
СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Известия вузов. Строительство. 2021. № 11. С. 37–54.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2021; (11): 37–54.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 691.32:620.22

DOI: 10.32683/0536-1052-2021-755-11-37-54

УНИВЕРСАЛИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ КАК СТРУКТУРИРОВАННЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Евгений Михайлович Чернышов, **Алексей Иванович Макеев**

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Аннотация. Публикация касается обсуждения актуальной проблемы содержательного обоснования современной информационной модели бетонов как структурированных твердых тел, целенаправленно синтезируемых для строительных конструкций с задаваемым ресурсом работоспособности. Показывается, что начальным условием разработки основ теории структуры бетонов является их идентификация по универсалиям строения, в качестве которых принимаются многофазность, субстанциональность, полиструктурность, иерархичность, масштабная многоуровневость, детерминированность, стохастичность и диалектичность. Раскрывается содержательная характеристика универсалиев и их связь с механикой проявления конструкционных свойств в рамках положений теории сплошных сред, механики деформируемого твердого тела, строительной механики. Анализируется научное и инженерное значение предлагаемых трактовок универсалиев для обоснования современной информационной модели бетонов как объектов специального конструирования и технологического синтеза.

Ключевые слова: строительные композиты, системно-структурное материаловедение, универсалии строения, конструирование и синтез структур, подструктуры бетона, механика свойств

Для цитирования: Чернышов Е.М., Макеев А.И. Универсалии строительных композитов как структурированных твердых тел // Известия вузов. Строительство. 2021. № 11. С. 37–54. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-755-11-37-54.

Original article

UNIVERSALS OF BUILDING COMPOSITES AS STRUCTURED SOLIDS

Evgeny M. Chernyshov, **Alexey I. Makeev**

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. The publication concerns the discussion of the topical problem of essential substantiation of the modern informational model of concretes as structured solids, purposefully synthesized for structures with a given service life. It is shown that

the initial condition for the development of the foundations of the concrete structure theory is their identification by the universals of the structure, which are multi-phase, substantial, polystructural, hierarchical, large-scale multilevel, determinism, stochasticity and dialecticity. The substantive characteristic of universals and their connection with the mechanics of manifestation of structural properties in the framework of the provisions of the theory of continuous media, mechanics of a deformable solid, and structural mechanics are revealed. The scientific and engineering significance of the proposed interpretations of universals is analyzed for substantiating the modern information model of concretes as objects of special design and technological synthesis.

Keywords: construction composites, systemic and structural materials science, structural universals, design and synthesis of structures, concrete substructures, property mechanics

For citation: Chernyshov E.M., Makeev A.I. Universals of building composites as structured solids. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2021; (11): 37–54. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2021-755-11-37-54.

Введение. Публикация посвящена вопросам развития теории структуры композиционных строительных материалов, методов конструирования их структур по критериям задаваемых свойств и соответствующих функций в строительных конструкциях.

Определяющим сущностным моментом развития теории оказываются вопросы формализации и моделирования бетонов как структурированных твердых тел. При этом следует иметь в виду рассмотрения а) с самых общих позиций современного системно-структурного материаловедения и б) с его специальных позиций, когда каждая разновидность материала характеризуется как специфическая и особая при том, что она входит в некую общую универсальную систему.

В такой постановке проблемы идентификации бетона в форме модели структурированного твердого тела необходимым оказывается введение общезначимых признаков (универсалиев) строения и одновременно с этим – специфических, особых признаков строения. В наших работах по теории структуры строительных композитов в качестве универсалиев их строения принимаются [1, 2] субстанциональность, многофазность, полиструктурность, масштабная многоуровневость, иерархичность, детерминированность, стохастичность и диалектичность.

Формализация с самых общих или общезначимых позиций (т.е. по универсалиям) позволяет относить бетоны к системам, познаваемым и идентифицируемым в рамках соответствующей фундаментальной научной базы: теории сплошных сред, механики деформируемого твердого тела, строительной механики. Такая концептуально-методологическая формализация обеспечивает подходы, основания к формированию «базы знаний» в интегральной, обобщенной информационной модели бетона, которая включает в себя аксиоматику, терминологию, систему междисциплинарного фундаментального знания как основания для понимания и трактовки явлений, процессов получения систем твердения и структур бетонов.

