкционного потенциала материала – на концепциях и методологии системно-структурного материаловедения. Этот подход позволяет перейти к сущностному рассмотрению причинно-следственных отношений свойств с составом, структурой и состоянием материала; он способен обеспечить решение задач эффективной реализации потенциала бетонов нового поколения в разновариантных моделях напряженно-деформированного их состояния в конструкциях, работающих в том числе в экстремальных температурно-влажностных режимах.

Именно с учетом изложенного авторы обращаются в данной публикации к анализу научных материаловедческих оснований проблемы реализации конструкционного потенциала структур высокотехнологичных бетонов.

Таблица 2
Table 2

Основные отличительные характеристики состава и структуры традиционных и высокотехнологичных цементных бетонов
Main Distinguishing Characteristics of Composition and Structure of Traditional and High Performans Cement Concretes

Отличительные характеристики Distinguishing Characteristics	Значения для бетонов Values for concretes	
	традиционных R≅40–60 МПа Traditional R≅40–60 MPa	высокотехнологичных R⩾80–100 МПа High performans R⩾80–100 MPa
Количество компонентов смеси The number of mix components	4–5	6–8
Наибольшая крупность зернистых частиц, мм The largest size of grain particles, mm	20–70	1–5
Общий масштабно-размерный тип структуры Overall scale-dimension type of structure	Крупнозернистый Coarse	Мелкозернистый, микрозернистый Fine-grained, micro-grained
Суммарное количество зернистых частиц в единице объема, шт./м^3 Total number of grain particles in a volume unit, pc/m^3	до (2–2,2)·10^6 to (2–2,2)·10^6	(0,8–1)·10^{21}
Суммарное количество вносимой зернистыми частицами поверхностной энергии, кДж/м^3 Total quantity of surface energy introduced by grain particles, kJ/m^3	18–20	2000–2500
Расход цемента (вяжущего вещества), кг/м^3 Cement consumption (binding agent), kg/m^3	300–400	400–600
Средняя плотность цементного камня (микробетона), кг/м^3 Average density of cement stone (micro-concrete), kg/m^3	1650–1800	2300–2350
Объем твердой фазы микробетона, м^3/м^3 Volume of micro-concrete hard phase, m^3/m^3	0,57–0,65	0,75–0,79
Объем пор микробетона, м^3/м^3 Volume of micro-concrete pores, m^3/m^3	0,35–0,43	0,21–0,25
Относительное содержание пор радиусом менее 20 нм в общем объеме пор, % Relative content of pores of radius less than 20 nm in the total volume of pores, %	25–30	>40

Концептуально-методологические положения системно-структурного материаловедения и технологии строительных композитов

Положения современного системно-структурного материаловедения строительных композитов и их технологии определяют рассмотрение обсуждаемой проблемы в рамках следующей совокупности представлений, отвечающих концепциям:

1. Формула «4С»: «состав – структура – состояние – свойства».
2. Система «материал – конструкция – среда».
3. Категория «жизненого цикла материала и конструкций».
4. Механика проявления и реализации конструкционных свойств материалов.

Центральным моментом методологии управления качеством строительных материалов и конструкций следует считать ***логическую связь «состав – структура – состояние – свойства» (формула «4С»),*** отвечающую предмету изучения и фундаментальному закону материаловедения о зависимости свойств материала от строения.

В отношении конгломератных строительных композитов, каковыми являются бетоны, концепция «4С» получила системную постановку и специальное рассмотрение [14], в связи с чем на данном вопросе детально не останавливаемся.

Определяющим постулатом методологии структурного материаловедения принимается ***система «материал – конструкция – среда».*** Система характеризуется

In the context of the discussion of the problem it is necessary to refer to the second position in its definition and justification of relevance.

This second position concerns the fact that the research in structural potential of concretes carried out earlier is based mainly on the phenomenological approach aimed at obtaining the quantitative information on the measure, influence degree and coefficients of changing mechanical properties of concrete at its various temperature-humidity states as a quasi-homogeneous system. The phenomenological approach quite satisfies the specialists in calculation and design of structures from practical point of view even today, as makes it possible to take into account and standardize the influence of the temperature-humidity factor of environment, to enter the adjustment according to indicators of the implementation of the structural potential of concretes during the operational cycle. But it does not quite correspond to the potential of modern materials science and modern high technologies of concretes designing as composite systems with a new level of quality, with the new potential of fracture resistance

Actually, concrete is a structured system, so the practical achievement of new possibilities should be based on a different approach to the assessment of structural potential of the material, on the concepts and methodology of the system-

(табл. 3) как открытая термодинамическая, в которой среда воздействует с различной интенсивностью на подсистему «материал—конструкция» комплексом механических нагрузок и физико-климатических факторов, проявляющих себя в качестве движущих сил изменений и материала и конструкции. Процессы изменения состояния, структуры и свойств материала развиваются во времени под воздействием внешних и внутренних движущих сил. Внешние движущие силы оказываются обусловленными наличием неравновесного со средой теплового и вещественною состояния материала, а их величины определяются параметрами эксплуатационной среды. Вызванные внешними воздействиями процессы изменения могут продолжаться до наступления квазиравновесного состояния «материал – среда» с периодическим повторением (цикличностью) при смене условий среды, приводящей к нарушению такого равновесия.

В концепции и методологии структурного материаловедения и технологии в категории «жизненного цикла материала и конструкций», включающего их производство и применение, выделяются ***технологический и эксплуатационный циклы.*** Средством управления свойствами получаемой продукции принимается варьирование параметрами процессов структурообразования в технологическом цикле. Воздействие факторов ***среды*** на материал, работающий в строительной конструкции в эксплуатационном цикле, анализируется через изменение его состава, структуры и состояния. Именно в связи с этим управление качеством материала исходит из рассмотрения его состава, структуры, состояния и свойств как ***на момент изготовления,*** так и ***«развернутых во времени».*** Последнее как раз и составляет существо и содержание проблемы реализации конструкционного потенциала структуры при эксплуатации.

Изменения в материале во времени под влиянием эксплуатационных факторов, связанные с накоплением конструктивных и деструктивных превращений, понимаются в форме процессов, описываемых вероятностно-статистическими методами, а мера допустимых изменений свойств вводится с учетом вероятности безотказной работы строительных конструкций, что основывается на положениях о предельных их состояниях.

Функция износа материала в эксплуатационном цикле принимается в виде:

$$R_b(\tau) = R_{b_0} \cdot e^{-\theta\tau}, \qquad (1)$$

где R_{b_0} – исходный уровень качества материала, достигаемый в технологическом цикле; θ – коэффициент интенсивности износа материала в эксплуатационном цикле; τ – длительность действия факторов износа в эксплуатационном цикле.

Коэффициент интенсивности износа материала θ определяется его составом, структурой C и мерой неравновесности энергетического состояния, связанного с $K_{зс}$:

$$\theta = f(C, K_{зс}), \qquad (2)$$

где C – структура; $K_{зс}$ – коэффициент (критерий) завершенности процессов структурообразования материала в технологическом цикле.

В такой постановке критерий $K_{зс}$ оказывается мерилом возможных изменений конструкционного потенциала структуры бетона во времени.

Триада ***«материал – конструкция – среда»*** в современном материаловедении рассматривается как условие интегрирования интересов «конструкторов конструкций» и «конструкторов структур материалов». При этом материаловедение и технология строительных

structural materials science. This approach makes it possible to proceed to the essential consideration of cause-and-effect relations of properties with the composition, structure and state of the material; it is able to ensure the solution of tasks of efficient implementation of the potential of a new generation of concretes in multi-variant models of their stress-strain state including the structures operating under extreme temperature-humidity conditions.

That's why in view of foregoing, in this publication the authors address to the analysis of scientific materiological grounds of the problem of realizing the structural potential of high performans concretes structures.

About conceptual-methodological provisions of system-structural materials science and technology of building composites

Provisions of the modern system-structural materials science of building composites and their technology define the consideration of the discussed problem within the frame of the following combination of ideas corresponding to the concepts:

1. the formula "composition-structure-condition-properties";
2. system "material-design-environment";
3. the category "life cycle of material and structures";
4. mechanics of manifestation and implementation of structural properties of materials.

The central moment of the methodology of quality control of building materials and structures is ***a logical link "composition-structure-condition-properties" (formula "CSCP"),*** which meets the subject matter and the fundamental law of materials science about the dependence of material properties on the structure.

In respect of conglomerate building composites, such as concretes, the concept of "composition-structure-condition-properties" has received a system setting and special consideration [14], therefore at this issue we don't stop in detail.

The system "material-design-environment" is accepted as the defining postulate of the methodology of structural material science. This system is characterized (Table 3) as an open, thermodynamic, in which the environment impacts with different intensity on the sub-system "material—design" with the complex of mechanical loads and physical-climatic factors manifesting themselves as driving forces of changes both of material and design.

The processes of changes in the state, structure and properties of the material develop in time under the impact of external and internal driving forces. External driving forces are due to the presence of thermal and real state of the material non-equilibrium with the environment, and their values are determined by parameters of the operational environment. Processes of changes, caused by external impacts, may continue until the occurrence of the quasi-equilibrium state "material—environment" with periodical repetition (cyclicity) when changing environmental conditions, leading to the disruption of this balance.

Technological and operational cycles are marked out in the concept and methodology of structural materials science and technology in the category "life cycle of material and structures" which includes their manufacture and application. The variation of parameters of structure formation processes in the technological cycle is adopted as a means of control over the properties of products obtained. The effect of ***environmental*** factors on the material working in the building structure during the operational cycle is analyzed through the change in its composition, structure, and condition. Just in this regard, the control over the material quality proceeds from the consideration of its composition, structure and properties both ***at the moment of manufacturing*** and ***"deployed in time".*** The last one just is the essence and the content of the

Таблица 3
Table 3

Движущие силы и процессы, определяющие формирование напряженно-деформированного состояния материала в конструкциях*
Driving Forces and Processes Determining the Formation of Stress-Strain State of the Material in Structures*

Периоды технологического и эксплуатационного циклов Periods of technological and operational cycles		Технологический цикл Technological cycle			Эксплуатационный цикл Operational cycle	
		Твердение материала в опалубке Material hardening in formwork	Распалубка Formwork removal	Набор марочной прочности Gain in “grade” strength	Загружение Loading	Работа под нагрузкой Operation under load
Тип системы «материал – среда» Type of “material-environment” system		Закрытая Closed		Открытая Open		
Движущие силы изменения состояния материала Driving forces of change in material condition	Внутренние Internal	*Неравновесное термодинамическое состояние системы твердения* *Non-equilibrium thermodynamic state of hardening system*				
	Внешние External	Неравновесное со средой тепловое состояние материала Thermal state of material non-equilibrium with environment				
		–		Неравновесное со средой вещественное состояние материала Real state of material non-equilibrium with environment		
				–	Неравновесное напряженное состояние материала от воздействия механической нагрузки Non-equilibrium stress state of material as a result of mechanical load	
Процессы изменения состояния материала Processes of change in material state	От внутренних движущих сил Due internal driving forces	*Гидратация и твердение* *Hydration and hardening*				
		Тепловыделение *Heat emission*				
	От внешних движущих сил Due external driving forces	Теплообмен со средой (нагревание-охлаждение) Heat exchange with environment (heating-cooling)				
				Массообмен со средой (высыхание, увлажнение-высушивание) Mass exchange with environment (drying-out, damping-drying)		
				Химическая коррозия Chemical corrosion		
				–	Сжатие-растяжение Compression-tension	
Состояние материала в строительной конструкции Condition of material in building structure		Градиентное по степени гидратации и твердения Gradient according to hydration and hardening degree				
		Градиентное по температуре Gradient according to temperature				
		–		Градиентное по влажности Gradient according to humidity		
				Градиентное по степени химической коррозии Gradient according to chemical corrosion degree		
		Градиентное по уровню напряжений Gradient according to stress level				
Составляющие напряжений и деформаций в материале Components of stresses and deformations in material		От развития процессов структурообразования и твердения Due to development of processes of structure formation and hardening				
		Температурные Temperature				
		–		Влажностные Humidity		
				От химической коррозии Due to chemical corrosion		
				–	От действия механической нагрузки Due to mechanical load effect	
					Мгновенные Momentary	Длительные Long-duration

*Рассматривается вариант монолитного исполнения конструкций, когда эксплуатационная среда оказывает влияние на формирование напряженно-деформированного состояния в технологическом и эксплуатационном циклах.
*A variant of monolithic execution of structures, when the operational environment influences on the formation of the stress-strain state in technological and operational cycles, is considered.

композитов опираются на концепции и основания физико-химической механики проявления свойств [13] в конструкциях в эксплуатационном цикле. Полагается, что при повышении или понижении температуры материала напряженно-деформированное состояние структуры зависит от меры активации термофлуктуационных актов разрыва межатомных связей сформированной твердой фазы материала. При изменении содержания и соотношения различных видов воды в структуре (табл. 4) напряженно-деформированное состояние материала зависит от складывающегося баланса сил капиллярности, поверхностного натяжения, когезионного и адгезионного взаимодействия в контактах дисперсных частиц твердой фазы, сил внутренних связей в кристаллах новообразований цементного камня, сил упругого противодействия твердой фазы ее деформированию на фоне одновременного протекания в ней релаксационных процессов.

Мера всех этих сил зависит от состава и структуры материала, а проявление их действия – как от степени водонасыщения или обезвоживания материала, так и от видов воды, участвующих в этих процессах. В рамках представлений о механизме влияния видов воды в структуре бетонов принимается, что химическая, физико-химическая и физико-механическая формы связи воды реализуются по масштабным уровням строения бетонов в характерных и различающихся для них величинах энергии взаимодействия видов связи воды со структурой – капиллярной, адсорбционной, межслоевой молекулярной и гидроксильной в кристаллической решетке новообразований цементного камня.

problem of implementing the structural potential of structures during operation.

Changes in the material with time under the influence of operational factors connected with accumulation of constructive and destructive transformations are understood in the form of processes described by probabilistic-statistic methods, and a valid measure of property changes is introduced with due regard for the possibility of non-failure operation of building structures that is based on the provisions of their limit states.

The function of material wear during the operational cycle is adopted in the form

$$R_b(\tau) = R_{b_0} \cdot e^{-\theta\tau}, \quad (1)$$

where R_{b_0} – is an initial level of the material quality achieved during the technological cycle; θ – coefficient of wear intensity of the material during the operational cycle; τ – duration of action of wear factors during the operational cycle.

The coefficient of wear intensity of the material θ is determined by its composition, structure C and the measure of non-equilibrium of the energetic state connected with K_{cpmc}:

$$\theta = f(C, K_{cpmc}), \quad (2)$$

where C is a structure, K_{cpmc} – coefficient (criterion) of the completeness of processes of material structure formation during the technological cycle.

In this formulation, the criterion K_{cpmc} becomes a measure of possible changes in the structural potential of concrete structures during the time.

Таблица 4
Table 4

Силы и энергия связи воды со структурой материала
Forces and Energy of Water Relationship with Structure of Material

Уровни структуры Levels of structure	Анализируемая система Analyzed system	Вид воды Type of water		Составляющие баланса сил связи твердой фазы и пор с водой Components of force balance of relationship of solid phase and pores with water	Энергия связи воды со структурой, кДж/моль Energy of water relationship with structure, kJ/mole
МАКРО MACRO	Бетон Concrete	Свободная вода Free water		Силы смачивания Wetting forces	<0,05
МЕЗО MESO	Микробетон Micro-concrete	Капиллярно-насыщенная вода Capillary-saturated water		Капиллярные силы, силы поверхностного натяжения Capillary forces, surface tension forces	0,05–0,5
МИКРО MICRO	Цементирующее вещество Cementing substance	Капиллярно-конденсированная вода Capillary-condensated water		Капиллярные силы, расклинивающее давление адсорбционных пленок, силы межмолекулярного взаимодействия поверхности твердой фазы с водой Capillary forces wedging the pressure of adsorption films, forces of intermolecular interaction of solid phase surface with water	0,5–40
		Адсорбционная вода Adsorption water	монослоя (l=1–2,5 нм) monolayer (l=1–2.5 nm)		40–80
СУБМИКРО SUBMICRO	Новообразования цементирующего вещества New growths of cementing substance		полислоев (l=2,5–8 нм) multilayer (l=2.5–8 nm)		≈40
НАНО NANO	Кристалл, субмикрокристалл, частица аморфной фазы новообразований Crystal, sub-, micro-crystal, particle of amorphous phase of new growths	Вода межслоевая молекулярная Interlayer, molecular water		Силы межмолекулярного взаимодействия плоскостей кристаллов с молекулами воды; силы ионной связи OH^--групп в кристаллической решетке Forces of intermolecular interaction of crystals planes with water molecules; forces of ionic linkage of OH^--group in crystal lattice	20–80
		Вода кристаллической решетки в виде OH^--групп Water of crystal lattice in the form of OH^--group			400–600

Сила и энергия связи видов воды существенно и закономерно убывают от макро- к микро- и наноуровням (табл. 4).

Считается, что определяющий вклад в изменение свойств материала в различном температурно-влажностном состоянии вносят структурные составляющие микро-, субмикро- и наноуровней, что особенно необходимо учитывать для высокотехнологичных бетонов. Обоснованное изменение и регулирование содержания и соотношения этих структурных составляющих являются средством управления балансом сил в структуре и, как следствие, мерой реализации конструкционного потенциала бетона в разновариантных состояниях в эксплуатационном цикле.

Модели температурно-влажностных состояний материала в конструкции

Моделирование эксплуатационных состояний материала в конструкциях является непременным условием для рассмотрения закономерностей реализации конструкционного потенциала структуры высокотехнологичных бетонов в рамках их реакции на эти состояния. Такое моделирование предполагает учет характеристик диапазона физико-климатических воздействий, суточной и сезонной цикличности параметров среды, особенностей формирования температурно-влажностной градиентности материала в сечениях конструкции и др.