Формализация с конкретных специальных позиций предполагает «раскрытие», дифференциализацию интегральной картины структурированного твердого тела (ранее идентифицированного с помощью вводимых универсалиев) и соответственно получение конкретных количественных оценок и прикладных моделей, оперирующих совокупностью детальных рассмотре-

ний и признаков строения любых типов структур из всех возможных их разновидностей. Такая фактологическая формализация имеет непосредственное отношение к формированию «базы данных» для информационной модели бетона, включающей методики и методы для идентификации структуры и свойств строительных композитов, опытные и экспериментальные данные о составе, структуре, состоянии, свойствах систем твердения и полученных на их основе композитов в соотнесении с технологическим и эксплуатационным циклами.

Подчеркнем актуальность, значимость и важность введения универсалиев в положения теории структуры строительных композитов!

Можно считать, что систематика универсалиев, во-первых, – это путь к пониманию необходимой для развития строительного материаловедения базы фундаментального знания, которое потребуется при решении перманентной задачи конструирования и синтеза структур материалов с наперед задаваемыми свойствами. Систематика универсалиев, во-вторых, – это своего рода «реакция» на процесс формирующейся методологии междисциплинарности в строительном материаловедении как области самостоятельного научного знания. Систематика универсалиев, в-третьих, – это необходимое условие для понимания актуальных и первоочередных направлений развития теоретических научных исследований в области строительного материаловедения и технологии, для обоснования практических, научно-практических экспериментов в контексте получения решений в перманентной задаче конструирования и синтеза структур материалов с наперед задаваемыми свойствами. Наконец, в-четвертых, систематика универсалиев – это основания к определению структуры базового научного знания и его дидактике, содержательного наполнения при подготовке инженерных кадров по направлению «строительство» и «строительное материаловедение».

Таким образом, проблемы и вопросы по «универсалиям», действительно, нуждаются в системном рассмотрении и обсуждении.

Универсалии структуры и их характеристика. Остановимся на понятийном рассмотрении термина «универсалии строительных композитов как структурированных твердых тел», появление которого является результатом эволюции структурного подхода в строительном материаловедении, формирования его концепций и оснований в работах ведущих отечественных и зарубежных ученых [3–23].

С самых общих позиций термин «универсалии» в данной постановке квалифицируется как всеобщность, сущностная характеристика объекта исследования. Применительно к бетону универсалии – это качественные общезначимые признаки его строения, в своей совокупности характеризующие принадлежность бетона к общности конгломератных строительных композитов с их специфической механикой проявления свойств.

Главным в обращении к этой категории в представляемой публикации является проблема и вопрос о ее значении в теории и практике идентификации бетонов с позиций формулы «4С» – «состав – структура – состояние – свойства», а более глубоко и шире – «технологический цикл» – «состав, структура, состояние, свойства» – «эксплуатационный цикл».

С другой стороны, существенным в обращении к этой категории являются проблема и вопрос о том, как и в чем системно-структурное материало-

ведение опирается на базовое научное знание из тех областей науки, к которым необходимо обращаться, формируя теорию и практику конструирования и синтеза структур материалов (бетонов) с наперед задаваемыми свойствами. При этом необходимо методологически признавать, что средством (арсеналом средств) достижения задаваемых свойств являются процедуры с управлением структурой материалов. Поэтому-то предлагаемые к рассмотрению универсалии связаны, в определяющей мере, с проблемами структуры, с ее идентификацией, формализацией и моделированием. Рассмотрение этих универсалиев в качественной и количественной постановке позволяет перейти от общего к конкретному, частному, что и определяет возможности управления формированием структуры.

Уже в самой формулировке «бетон – твердое тело» заключается универсалий диалектичности, так как в материаловедческом восприятии бетон – это не тело, а материал (материя, субстанция), и по своему определению не имеет пространственных ограничений (и соответственно массы и объема). Однако в реальности этот материал может существовать только как твердое тело (образец, изделие, конструкция) – часть пространства, заполненное субстанцией, материей и ограниченное замкнутой поверхностью, геометрией формы, сохранность которой обусловлена характером теплового движения атомов субстанции, совершающих свои колебания вблизи положений равновесия [1].

Принципиально важным в такой постановке является то, что это твердое тело не сплошное, однородное и изотропное, а структурированное, в котором целое образовано из составных частей (компонентов, фаз), т.е. наделено атрибутами дискретности, прерывности, как раз и соотносимыми с понятием «структура». Вместе с тем бетону как структурированному твердому телу присущи атрибуты континуума, непрерывности, что служит обоснованием применения к моделям бетона методов механики деформируемого твердого тела, обеспечивает возможности оценки при этом напряженно-деформированного состояния структуры, обосновывает понятие «внутренние напряжения» и т.д.