Обобщенно для возможного диапазона параметров эксплуатационной среды можно предложить следующие варианты моделей температурно-влажностного состояния материала в конструкциях:

- ***максимально обезвоженное*** в воздушной среде (характерно для эксплуатационных сред с повышенной температурой и пониженной влажностью);
- ***максимально увлажненное*** в воздушной среде (характерно для среды с повышенной влажностью воздуха);
- ***максимально нагретое*** в воздушной среде (может иметь место при прямой длительной солнечной экспозиции);
- ***максимально охлажденное*** в воздушной среде (может иметь место при минимальной солнечной экспозиции);
- ***максимально водонасыщенное*** (может наблюдаться при постоянной эксплуатации бетона в водной среде);
- ***замороженное*** в сухом и водонасыщенном состоянии (может наблюдаться при длительном действии отрицательных температур эксплуатационной среды);
- ***циклически увлажненное-обезвоженное*** в воздушной среде (может иметь место в условиях суточной цикличности параметров температуры и влажности среды);
- ***циклически замороженное-оттаявшее*** в воздушной среде (может наблюдаться в условиях суточной цикличности параметров температуры среды).

Эти модели состояний могут быть соотнесены с определенными климатическими зонами, например арктическими, субарктическими, зонами пустынь и полупустынь и т. п., и соответствующими им обычными и экстремальными воздействиями на бетоны. Для возможных климатических вариантов диапазон температурных параметров эксплуатационной воздушной среды отвечает значениям от -60°С до +60°С, а влажностных – от 15–20 до 100%; число температурных переходов через 0°С в суточном цикле может составлять несколько десятков; увлажнение поверхностных слоев бетона в конструкциях прямыми осадками может достигать предельных значений водонасыщения.

В указанном диапазоне эксплуатационных воздействий и будут складываться те или иные модели состояний и протекать процессы реализации конструкцион-

The triad "material-structure-environment" is considered in the modern materials science as a condition of the integration of interests of "designers of designs" and "designers of materials structures". At that, the material science and technology of building composites relies on the concepts and bases of ***the physical-chemical mechanics of display of properties [13] in the structures during the operational cycle.***

It is believed that in the course of raising or lowering the material temperature, the stress-strain state of the structure depends on the level of activation of thermo-fluctuation acts of the rupture of interatomic bonds of the formed solid phase of the material. When the content and ratio of different types of water change in the structure (Table 4), the stress-strain state of the material is considered as depending on the forming force balance of capillarity, surface tension, cohesion and adhesion interaction in the contacts of disperse particles of the solid phase, forces of internal ties in crystals of new growths of the cement stone, forces of the elastic resistance of the solid phase to its deformation on the background of simultaneous passing of relaxation processes in it.

The measure of all these forces depends on the composition and structure of the material, and the manifestation of their actions depends both on the degree of water saturation or dewatering of the material and the types of water participating in these processes. Within the framework of ideas about the mechanism of influence of water types in the structure of concretes, it is accepted that chemical, physical-chemical, and physical-mechanical forms of the water relationship are realized, according to the scale levels of concrete structures, in characteristic and distinctive for them values of the energy of interaction of water relationship types with the structure – capillary, adsorption, molecular interlayer and hydroxyl – in the crystalline lattice of new growths of the cement stone. The power and energy of the connection of water types significantly and naturally increase from macro- to micro- and nano-levels (see Table 4).

It is considered that structural components of micro-, submicro- and nano-levels make a decisive contribution to changing properties of the material being in different temperature-humidity conditions, this should be taken into account for high performans concretes. A substantiated change and regulation of the content and the ratio of these structural components is a means of control over the force balance in the structure and, as a consequence, a measure for realizing the structural potential of concrete under multi-variant conditions during the operational cycle.

About models of temperature-humidity conditions of material in structure

The simulation of operational conditions of the material in structures is an indispensible condition for considering regularities of the implementation of structural potential of high performans concrete structures within the frame of their reaction to these conditions. This simulation assumes the account of characteristics of the range of physical-climatic impacts, daily and seasonal cyclicity of environmental parameters, features of the formation of the temperature-humidity gradient-mode of the material in structures sections et. al. Generally, for the possible range of parameters of the operational environment, the following options of models of temperature-humidity conditions of the material in structures can be offered:

- *maximal dewatered* in air environment (characteristic for operational environments with high temperatures and low humidity);
- ***maximal moistened*** in air environment (characteristic for environment with high humidity of the air);
- ***maximal heated*** in air environment (may take place at direct prolonged sun exposure);
- ***maximal cooled*** in air environment (may take place at minimal sun exposure);

ного потенциала высокотехнологичных бетонов. Поэтому для этих моделей важно прогнозировать закономерности развития процессов изменений в структурах высокотехнологичных бетонов и выявлять критериальные структурные факторы динамики процессов и их последствий.

К примеру, в области высоких положительных температур и низких значений влажности воздуха (модель климатических зон полупустынь и пустынь) особенности структур высокотехнологичных бетонов и их состояний могут предопределять самые негативные последствия для долговечности конструкций из-за повышенной удельной влажностной усадки структуры. Именно величина влажностной усадки в расчете на процент удаленного вида влаги из поровой структуры бетона окажется критериальным фактором изменения его конструкционного потенциала.

В области экстремальной отрицательной температуры (модель климатических арктических и субарктических зон) специфика структуры высокотехнологичных бетонов не исключает картину несвойственных для традиционных бетонов негативных эффектов при образовании криофазы и дилатометрических проявлениях. В данном случае критериальным фактором может являться зависимость температуры образования криофазы в структуре бетона от характеристик его пористости, в первую очередь от распределения пор по размерам.

В области циклической смены температурно-влажностных параметров эксплуатационной среды (модель резко континентальных, морских и приморских климатических зон и т. п.) критическим может оказаться (ввиду многократности смены состояний структуры) влияние фактора макро- и микроградиентности напряжений и деформаций поверхностных слоев конструкций, и как следствие этого, включение в работу процессов морозной деструкции и термического послойного разрушения.

Во всех этих и других вариантах, определяемых тенденцией растущей востребованности по применению современных бетонов не только в обычных, но и в экстремальных условиях, определяющим оказывается значение их структуры для «развернутых во времени» (в эксплуатационном цикле) конструкционных свойств – предела прочности, предела трещинообразования, критического коэффициента интенсивности напряжений (вязкости разрушения), трещиностойкости, влажностной усадки и набухания, циклической стойкости при увлажнении – высыхании, при замораживании – оттаивании и др.

Реализации конструкционного потенциала структуры высокотехнологичных бетонов в диапазоне эксплуатационных температурно-влажностных состояний

Мера реализации конструкционных свойств бетона в эксплуатационном цикле полагается, как отмечалось ранее, зависящей от вклада составляющих баланса сил в его напряженно-деформированное состояние при изменении температуры и влажности материала. Такой вклад предопределяется размерно-геометрическими и энергетическими характеристиками твердой фазы и порового пространства с учетом входящих в структуру материала жидкой и газовой фаз, образующих с ними системное единство.

Закономерности реализации конструкционного потенциала бетона и механизмы этого нуждаются в специальном рассмотрении, которое должно касаться и индивидуального и совместного влияния температурного и влажностного факторов в диапазоне их значений и сочетаний в эксплуатационном цикле (в соответствии с предложенными моделями состояний).

– ***maximal water saturated*** (can be observed at permanent operation of concrete in water environment);
– ***frozen*** in dry and water saturated state (can be observed under the prolonged effect of negative temperatures of the operational environment);
– ***cyclically watered-dewatered*** in air environment (may take place under conditions of daily cyclicity of parameters of environmental temperature and humidity);
– ***cyclically frozen-thawed*** in air environment (can be observed under conditions of the daily cyclicity of parameters of environmental temperature).

These models of states can be correlated with certain climatic zones (arctic, subarctic, desert and semi-desert etc.) and conventional and extreme impacts on concretes corresponding to them. For possible climatic variants the range of temperature parameters of operating air environment can meet the values from -60°C up to +60°C and for humidity – from 15–20% up to 100%; the number of temperature transition via 0°C during the daily cycle can be several tens; moistening of surface coats of concrete in structures with direct precipitation can reach maximum values of water saturation.

Within this range of operational impacts, certain state models will be formed and processes of the realization of the structural potential of high performans concretes will proceed. Therefore for these models it is important to predict regularities of development of changing processes in the structures of high performans concretes and reveal criterion structural factors of the processes dynamic and their consequences.

For example, in the area of high positive temperatures and low values of air humidity (a model of desert and semi-desert climatic zones), the features of high performans concrete structures and their states can predetermine the most negative sequences for structures durability due to the high specific humidity shrinkage. The value of humidity shrinkage in the calculation of the percentage of moisture removed from the porous structure of concrete will become the criterion factor of the change in its structural potential.

In the area of extreme negative temperatures (model of arctic and subarctic climatic zones), the specificity of high performans concrete structure does not exclude the picture of unusual for traditional concretes negative factors at the formation of a cryo-phase and dilatometric manifestasions. In this case, the criterion factor is the dependence of the temperature of cryo-phase in the concrete structure on the characteristic of its porosity, in the first place, on the distribution of pores according to sizes.

In the areas of the cyclic changes in temperature-humidity operational environment (model of sharply continental, marine and seaside climatic zones etc.), the influence of the factor of micro- and macro-gradient stresses and strains of surface layers of structures can be critical and, as a result, initiation of processes of frost destruction and thermal layer-by-layer destruction.

In all these and other variants determined by the tendency of growing demand for using modern concretes under not only normal, but extreme conditions also, the determinative moment is the importance of their structures for “deployed in time” (during the operational cycle) structural properties: strength limit, crack formation limit, critical coefficient of stresses intensity (fracture viscosity), crack resistance, humidity shrinkage and swelling, cyclic resistance to watering-drying, freezing-thawing etc.

About realization of structural potential of high performans concrete structures within the range of their operational temperature-humidity states

Measure of implementing structural properties of concrete during the operational cycle, as it was noted earlier, depends on the contribution of components of the force balance to its stress-strain state when the temperature and moisture content of the material are changing. Such a contribu-

Влияние изменений температуры бетона на его прочность рассматривается, как уже указывалось, в рамках термофлуктуационной теории разрушения твердых тел. Считается, что в эксплуатационном температурном диапазоне от -60 до +60°С изменение энергии активации для связей MeO и SiO, характерных для цементных и силикатных систем твердения, незначительно. В наших исследованиях установлено, что изменение прочности в сухом состоянии для плотных и макропористых структур бетонов не превышает 10% во всем рассматриваемом температурном диапазоне.

Значение рассматриваемого эксплуатационного фактора на конструкционный потенциал необходимо анализировать, имея в виду величины температурных деформаций материала и их градиент в рабочих сечениях конструкций. С учетом модуля упругости высокотехнологичных бетонов температурные напряжения (для условий стесненности деформирования конструкций и градиентности температурного деформирования бетона в рабочих сечениях) показатели напряженно-деформированного состояния могут существенно отличаться по сравнению с традиционными структурами бетонов. Можно считать, что в моделях максимально нагретого или максимально охлажденного массива конструкций, находящихся в макроградиентном напряженном состоянии, более вероятны ситуации деструкции (трещинообразования).

Влияние изменения влажностного состояния на потенциал сопротивления бетонов разрушению R(P) соотносится с результатом действия, во-первых, кристаллических сил связей в твердой фазе P_{KC}, мера изменения которых ΔP_{KC} в присутствии молекул адсорбционно-активной среды (воды) зависит от ее количества (W_A), и энергии взаимодействия с поверхностью твердой фазы (иначе, от удельной поверхностной энергии $q_{тв.ф}$); во-вторых, от сил капиллярного стяжения $P_{КД}$, проявление которых определяется наличием в объеме порового пространства водных менисков:

$$R(P) = P_{KC} - \Delta P_{KC} + P_{КД}, \quad (3)$$

при том что величина $P_{КД}$ зависит от радиуса пор и степени заполнения пор водой (отношения объема жидкой фазы к объему пор $V_{жф}/V_{пор}$).

Проявление действия этих сил в их балансе зависит от изменения влагосодержания материала и, соответственно, от проявления действия форм связи воды со структурой. Такое проявление в диапазоне от исходного сухого до водонасыщенного состояния (и наоборот) неоднозначно влияет на изменение прочности.

По результатам экспериментальных исследований, проведенных для плотных и макропористых бетонов при широком варьировании параметров их строения, наблюдались и выявлены три типа зависимостей (рис. 1) изменения прочности бетона при увлажнении.

Характер зависимостей определяется изменением вклада адсорбционных и капиллярных сил в потенциал сопротивления бетона разрушению.

Наибольшее снижение прочности обусловливается проявлением действия адсорбционной воды (характерная кривая I типа); при этом фиксируется величина коэффициента размягчения по прочности бетона K_p = 0,7–0,75.

Наименьшее снижение прочности (характерная кривая II типа) имеет место, когда расщепляющее гидролитическое действие, расклинивающее давление воды адсорбционных слоев в значительной мере компенсируются силами капиллярного стяжения; в этом варианте влажностного состояния бетона K_p = 0,85–0,95.

Рассмотренные типы зависимостей присущи высокопрочным модифицированным бетонам, структура

tion is predetermined by dimensional-geometric and energy characteristics of the solid phase and void space with due regard for liquid and gas phases which are parts of the material structure and form the system unity with them.

Regularities of the realization of the structural potential of the concrete and mechanisms of this are needed for special consideration which should concern both individual and joint impact of temperature and humidity factors within the range of their values and combinations during the operational cycle (in accordance with proposed models of states).

The effect of temperature changes in concrete on its strength is considered, as it is already indicated, within the frames of the thermo-fluctuation theory of failure of solids. It is considered that in the operational temperature range from -60°C to +60°C, the change in the activation energy for bonds MeO and SiO, characteristic for cement and silicate systems of hardening, is insignificant. It is established by our studies that the change in dry state for dense and macro-porous structures of concretes does not exceed 10% for the whole temperature range considered.

The importance of impact of the operational factor on the structural potential is necessary to analyze bearing in mind the values of temperature deformations of the material and their gradient in working cross-sections of the structures. With due regard for the elasticity module of high performans concretes, the temperature stresses (for conditions of tightness of structures deformation and gradients of concrete temperature deformation in working cross-sections) and indicators of the stress-strain state may significantly differ in comparison with the traditional structures of concretes. It can be considered that in models of maximum heated and maximum cooled massifs of structures, which are in the macro-gradient stress state, destruction situations (crack formation) are more probable.

The effect of the change in the humidity state on the potential of concrete resistance to fracture R(P) is correlated with the result of actions, firstly, of crystal forces of bonds in the solid phase P_{CB}, measure of which changes ΔP_{CB} in the presence of molecules of the adsorption-active medium (water) depends on its quantity (W_A) and the energy of interaction with the solid phase surface (otherwise, on the specific surface energy q_{sf}), secondly, on forces of capillary contraction P_{CC}, manifestation of which is determined by availability of water meniscuses in the volume of porous space:

$$R(P) = P_{CB} - \Delta P_{CB} + P_{CC}, \quad (3)$$

while: the value P_{CC} depends on the radius of pores and the degree of pore filling with water (relationship of the volume of the liquid phase to the volume of pores V_{lf}/V_p).

The manifestation of these forces in their balance depends on the change in moisture content of the material and, respectively, on the manifestation of action of forms of water connection with the structure. Such manifestation in the range from the initial dry state up to water saturated (and vice versa) ambiguously influences on the change in strength.

According to the results of experimental studies conducted for dense and macro-porous concretes at the wide variation of parameters of their structure, three dependences (Pic. 1) of the change in the concrete strength at damping are observed and revealed.

The character of dependences is determined by the change in the contribution of adsorption and capillary forces to the potential of concrete resistance to deterioration.

The maximum reducing of strength is determined by the manifestation of the adsorption water action (representative curve of I type); at that, the value of the coefficient of softening of concrete strength K_p = 0.7–0.75 is fixed.

The minimal reducing of strength (representative curve of II type) takes place, when the splitting hydrolytic action wedging the water pressure of adsorption layers is signifi-

Таблица 5
Table 5

Мера снижения прочности бетонов на различных диапазонах влагосодержания
The Measure of Concrete Strength Reduction at Different Humidity Ranges

Вид бетона Type of concrete	Коэффициент размягчения K_p Softening coefficient K_p						
	В диапазонах влагосодержания, мас. % In humidity ranges, mass %			При температуре, °С At temperature, °С			
	1–1,5	2,5–5	>5	-(60–40)	0	+20	+60
Традиционный Traditional	0,95±0,05	0,92±0,05	0,90±0,05	1,23±0,05	1,0±0,05	0,94±0,05	0,97±0,05
Высокотехнологичный High performans	0,88±0,05	0,82±0,05	0,70±0,05	0,98±0,05	0,84±0,05	0,75±0,05	0,75±0,05

которых отличается развитой поверхностью раздела межзеренных и межфазных границ и преобладанием в структуре наноразмерных пор.

Кривая III типа отличается пониженной выраженностью эффектов действия адсорбционных и капиллярных сил, в результате чего величина $K_p \approx 0{,}9$. Зависимости прочности от влажности данного типа характерны для плотных и макропористых бетонов с традиционной (немодифицированной) структурой микробетона.

Влияние влажностного фактора может происходить ***в условиях меняющейся температуры.*** Для влажного материала повышение его температуры усиливает эффект понижения прочности. Это происходит вследствие снижения вязкости воды и облегчения условий смачивания поверхности твердой фазы; вода быстро проникает к поверхности разрушения именно в момент образования трещин.

cantly compensated by forces of capillary contraction; in this variant, humidity conditions of concrete $K_p = 0.85–0.95$.

The types of dependences considered inherent high-strength modified concretes which structure has a developed surface of the partition of intra-grain and intra-phase boundaries and prevails in the structure of nano-size pores.

The curve of III type is characterized by reduced manifestation of effects of the action of adsorption and capillary forces, as a result the value $K_p \approx 0.9$. The strength dependences on the humidity of this type are characteristic for dense and macro-porous concretes with traditional (non-modified) structure of micro-concrete.