Помимо этого рассматриваемое нами структурированное твердое тело многофазно, полиструктурно, иерархично, масштабно многоуровнево, детерминировано, стохастично, что и принимается, как уже было указано, в качестве универсалиев строения бетонов.

Универсалий многофазности бетона как структурированного твердого тела в первую очередь означает, что все бетоны представляют собой гетерогенные твердо-газо-жидкофазовые системы. Твердая фаза обладает ближним или дальним порядком строения и обеспечивает геометрический размер, форму и объем самого бетона и строительной конструкции. Жидкая фаза в виде адсорбционно-связанной, капиллярно-конденсированной, капиллярно-насыщенной, свободной жидкости помещается в поровом пространстве, организованном в твердом теле порами различного по происхождению, по размеру и форме вида. Газовая фаза в структуре бетона занимает свободный от жидкой фазы объем порового пространства [1]. Универсалий многофазности в этом аспекте предопределяет необходимость применения закономерностей межфазных взаимодействий на границах Т-Ж, Т-Г, Ж-Г в рамках фундаментальных положений физической химии для

разработки принципов конструирования и синтеза структур материалов с наперед заданными свойствами.

Однако универсалий многофазности не ограничивается только общепринятой совокупностью фаз Т-Г-Ж, но и понятием фазы как однородной части системы, отделенной от других частей поверхностью раздела. Под это понятие подпадают твердофазные исходные компоненты структуры и новообразования, отличающиеся своей минералогией, морфологией, дисперсностью и т.п. Связанное с этим формирование в многокомпонентной структуре бетона границ раздела типа Т-Т, при переходе через которые скачком изменяется структура и состав вещества, отвечает критерию композитности строения бетона и обуславливает привлечение к разработке принципов конструирования и синтеза структур положений механики гетерогенных сред, механики композитов и др.

Универсалий полиструктурности отражает тот факт, что в целостном, едином объеме твердого тела одновременно сосуществуют и взаимодействуют структуры, различающиеся по своему генезису и механике проявления свойств. Как правило, эти структуры оказываются «вложенными» друг в друга по принципу «структура в структуре» (полиструктурная теория В.И. Соломатова [24]), но возможны и варианты «параллельной» реализации структур разных типов, примером чему служат бетонополимеры, полимерцементные бетоны и т.д.

Взаимосвязанные универсалии иерархичности и масштабной многоуровневости полиструктуры отражают принцип и признак структурной организации сложных систем, состоящий в упорядочении взаимодействий между ее частями, компонентами в диапазоне от высших к низшим. Принимая в качестве составных частей полиструктуры твердого тела ее масштабные уровни, получаемые мысленным «ранжированием» строения по характеристическому относительному размеру (масштабу) компонентов, универсалий иерархичности раскрывается в форме причинно-следственной взаимообусловленности этих масштабных уровней. Классически масштабная многоуровневость учитывается в разделении структуры бетона на макро-, мезо-, микро- и другие масштабные уровни [17–26]. Такой подход служит основанием для постановки вопросов теории макро-, микро-, мезомеханики конструктивных свойств и функциональных характеристик бетонов как структурированных твердых тел.

Универсалии детерминированности и стохастичности структурированного твердого тела означают, что его строение сочетает в себе наряду с признаками беспорядка, хаоса и признаки некоторой упорядоченности, закономерности. Действительно, композитная структура бетонов на разных масштабных уровнях оказывается чаще всего конгломератной, т.е. микро-, мезо-, макрозернистой и полученной механо-физико-химическим соединением исходных зернистых компонентов с образованием детерминировано-стохастических упаковок, которые обладают признаками закономерного (кубического, гексагонального и промежуточного типов упаковок; размещением частиц меньшего масштаба в межзерновых зазорах частиц большего масштаба), а одновременно с этим – признаками объективно стохастического, случайного с точки зрения вероятности реализации в данной точке геометрического пространства состава (субстанциональности), свойств и со-

стояний структурных элементов [1]. Это означает, что к разработке принципов конструирования и процедур синтеза структур бетона должны применяться вероятностно-статистические подходы с использованием соответствующего аппарата теории вероятностей и математической статистики.

В завершении проведенного «препарирования» универсалиев строения бетона как структурированного твердого тела считаем уместным заострить внимание на том, что все раскрываемые понятия являются разными проявлениями одной фундаментальной материаловедческой категории «неоднородность строения» – одного из наиболее важных идентификационных признаков бетона в процедурах формализации и моделирования его структуры. Именно поэтому в наших работах неоднородность структуры бетона получила специальное рассмотрение [27–31].

Идентификация структуры бетонов по универсалиям строения показывает их значение для разработки и развития теории конструирования и синтеза оптимальных структур конгломератных строительных композитов.

Исходные методологические послышки к публикации от системно-структурного материаловедения. Системно-структурное материаловедение, трактуемое как наука о закономерных причинно-следственных связях и отношениях свойств материала с его составом, структурой и состоянием, достигнутыми в ходе технологического цикла получения материала, а одновременно с этим и как наука о механике проявления этих свойств в эксплуатационном цикле применения материала в строительной конструкции при ее взаимодействии со средой [31], в качестве своего фундаментального основания имеет предложенную Е.М. Чернышовым формулу «4С» (рис. 1), показывающую, что свойства материала (как на момент изготовления, так и на любом сроке эксплуатации) являются функцией его состава, структуры и состояния.

Формула «4С» раскрывается в форме причинно-следственных соотношений и закономерностей, отражающих в том числе физико-химическую механику проявления свойств как реакцию структурированного твердого тела с его универсалиями на нагрузки и воздействия в строительных кон-

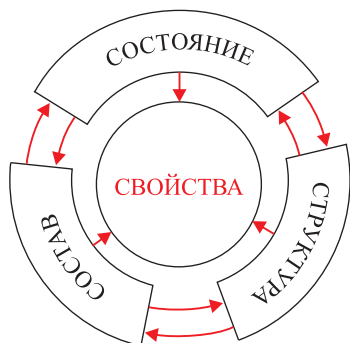


Рис. 1. Формула «4С»: «Состав, Структура, Состояние – Свойства» [31]

Fig. 1. Formula «4C»: «Composition, Structure, State – Properties» [31]

струкциях. Концептуально необходимо иметь в виду, что в системе «материал – конструкция – среда» потенциал работоспособности конструкции предопределяется влиянием «факторов материала», «факторов конструкции», «факторов среды». Предметной областью системно-структурного материаловедения выступает разработка принципов и средств (арсенала средств) управления технологическими процессами структурообразования для получения материалов с требуемым и задаваемым уровнем конструкционного качества (уровнем конструкционного потенциала) в эксплуатационном цикле при возможно наименьших затратах ресурса (сырья, энергии, овлеществленного труда, живого труда, финансовых средств) в производстве [31].

Принципы и средства управления структурообразованием строительных композитов всегда направлены на разрешение «минимаксных» оптимизационных задач: «с одной стороны, задач минимизации показателей материалоемкости, энергоемкости, трудоемкости получения строительной конструкции и самого материала строительной конструкции, а одновременно, с другой стороны, – задач обеспечения требуемого уровня конструкционных и функциональных их свойств» [31]. Именно этим предопределяется актуальность и необходимость создания и развития предлагаемой нами теории конструирования и синтеза оптимально организованных структур, т.е. структур соответственных (конгруэнтных) по условиям энергоэффективности работы в конструкции в определенных условиях воздействия факторов эксплуатационной среды (рис. 2).

При разработке принципов конструирования и средств синтеза структур обязательным условием, по нашему мнению, является прохождение аналитических этапов идентификации, формализации и моделирования явлений и процессов структурообразования композитов и самих структур «на момент изготовления» с соответствующим конструкционным и функциональным потенциалом в технологическом цикле и «развернутых во времени» явлений и процессов изменения структур в эксплуатационном цикле. В соответствии с этим идентификация, формализация и моделирование бетонов должны включать рассмотрение и получение двух групп моделей, образующих необходимую базу знаний и базу данных в контексте цифрового развития строительной науки.