The impact of the humidity factor can take place under conditions of changing temperature. For wet material the increase in its temperature intensifies the effect of strength reduction. This takes place due to the reduction in water viscosity and facilitating the wetting of the solid phase surface;

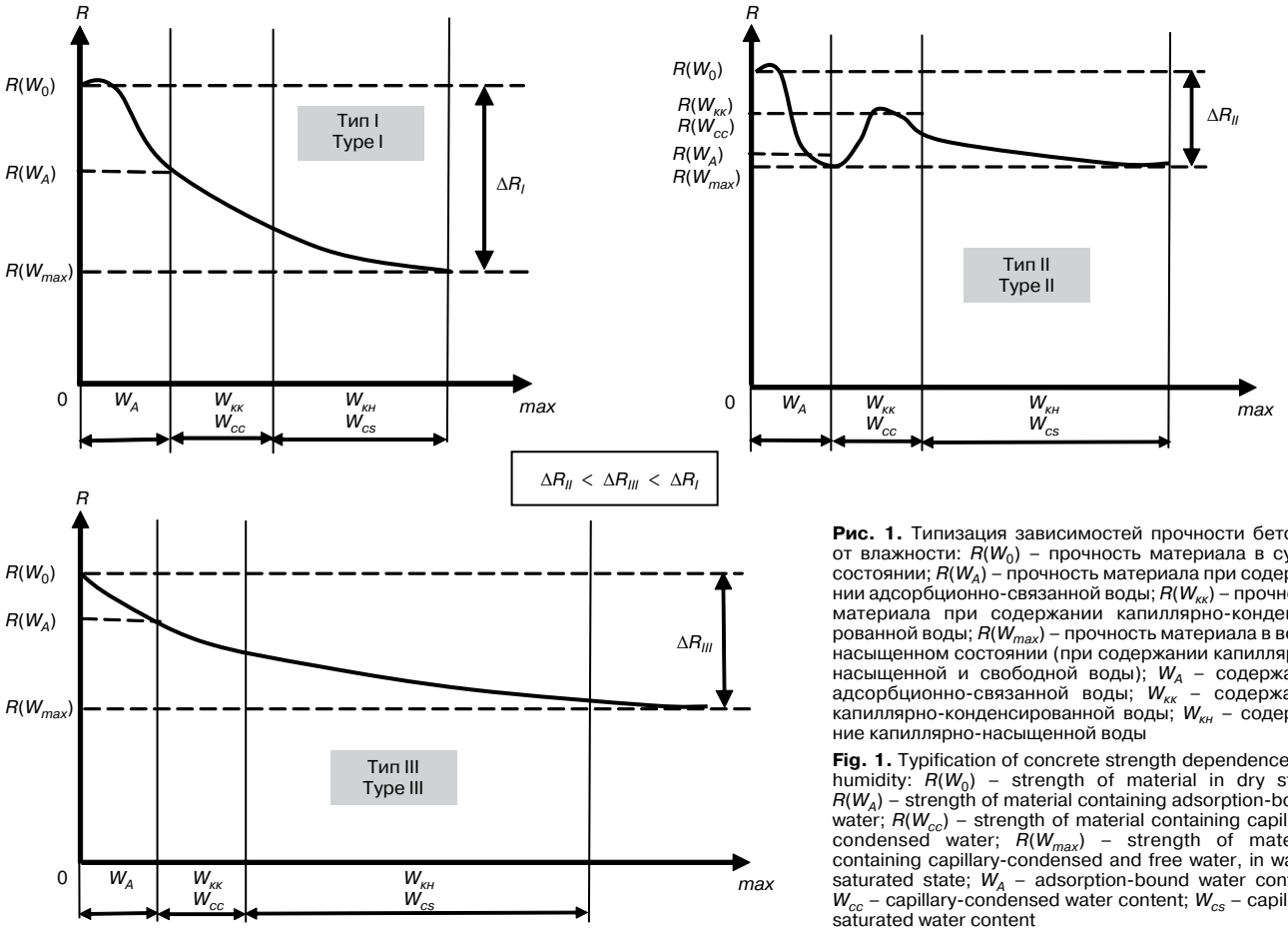

Рис. 1. Типизация зависимостей прочности бетонов от влажности: $R(W_0)$ – прочность материала в сухом состоянии; $R(W_A)$ – прочность материала при содержании адсорбционно-связанной воды; $R(W_{кк})$ – прочность материала при содержании капиллярно-конденсированной воды; $R(W_{max})$ – прочность материала в водонасыщенном состоянии (при содержании капиллярно-насыщенной и свободной воды); W_A – содержание адсорбционно-связанной воды; $W_{кк}$ – содержание капиллярно-конденсированной воды; $W_{кн}$ – содержание капиллярно-насыщенной воды

Fig. 1. Typification of concrete strength dependences on humidity: $R(W_0)$ – strength of material in dry state; $R(W_A)$ – strength of material containing adsorption-bound water; $R(W_{cc})$ – strength of material containing capillary-condensed water; $R(W_{max})$ – strength of material, containing capillary-condensed and free water, in water-saturated state; W_A – adsorption-bound water content; W_{cc} – capillary-condensed water content; W_{cs} – capillary-saturated water content

Для высокотехнологичных бетонов во влажном их состоянии влияние воды всех форм связи настолько значительно, что коэффициент размягчения оказывается существеннее, чем для традиционных бетонов. При этом величина K_p имеет значение меньше единицы не только при положительной, но и при отрицательной температуре (табл. 5).

Влияние температурно-влажностного состояния бетона на его конструкционный потенциал требуется анализировать, имея в виду зависимость величин коэффициентов линейного температурного расширения и влажностных деформаций от структуры материала. ***Для влажностных деформаций*** в зависимости от сформировавшейся структуры бетона, обоснованно ввести [15] модели его деформирования при обезвоживании или типы кривых влажностной усадки (рис. 2).

Тип I кривых усадки присущ материалам со структурой, отличающейся повышенными величинами дисперсности частиц твердой фазы, суммарной площади их поверхности и запаса избыточной поверхностной энергии и одновременно с этим минимальными значениями размера пор. Именно это определяет максимальные значения величины усадки на всех этапах обезвоживания. Тип III свойствен материалу со структурой, характеристики составляющих твердой фазы которой отличаются относительно большей мерой закристаллизованности, а запас избыточной поверхностной энергии структуры оказывается минимальным. Тип II характерен для материалов с промежуточными значениями характеристик структуры.

Существо управления показателями влажностной усадки материала заключено в возможностях изменения характера и силы связи его твердой фазы и порового пространства с водой посредством уменьшения относительного содержания в материале объема цементирующего вещества и пор, увеличения закристаллизованности новообразований с пониженной удельной площадью поверхности и удельной поверхностной активностью, увеличения среднего эффективного радиуса пор.

water quickly penetrates to the fracture surface exactly at the moment of crack formation.

For high performans concretes in their wet state, the influence of water of all connection forms is so significant that the softening coefficient is more substantial than for traditional concretes. At that, the value K_p is less than one not only at positive temperatures but also at negative ones (Table 5).

The impact of temperature-humidity conditions of the concrete on its structural potential is needed to be analyzed, keeping in mind the dependence of values of coefficients of linear temperature expansion and humidity deformations on the structure of material. ***For humidity deformations,*** depending on the formed structure of concrete, it is reasonable to introduce [15] the models of its deformation in case of dewatering or types of the curves of humidity shrinkage (Pic. 2)

Type I of shrinkage curves is inherent to materials with the structure notable for increased values of dispersion of solid phase particles, total area of their surface and reserve of the excess surface energy and, simultaneously, minimal values of pore sizes. This determines maximal values of the shrinkage at all the stages of dewatering. Type III is inherent to the material, characteristics of components of the solid phase of which are notable for the relatively larger measure of crystallineness, and the reserve of excess surface energy of the structure is minimal.

Type II is typical for materials with intermediate values of structure characteristics.

The essence of control over indicators of moist shrinkage is a possibility to change the character and bonding forces of its solid phase and porous space with water by means of reducing the relative content of the cementing substance volume and pores in the material, increasing the crystallineness of new formations with reduced specific surface area and specific surface activity, increasing the average efficient radius of pores. This directed modification of the composition and structure of the material is characterized by the change of the deformation model and, accordingly, possibility to cardinally reduce (by half order-order) the values of its specific and complete shrinkage (Table 6).