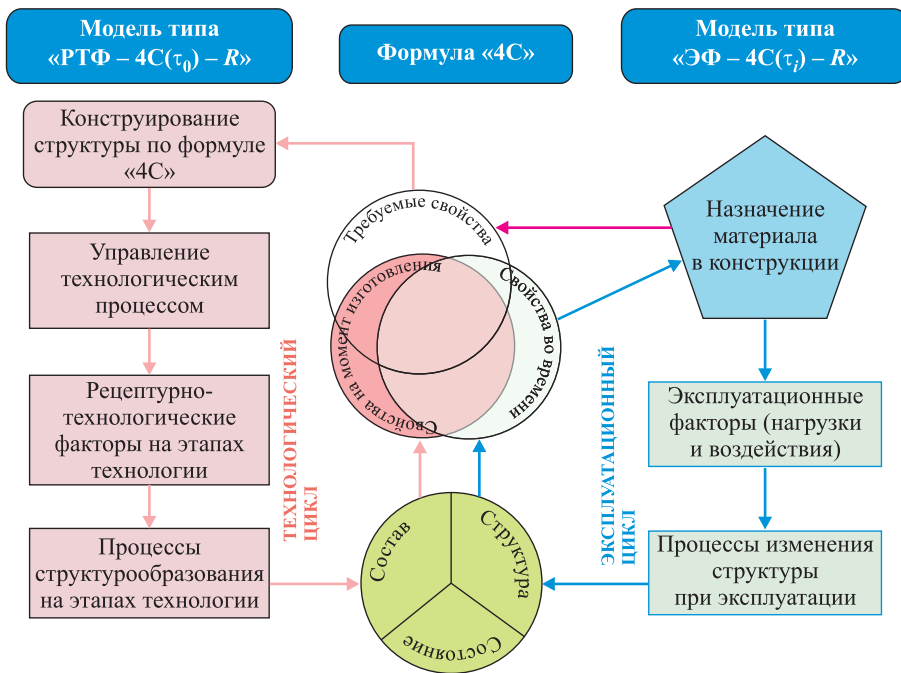


Рис. 2. Концептуально-методологические основы теории конструирования и синтеза оптимальных структур [2]

Fig. 2. Conceptual and methodological foundations of the theory of design and synthesis of optimal structures [2]

Первая группа моделей отражает закономерные соотношения в системе «рецептурно-технологические факторы (РТФ)» – «Состав, Структура, Состояние, Свойства композита, а соответственно его конструкционный потенциал R на момент времени изготовления τ_0 » [31]:

$$(4C)_{\tau_0} = f(\text{РТФ}), \quad (1)$$

$$R(\tau_0) = \varphi[(4C)_{\tau_0}] = f(\text{РТФ}). \quad (2)$$

Вторая группа моделей отвечает существу закономерных соотношений в системе «Состав, Структура, Состояние, Свойства композита в момент времени τ_i » – «механика проявления свойств композита при длительном τ_i воздействии факторов среды $P_{\text{ф.ср}}$ » [31]:

$$R(\tau_i) = f[R(\tau_0); P_{\text{ф.ср}}; \tau] \quad (3)$$

$$\text{или } R(\tau_i) = f[(4C)_{\tau_0}; R(\tau_0); P_{\text{ф.ср}}; \tau]. \quad (4)$$

Научные данные, полученные в этой группе моделей, обеспечивают возможности решения вопросов априорного конструирования структур на основе «добываемого» нового материаловедческого знания о механике проявления свойств как функции эволюционирующей структуры материала в условиях контролируемых режимов эксплуатационных воздействий на нее факторов среды $P_{\text{ф.ср}}$ в период τ_i . В то же время первая группа моделей направлена на решение вопросов синтеза «запроектированной» структуры композита с задаваемыми свойствами и $R(\tau_0)$ посредством управляемого варьирования совокупностью рецептурно-технологических факторов РТФ.

Научная и прикладная проблематика современных и предстоящих материаловедческих и технологических исследований при разработке принципов конструирования и синтеза оптимальных структур сводится, по сути, к этим двум группам моделей. При этом как в первой, так и во второй группе моделей первозначным является вопрос о механике проявления конструкционных свойств бетонов как структурированных твердых тел.

Бетон, композит как диссипативная система. Принятая нами [31–34] концепция механики проявления конструкционных свойств бетона исходит из того, что в процессе эксплуатации строительной конструкции и сама конструкция, и ее материал выполняют роль «преобразователей» (своего рода, трансформаторов) энергии внешних воздействий (механической нагрузки, нагревания, охлаждения, увлажнения, обезвоживания, химического взаимодействия и т.д., и т.п.) в деформации и напряжения, в энергию тепловых флуктуаций элементарных частиц (атомов или молекул), работу упруго-пластического деформирования системы структурных связей материала, поверхностную энергию образующихся берегов хрупких трещин, тепловые выделения, распространение механических волн и др.

В материале такое преобразование, трансформация внешней энергии сопровождается развитием в структуре материала явлений аккумуляции (накопления) энергии, ее диссипации (рассеяния, распределения) по макрообъему конструкции и, как следствие этого, локализации (сосредоточения) напряжений с соответствующей их концентрацией (усилением) в микрообъемах структуры материала и в его структурных связях (рис. 3).