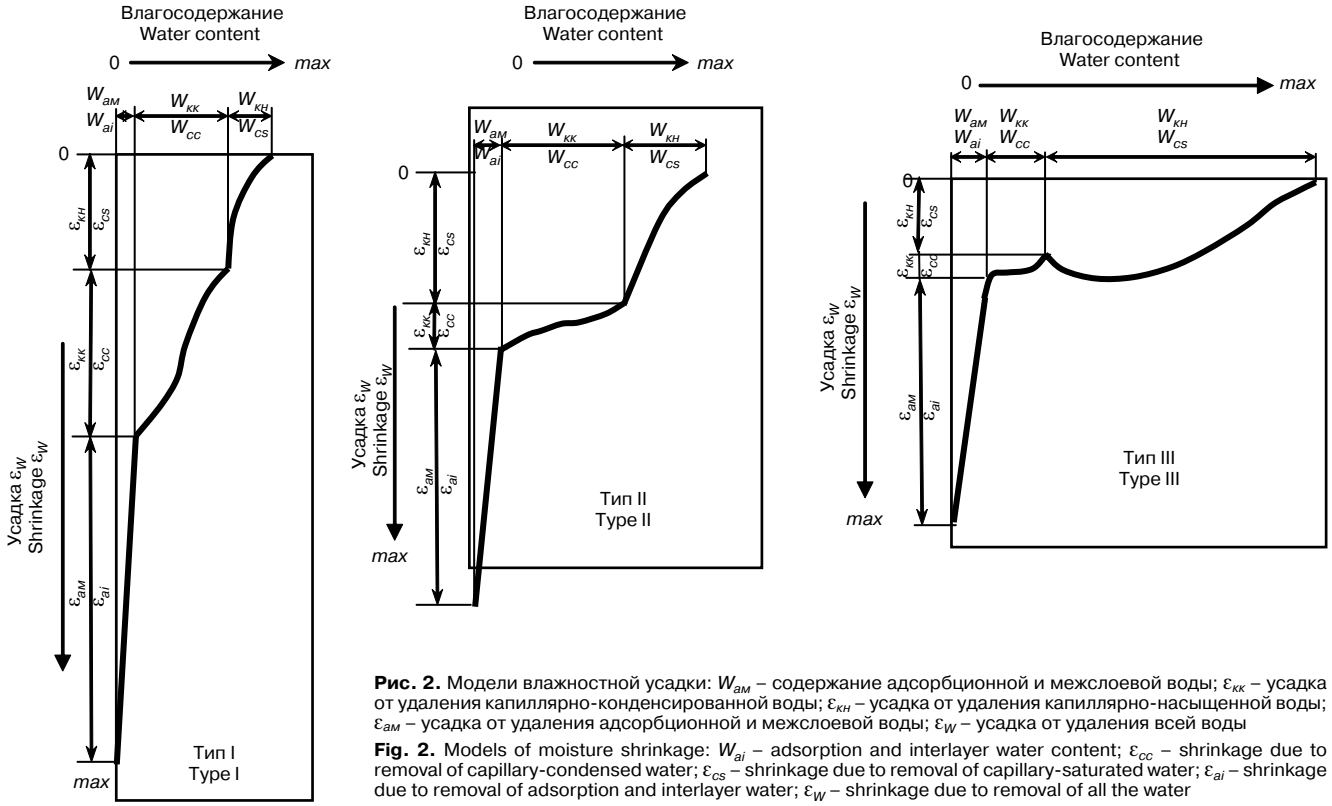

Рис. 2. Модели влажностной усадки: $W_{ам}$ – содержание адсорбционной и межслоевой воды; $\varepsilon_{кк}$ – усадка от удаления капиллярно-конденсированной воды; $\varepsilon_{кн}$ – усадка от удаления капиллярно-насыщенной воды; $\varepsilon_{ам}$ – усадка от удаления адсорбционной и межслоевой воды; ε_W – усадка от удаления всей воды

Fig. 2. Models of moisture shrinkage: W_{ai} – adsorption and interlayer water content; ε_{cc} – shrinkage due to removal of capillary-condensed water; ε_{cs} – shrinkage due to removal of capillary-saturated water; ε_{ai} – shrinkage due to removal of adsorption and interlayer water; ε_W – shrinkage due to removal of all the water

Такое направленное модифицирование состава и структуры материала характеризуется изменением модели деформирования и соответственно возможностью кардинального (на полпорядка-порядок) снижения величины удельной и полной его усадки (табл. 6).

Уместно здесь привести данные, полученные по результатам оценки деформаций автоклавного микробетона в гигростатах с различной величиной парциального давления водяного пара. Такая методика испытаний позволила получить данные по удельной усадке от удаления свободной, капиллярно-насыщенной, капиллярно-конденсированной, адсорбционной и межслоевой воды. Показано, что величины удельной усадки материала от удаления капиллярно-насыщенной и капиллярно-конденсированной воды сопоставимы, однако в пределах одного вида воды, взаимодействующей с материалом, в зависимости от его состава и структуры показатели могут отличаться почти на порядок. Воздействие адсорбционной и межслоевой воды на усадку по удельной ее величине на один-два порядка сильнее, чем капилярно-насыщенной и капиллярно-конденсированной [15].

Анализ и систематизация ***механизмов накопления повреждений в материале от морозного разрушения*** [1–6] дают основания к выделению двух главных факторов управления морозостойкостью бетонов [16]:

1. Фактор температуры замерзания воды в поровой структуре.
2. Фактор массопроводности материала в термоградиентных условиях его эксплуатации в конструкции.

Первый фактор является критериальным для развития деформаций и напряжений вследствие процессов льдообразования; второй фактор предопределяет возможность и интенсивность накопления влаги в охлаждаемых зонах вследствие ее миграции из теплых зон.

Проявление действия этих факторов зависит от силы связи воды со структурой материала, и поэтому обеспечение морозостойкости бетона связывается со следующей системой его структурных характеристик: объемом пор и их размерами, удельной поверхностной энергией твердой фазы и мерой ее смачиваемости водой. Условие повышения морозостойкости, разумеется, соотносится с наличием резервного, не заполненного жидкой фазой объема пористости в материале, в который она может отжиматься при льдообразовании в заполненных водой порах.

Действие рассмотренных факторов неоднозначно и диалектично влияет на морозостойкость бетонов.

Одним из возможных направлений влияния на морозную деструкцию и повышение морозостойкости строительных материалов считается прием формирования микропористых их структур. Здесь критериальным для развития морозного разрушения является фактор возможности перехода жидкой фазы в криофазу (температуру замерзания воды в материале), которая зависит от силы связи воды со структурой материала. В зависимости от структуры материала значение температуры замерзания воды в нем может находиться в интервале от 0 до -70°С, а мера деформирования материала при замораживании (рис. 3, *a, b*), являющаяся следствием и «тестом» возможного проявления кристаллизационного давления при льдообразовании, может отличаться на два порядка при изменении среднего эквивалентного радиуса пор от 10 до 70 нм.

Таблица 6
Table 6

Величина усадки цементных бетонов на различных стадиях увлажнения-обезвоживания
Value of shrinkage of cement concretes at different stages of watering and dewatering

Модель усадки Shrinkage model	Величина усадки в мм/м при удалении различных видов воды Value of shrinkage in mm/m at removal of different type of water		
	Всей массы воды Whole mass of water	Капиллярно-связанной Capillary-bound	Адсорбционной и межслоевой Adsorption and inter-layer
I	2,31 / 0,085	1,38 / 0,053	0,93 / 0,77
II	1,55 / 0,031	0,6 / 0,013	0,95 / 0,22
III	1,6 / 0,021	0,53 / 0,007	1,07 / 0,22

Примечание. Над чертой – полная, под чертой – удельная усадка.
Note. Above the line – complete, below the line – specific shrinkage.

It is appropriate to present the data obtained as a result of the assessment of autoclaved micro-concrete deformations in the hydrostats with different values of partial pressure of water steam. This methodology of testing makes it possible to obtain the data on the specific shrinkage after removing free, capillary-saturated, capillary-condensed, adsorption and interlayer water. It is shown that the value of the material specific shrinkage after removing capillary-saturated and capillary-condensed water are comparable, but within the limits of one type of water interacting with the material, depending on its composition and structure the indicators may differ by an order of magnitude. The effect of adsorption and interlayer water on the shrinkage according to its specific value is stronger by one-two orders of magnitude than capillary-saturated and capillary-condensed [15].

The analysis and systematization of ***mechanisms of damage accumulation in the material from the frost fracturing*** [1–6] give basis to allocate two basic factors of control over frost-resistance of concretes [16]:

1. Factor of water freezing temperature in the porous structure.
2. Factor of mass conductivity of the material under thermogradient conditions of its operation in the construction.

The first factor is criterial for development of deformations and stresses due to the process of ice formation; the second factor predetermines the possibility and intensity of moisture accumulation in cooled zones due to its migration from warm zones.

The manifestation of these factors action depends on the coupling strength of the water with the material structure and therefore the achievement of concrete frost resistance is associated with the following system of its structural characteristics: volume and sizes of pores, specific surface energy of the solid phase and the measure of its water wetting. A condition of increasing the frost-resistance, of course, is correlated with the presence of reserve, not filled with the liquid phase, volume of porosity in the material, in which it can be squeezed n the course of ice formation in pores filled with water.

The effect of the factors considered is ambiguous and dialectically effects on frost resistance of concrete.

One of possible ways of the influence on the frost destruction and increase in frost-resistance of building materials is a method for forming their micro-porous structures. Here, the factor of possibility of transition of the liquid phase to cryophase (temperature of water freezing in the material), which depends on the coupling strength of water with the structure of material, is criterial for development of frost destruction. Depending on the structure of material, the value of water freezing temperature can be within the limits from 0°C to

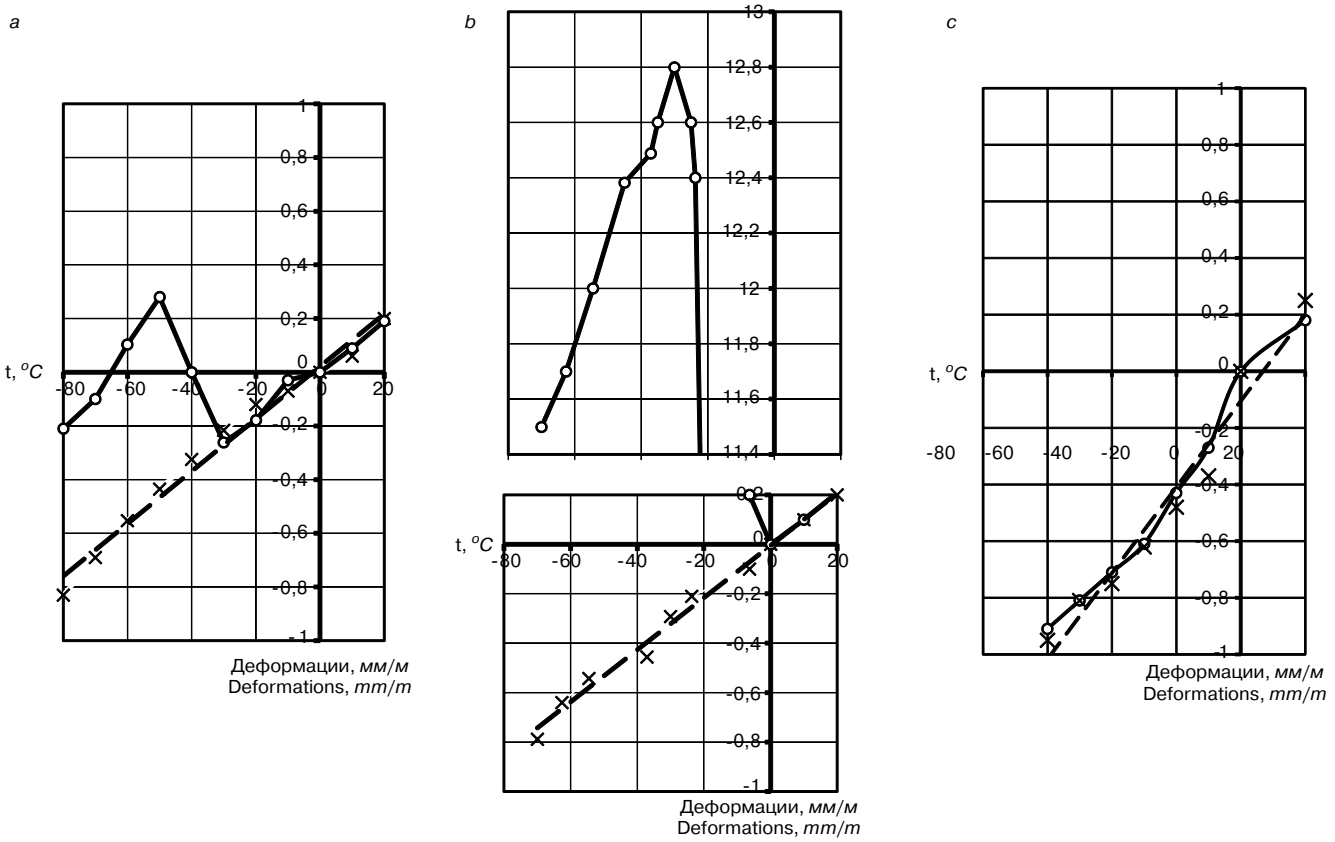

Рис. 3. Дилатометрические эффекты при замораживании сухих и водонасыщенных бетонов: -x- – сухие образцы; -o- – водонасыщенные образцы; *a* – немодифицированный микробетон $r_{экв}$ = 25 нм; *b* – немодифицированный микробетон $r_{экв}$ = 70 нм; *c* – модифицированный микробетон $r_{экв}$ = 5 нм

Fig. 3. Dilatometric effects during freezing of dry and water-saturated concretes: -x- – dry samples; -o- – water-saturated samples; *a* – unmodified micro-concrete $R_{equiv.}$ = 25 nm; *b* – unmodified micro-concrete $R_{equiv.}$ = 70 nm; *c* – modified micro-concrete $R_{equiv.}$ = 5 nm

Высокий потенциал морозостойкости бетонов нового поколения [17], создаваемых на основе системного модифицирования их структур, в том числе и на наноуровне, предопределяется следующими условиями. В структуре цементирующего вещества данных бетонов поровое пространство характеризуется преобладанием пор с размером 1–5 нм. Образования криофазы в них в эксплуатационном диапазоне температуры вообще не происходит (рис. 3, *c*). Это объясняется тем, что действие сил кристаллизации для перехода «структуры воды» в «структуру льда» оказывается недостаточным для соответствующей переориентации молекул воды в объеме пор и на границе с твердой фазой, поскольку вода находится в поле действия сил энергонасыщенного объема порового пространства.

Выводы

1. Реализация конструкционного потенциала структуры высокотехнологичных бетонов в диапазоне эксплуатационных температурно-влажностных их состояний определяется характером и силой связи твердой фазы и порового пространства с водой.

2. Рассмотрение механико-физико-химической природы и закономерностей взаимосвязи меры изменения свойств бетонов с его температурно-влажностным состоянием позволило обозначить систему структурных характеристик, влияющих на проявление и реализацию конструкционного потенциала материала. В этом смысле управление мерой изменения конструкционного потенциала структурой бетонов в эксплуатационном цикле должно основываться на регулировании баланса сил в соотнесении со следующими параметрами строения: $V_{тв.ф}$, $S_{тв.ф}$, $q_{тв.ф}$ – объемом, площадью поверхно-

-70°C, and the measure of material deformation at freezing (Pic. 3, *a, b*), which is a result and "test" of possible manifestation of crystallization pressure in the course of ice formation, may differ by two orders of magnitude at the change in the average equivalent radius of pores from 10 to 20 nm.

High potential of frost-resistance of concrete of a new generation [17] generated on the basis of systematic modification of their structures, including at the nano-level, is predetermined by the following conditions. In the structure of cementing substance of these concretes, the porous space is characterized by the predominance of pores of 1–5 nm size. The formation of the cryophase in them, within the operational range of temperatures does not take place at all (Pic. 3, *c*). It is explained by the fact that the effect of crystallization forces for transition of "water structure" to "ice structure" is not enough for the appropriate reorientation of water molecules in the pores volume and at the boundary with the solid phase since the water is in the area of action of forces of energy-saturated volume of the porous space.

Conclusions

1. The implementation of the structural potential of high performans concretes structures in the range of their operational temperature and humidity states is determined by the character and bonding strength of the solid phase and porous space with water.

2. The consideration of mechanical-physical-chemical nature and regularities of interrelation of the measure of concrete properties changing with its temperature-humidity state makes it possible to outline the system of structural characteristics impacting on the manifestation and implementation of the material structural potential. In this respect, the control over the measure of changing the structural potential by

сти и удельной поверхностной энергией твердой фазы; $r_{сэ}$ – размером структурных элементов; $V_{пор}$ – объемной долей пор и $dr_{пор}/dV_{пор}$ – распределением их по размерам; θ – краевым углом смачивания жидкостью поверхности твердой фазы.

3. Параметры структуры высокотехнологичных бетонов предопределяют относительно небольшой диапазон изменения их эксплуатационного влагосодержания – не более 4–5%. Однако повышенная сила связи их структуры с водой при меньшем объеме пор и их радиусе, при повышенной площади поверхности и поверхностной энергии твердой фазы обусловливает в целом возрастание в 1,5–2,5 раза величины удельных влажностных деформаций усадки-набухания на 1% изменения влажности (в сравнении с традиционными плотными бетонами). С другой стороны, особенности структуры высокотехнологичных бетонов препятствуют развитию процессов льдообразования при замораживании водонасыщенного материала в диапазоне температуры 0 – -60°С. Это оказывается предпосылкой и условием их повышенной морозостойкости.

4. Изменение температурно-влажностного состояния высокотехнологичных бетонов в эксплуатационном цикле может сопровождаться более существенным по сравнению с традиционными бетонами, изменением прочности. Более интенсивное развитие влажностных деформаций может сопровождаться высоким уровнем напряжений в конструкциях даже при незначительном изменении эксплуатационного влагосодержания высокотехнологичных бетонов. Для высокопрочных модифицированных бетонов их размягчение при водонасыщении оказывается существенно выше, чем для традиционных бетонов, не только при положительных, но и при отрицательных температурах. Все это необходимо учитывать при определении их расчетных характеристик.