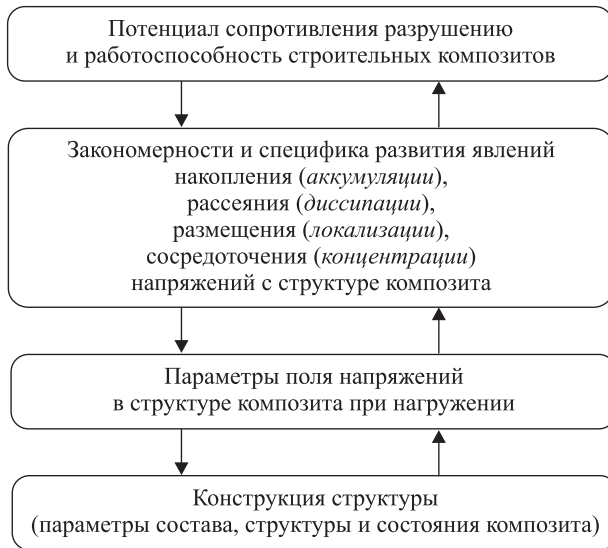


Рис. 3. Потенциал сопротивления композита разрушению как функция диссипативных свойств его структуры [31]

Fig. 3. The potential of the composite's resistance to destruction as a function of the dissipative properties of its structure [31]

Динамика процессов перехода предопределяется интенсивностью эксплуатационных воздействий среды, с одной стороны, и адаптивными «способностями» структуры композита к этим воздействиям, т.е. в целом диссипативными свойствами структурированного твердого тела. Под адаптивными способностями следует принимать стремление структуры с ее системой механических, физических, химических связей к состоянию термодинамического равновесия с эксплуатационной средой. В механике такое равновесие достигается в результате деформирования материала и конструкции, а на «финальных» этапах преобразования энергии – путем физического (термофлуктуационный разрыв структурных связей) и механического (возникновение, рост и развитие трещин) разрушения.

Универсалии бетона как структурированного твердого тела определяют специфику адапционного поведения работающего в строительной конструкции многофазного, полиструктурного, масштабно многоуровневого, детерминированно-стохастического, диалектического трансформатора энергии. Специфика заключается в том, что разрушение бетона представляет динамический многостадийный статистический процесс, включающий поуровневое «каскадное» повышение внутренних напряжений под действием характерных для структуры концентраторов (компонентов и дефектов) с формированием и появлением так называемых очагов перенапряжения и предразрушения, определяющих зарождение микрповреждений, а далее формирование магистральной трещины в композите [32].

При этом формирование поля внутренних напряжений развивается в направлении от макроскопических напряжений в мегаструктуре строительной конструкции (величина их есть функция геометрии конструкции, схемы ее загрузки, эпюр моментов и усилий) к неоднородным (по параметрам их

локализации и концентрации) микронапряжениям на наномасштабных и атомно-молекулярных структурных уровнях материала. Зарождение повреждений и формирование магистральной трещины в композите, напротив, детерминируются в направлении от атомно-молекулярно-наномасштабного к макромасштабному уровню композита, а в последующем и в итоге – к мегаструктурному уровню строительной конструкции.

В описанном процессе определенное число структурных связей может вообще не участвовать в работе сопротивления разрушению, и это, в принципе, можно считать недостатком структуры полученного композита, в котором весь его конструкционный потенциал оказывается незадействованным в эффективной работе в строительной конструкции. Отсюда формулируется критерий оценки эффективности структуры композита по его диссипативным характеристикам: преобразование (трансформации) энергии внешних воздействий должно отвечать условиям максимальной энергоемкости процесса разрушения. Одним из основных таких условий является вовлечение максимально возможного числа силовых структурных связей в работу сопротивления разрушению. Изучение возможностей выполнения этого условия в задачах конструирования и синтеза структур потребовало дифференциации структуры бетона на типичные подструктуры по признаку феноменологии, особенностей их генезиса, механики формирования напряженно-деформированного состояния, механики разрушения.

Дифференциация структуры бетона на подструктуры в связи с механикой проявления свойств. Проведенная нами идентификация конгломератных строительных композитов по универсалиям их строения [1, 2, 33] показала, что объектами разрушения в целостной полиструктуре композита одновременно являются три типа подструктур. При этом подструктуры второго и третьего типов оказываются «вложенными», т.е. входящими, в первый тип подструктуры.

Подструктура первого типа в бетоне «охватывает» диапазон 10^{-1} – $10^{-(4-5)}$ м и является результатом компактирования (с точечным и поверхностным контактированием) готовых зернистых частиц и образования так называемой «системы сложения», которая омоноличивается матричной субстанцией. Эта система может быть крупно-, мелко- и микрзернистой, занимать макро-, мезо- и микромасштабные уровни структуры и идентифицироваться на каждом таком уровне условно сплошным гетерогенным телом из пространственно-непрерывной матрицы и детерминированно-стохастически распределенных в ней дискретных включений соответствующего вида и размера.

Результатом формирования двухкомпонентной системы оказывается появление нового, производного структурного элемента – контактной зоны между матрицей и включениями, появление границы раздела, на которой и реализуется эффект концентрации напряжений, который может быть оценен по величине максимальных локализованных напряжений $\sigma_{loc.max}$ [27]

$$\sigma_{loc.max} = (K_1, \dots, K_i, \dots, K_n) \sigma_0, \quad (5)$$

где $\sigma_0 = P/F$ – величина среднего макроскопического напряжения в расчете на все сечение F , воспринимающее действующую внешнюю механическую нагрузку P ; $K_1, \dots, K_i, \dots, K_n$ – коэффициенты усиления напряжений по « n » – масштабным уровням структуры первого типа от действия соответствующих

им включений как концентраторов напряжений с их характеристиками и параметрами. При использовании моделей механики деформируемого твердого тела величину K_i можно представить [27] как экспоненциальную функцию вида

$$K_i = 3^{\frac{\pi}{\alpha}} (1 + \sin \beta) \exp [I_s + c - t_s - d - m_3 (N_k - 1) + C_v], \quad (6)$$

где α и β – характеристики формы и пространственной ориентации включения в теле композита относительно направления главных напряжений;
 I_s – индикатор субстанциональной разнородности матрицы и включений;
 c – коэффициент, учитывающий параметры контактной зоны;
 d – показатель, связанный с величиной удельной площади межкомпонентной поверхности раздела;
 m_3 – интенсивность масштабного эффекта;
 N_k – показатель геометрической конгруэнтности;
 C_v – статистическая оценка равномерности/неравномерности распределения включений по объему композита.

В связи с входящими в соотношение (6) переменными ставится вопрос об обосновании «арсенала» средств управления формированием поля напряжений в двухкомпонентной конструкции как функции влияния рецептурно-технологических факторов получения композита [30].

Подструктура второго типа реализуется в размерном диапазоне $10^{-(4-5)}$ – $10^{-(8-9)}$ м и представлена микро-, субмикро- и ультрамикромасштабными уровнями строения композита. Подструктура формируется в межзерновом объеме частиц заполнителя, наполнителя, цемента и на их механо-физико-химически активной поверхности. Таким образом, она оказывается следствием развития явлений конденсации относительно «плотной» новой фазы в приповерхностных объемах и относительно «разреженной» и пористой части новой фазы в свободных объемах вышеуказанного межзернового пространства [33].

С геометрической точки зрения для подструктуры второго типа можно говорить о плотной оболочке, наполненной и составленной из индивидуальных кристаллических (скрытокристаллических) единичных структурных элементов с контактами примыкания, срастания, прорастания.

Для прочности материала оболочки в качестве базовой может быть принято предложенное Е.М. Чернышовым обобщенное выражение

$$R_{kc} = f(N_{цв}; dR_N/dN_{цв}; K'; K''), \quad (7)$$

в котором отражается взаимосвязь сопротивлению разрушению R_{kc} с параметрами и характеристиками нано-, микроструктуры – числом контактов в единице объема новообразований $N_{цв}$; плотностью распределения контактов по прочности $dR_N/dN_{цв}$; долей числа контактов, воспринимающих напряжения при действии нагрузок K' ; показателем концентрации напряжений в новообразованиях, зависящим от геометрии упаковки и размера кристаллов и субмикрочастиц в них K'' .

Внутри указанных оболочек явления конденсации сопровождаются формированием другой по конструкции структуры: из монокристаллов складываются ансамбли и кластеры, консолидированные высокопористые образова-