Список литературы

1. Ананян А.А. Особенности воды в промерзающих тонкодисперсных горных породах. *Поверхностные силы в тонких пленках и дисперсных системах: Сб. науч. тр.* 1972. С. 116–127.
2. Александровский С.В. Александровский В.С. Базовая модель теории промерзания влажных пористых тел // *Бетон и железобетон*. 2005. № 6. С. 20–21.
3. Беркман А.С., Мельникова И.Г. Структура и морозостойкость строительных материалов. М.: Госстройиздат, 1962. 164 с.
4. Горчаков Г.И. Влияние льдообразования в порах бетона на морозостойкость // *Бетон и железобетон*. 1977. № 9. С. 35–37.
5. Добшиц Л.М. Физико-химическая модель разрушения бетонов при попеременном замораживании-оттаивании // *Вестник гражданских инженеров*. 2009. № 3 (20). С. 104–110.
6. Горчаков Г.И. Состав, структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат, 1976. 144 с.
7. Лыков А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах. М.: Гостехиздат, 1954. 320 с.
8. Богословский В.Н., Гагарин В.Г. Потенциал влажности. Теоретические основы. *Вестник ОСН РААСН. Вып. 1.* Москва. 1996. С. 12–14.
9. Цимерманис Л.Б. Термодинамические и переносные свойства капиллярно-пористых тел. Челябинск: Южно-Уральское кн. изд., 1970. 202 с.
10. Баженов Ю.М., Чернышов Е.М., Коротких Д.Н. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы // *Строительные материалы*. 2014. № 3. С. 6–14.

the structure of concretes during the operational cycle should be based on regulating the balance of forces in correlation with the following parameters of the composition: V_{sp}, S_{sp}, q_{sp} – volume, area of surface and specific surface energy of the solid phase, r_{se} – sizes of structural elements, V_p – volumetric proportion of pores, and dr_p/dV_p – their distribution according to sizes, θ – nterfacial angle of wetting of the solid phase surface with liquid.

3. Parameters of high performans concretes structure predetermine a relatively small range of change in their operational moisture content – not over 4–5%. But increased strength of relationship of their structure with water at less volume of pores and their radius, at increased area of surface and surface energy of the solid phase causes the growth of the value of specific moisture deformations of shrinkage-swelling by 1.5–2 times, change in humidity by 1% (in comparison with traditional dense concretes). From other side, features of the high performans concretes structure prevent the development of ice formation processes at freezing of water-saturated material in he temperature range +0 – -60°C. This is a prerequisite and condition of their improved frost resistance.

4. Changing the temperature-humidity conditions of high performans concretes during the operational cycle can be accompanied by more substantial change in the strength in comparison with traditional concretes. More intensive development of humid deformations may be followed by high level of stresses in structures even at the insignificant change in operational water content of high performans concretes. For high-strength modified concretes their softening at water saturation is significantly higher than for traditional concretes not only at positive temperatures but at negative temperatures also. All this should be taken into account at determining their calculated characteristics.

References

1. Ananyan A.A. Features of water in the freezing-through fine mountain breeds. *Superficial forces in thin films and disperse systems: International Scientific Conference*. 1972, pp. 116–127. (In Russian).
2. Aleksandrovskiy S.V., Aleksandrovskiy V.S. Basic model theory of freezing wet porous bodies. *Beton i zhelezobeton*. 2005. No. 6, pp. 20–21. (In Russian).
3. Berkman A.S., Mel'nikova I.G. Struktura i morozostoikost' stroitel'nykh materialov [Structure and frost resistance of building materials] Moscow: Gosstroiizdat 1962. 164 p.
4. Gorchakov G.I. Influence of ice formation in a concrete time on frost resistance. *Beton i zhelezobeton*. 1977. No. 9, pp. 35–37. (In Russian).
5. Dobshits L.M. Physico-chemical model of the fracture of concrete under alternate maintenance-thawing. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2009. No. 3 (20), pp. 104–110. (In Russian).
6. Gorchakov G.I. Sostav, struktura i svoistva tsementnykh betonov [The composition, structure and properties of cement concrete]. Moscow: Stroiizdat. 1976. 144 p.
7. Lykov, A.V. Yavleniya perenosa v kapillyarno-poristykh telakh [The transfer phenomena in capillary and porous bodies]. Moscow: Gostekhizdat. 1954. 320 pp.
8. Bogoslovskiy V.N., Gagarin V.G. Potential humidity. Theoretical basis. *Bulletin RAASN OSN*. 1996. Vol. 1, pp. 12–14. (In Russian).
9. Tsimermanis L.B. Termo-dinamicheskie i perenosnye svoistva kapil-lyarno-poristykh tel [Thermodynamic and figurative properties of capillary and porous bodies]. Chelyabinsk: South Ural Book Publishers.1970. 202 p.
10. Bazhenov Yu.M., Chernyshov E.M., Korotkikh D.N. Designing of structures of modern concrete: the defining principles and technological platforms. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 3, pp. 6–14. (In Russian).

11. Славчева Г.С. Влияние температурно-влажностного состояния на закономерности изменения показателей сопротивления разрушению бетонов // *Вестник гражданских инженеров*. 2010. № 1 (22). С. 23–28.
12. Славчева Г.С., Чемоданова С.Н. Новое поколение высокопрочных модифицированных бетонов: отличительные признаки структуры и закономерности развития деформаций // *Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура*. 2011. № 2 (22). С. 58–67.
13. Чернышов Е.М., Славчева Г.С. Физико-химическая природа взаимосвязи свойств строительных материалов с их влажностным состоянием // *Academia*. 2008. № 1. С. 87–92.
14. Чернышов Е.М. Формула «4С» (состав, структура, состояние, свойства) в концептуально-методологической парадигме современного строительного материаловедения // *Строительные материалы 4С: состав, структура, состояние, свойства: Междунар. науч. конф.* Новосибирск. 2015. С. 5–12.
15. Чернышов Е.М., Славчева Г.С. Управление эксплуатационной деформируемостью и трещиностойкостью макропористых (ячеистых) бетонов. Ч. 1. Контекст проблемы и вопросы теории // *Строительные материалы*. 2014. № 1–2. С. 105–112.
16. Чернышов Е.М., Славчева Г.С. Морозное разрушение и морозостойкость строительных материалов: современная трактовка механизма и факторов управления // *Вестник отделения строительных наук РААСН. Вып. 9*. Белгород. 2005. С. 447–459.
17. Славчева Г.С., Чернышов Е.М. Влияние структуры высокопрочных модифицированных бетонов на дилатометрические эффекты при их замораживании // *Вестник инженерной школы ДВФУ. Строительные материалы и изделия*. 2015. № 1 (22). С. 63–70.

11. Slavcheva G.S. Influence of a temperature and moist state on regularities of change of indicators of resistance to destruction of concrete. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2010. No. 1 (22), pp. 23–28. (In Russian).
12. Slavcheva G.S., Chemodanova S.N. New generation of the high-performance concrete: distinctive signs of structure and regularity of development of deformations. *Nauchnyi vestnik VGASU. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2011. No. 2 (22), pp. 58–67. (In Russian).
13. Chernyshov E.M., Slavcheva G.S. Physical and chemical nature of interrelation of properties of construction materials with their moist state. *Academia*. 2008. No. 1, pp. 87–92. (In Russian).
14. Chernyshov E.M. Formula "4C" (structure, structure, a state, properties) in a kontseptual-but-methodological paradigm of modern construction materials science. *Construction materials 4C: structure, structure, state, properties: International Scientific Conference*. Novosibirsk. 2015, pp. 5–12. (In Russian).
15. Chernyshov E.M., Slavcheva G.S. Management of operational deformability and crack resistance of macroporous (cellular) concrete. Part 1. Context of a problem and questions of the theory. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 1–2, pp. 105–112. (In Russian).
16. Chernyshov E. M. Slavcheva, G. S. Frost destruction and frost resistance of building materials: a modern interpretation of the mechanism and management factors. *Bulletin of the Department of construction Sciences RAACS*. Belgorod. 2005. Vol. 9, pp. 447–459. (In Russian).
17. Slavcheva G.S., Chernyshov E.M. Influence of structure of high strength modified concrete on dilatometric effects when freezing. *Vestnik inzhenernoi shkoly DVFU. Stroitel'nye materialy i izdeliya*. 2015. No. 1 (22), pp. 63–70. (In Russian).

Международная научно-практическая конференция

ПРОМЫШЛЕННЫЕ МИНЕРАЛЫ: ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗА, ПОИСКОВ, ОЦЕНКИ И ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

9–13 ноября 2015, г. Казань, Россия

Конференция проводится под эгидой Федерального агентства по недропользованию и Правительства Республики Татарстан. Конференция посвящена 70-летию ФГУП «ЦНИИгеолнеруд».

В работе конференции планируется участие известных российских и зарубежных ученых, руководителей геологических служб и недропользователей.

Темы конференции

- **Прогноз, поиски и оценка месторождений промышленных минералов**
- **Развитие мирового рынка промышленных минералов и направления развития отечественной минерально-сырьевой базы**
- **Инновационные методы и методики изучения и оценки качества сырья, технологии добычи, переработки, получения высоколиквидной продукции**

Контакты

По организационным вопросам: *Садыков Равиль Касимович* – к. г. н., заместитель директора по науке, (843) 238-74-66, E-mail: root@geolnerud.net

По программным вопросам: *Лыгина Талия Зинуровна* – д. г.-м. н., заместитель директора по науке, (843) 236-53-73 E-mail: root@geolnerud.net

Секретариат: *Антонов Вадим Алексеевич,* (843) 236-44-13, E-mail: antonov-geo@rumbler.ru
Хасанова Марина Борисовна, (843) 236-54-80, E-mail: nauka@geolnerud.net, marina-geolnerud@mail.ru

Адрес: Ул. Зинина, 4, Казань, Россия, 420097
Тел.: 8 (843) 236-47-93. Факс 8 (843) 236 47 04. E-mail: root@geolnerud.net
Подробная информация о конференции размещена на сайте: www.geolnerud.net