ния. Несмотря на ярко выраженную стохастичность конструкции таких образований, они могут детерминироваться и быть уподоблены известным системам пространственных строительных макромасштабных конструкций (стержневых, стоечно-балочных, оболочечных и т.п.). Есть основания полагать, что между несущей способностью, жесткостью строительных конструкций и сопротивлением разрушению подструктур второго типа существует сходство, которое предполагает возможность использования аналитического аппарата теории строительной механики и расчета строительных конструкций для рассмотрения задач количественной оценки напряженно-деформированного состояния и потенциала сопротивления разрушению микроконструкций второго типа подструктуры. Правда, при обозначенном сходстве и сопоставлении придется столкнуться с трудностями их приведения к структурам, организованным по принципам регулярности и детерминизма. Возможно, придется обратиться к теории структурных конструкций, к методам их формализации, моделирования и расчета. Это окажется оправданным, чтобы понять, какие варианты конденсированных кристаллизационных структур и конструкций целесообразно синтезировать в технологическом цикле производства композитов. В этом случае речь, например, может идти о принятии решений по оптимально допустимой доле морфологически кристаллических (или скрытокристаллических) пластинчатых, волокнисто-игольчатых и прочих разностей в конденсируемых структурах новообразований [33].

Третий тип подструктуры идентифицируется на нано- и атомно-молекулярных масштабных уровнях строения в размерном диапазоне 10^{-8} – 10^{-10} м и относится к строению твердофазной субстанции индивидуальных скрытокристаллических или кристаллических новообразований соответствующей системы твердения (гидратационно-, гидротермально-, термально-синтезной) гипсового, известкового, цементного, силикатного или керамического композита. Эта субстанция представляет собой сплошное монофазное тело с определенной (ближней или дальней) регулярностью атомно-молекулярного строения, имеющего несовершенства в форме вакансий, замещений, дислокаций. несовершенства принимаются в качестве концентраторов напряжений, которые в процессе силовых воздействий на субстанцию кристалла выступают как инициаторы формирования очагов перенапряжений и начальных термофлуктуационных разрывов. Такие разрывы предопределяют старт предразрушения и последующего разрушения субстанции.

В вопросах конструирования и синтеза подструктур третьего и второго типов (систем твердения) можно опереться на арсенал средств влияния на процессы конденсации и кристаллизации фазы новообразований (с кислотно-щелочным балансом сырьевых смесей, с механохимическими режимами их подготовки, с водотвердым отношением, с введением кристаллических затравок, добавок поверхностно-активных веществ, с кинетическими и диффузионными режимами тепловлажностной обработки и т.п.).

Принимаемый полиструктурный принцип организации строения конгломератных строительных композитов, проявляющийся не только в многоуровневости их структуры, но и в одновременном «присутствии» в теле каждого композита трех разных по конструкции типов строения, предопределяет реализацию разных механизмов разрушения этих типов под нагрузкой. Такое

положение явилось основанием для согласованного привлечения к анализу процессов разрушения композита закономерностей физики твердого тела (в рамках термофлуктуационной теории Журкова), механики деформируемого твердого тела (в рамках механики гетерогенных сред) и механики разрушения (теория трещин Гриффитса). Результатом объединения «физических» и «механических» представлений стал предлагаемый и развиваемый авторами интегрированный механо-физико-химический подход [31] к существованию проявления конструкционных свойств конгломератных строительных композитов, в котором разрыв единичных атомно-молекулярных связей трактуется в рамках термофлуктуационной теории (физика разрушения), а образование макроскопических повреждений и потеря сплошности тела композита и конструкции вследствие развития микро- и макротрещин – в рамках закономерностей механики деформируемых твердых тел (механике трещин).

Как полагают авторы, дифференциация структуры на типичные подструктуры должна лечь в основу построения современной информационной модели бетона.

Заключение. Алгоритм и процедуры конструирования структуры бетона связываются, по сути, с задачей осознанного «наполнения» геометрического объема характерными для бетонов структурными элементами и получением при этом структурированного твердого тела, отвечающего всем его универсалиям. Во-первых, это должна быть композитная система, в которой реализуются правила и закономерности достижения синергетических эффектов, т.е. достижения качественных характеристик, отличающихся от их простого алгебраического аддитивного суммирования. Во-вторых, конструирование конгломератной композитной структуры должно исходить из критериев многофазности, полиструктурности, масштабной ее многоуровневости, в размерном диапазоне структурных элементов от 10^{-10} до 10^{-1} м. Наконец, при конструировании и синтезе должна учитываться диалектичность проявления и действия структурных универсалий. Это означает параллельность и одновременность позитивного и негативного неоднозначного проявления действия и влияния факторов из арсенала технологических средств получения бетона.

Из этих посылок следует и задается алгоритм конструирования и синтеза структур композитов с задаваемыми свойствами, который, по мнению Е.М. Чернышова, должен включать следующие этапы:

1. Качественная и количественная идентификация бетонов как структурированных твердых тел (по их универсалиям) – формализации и модели плотных, поризованных, ячеистых бетонов с гидратационно-, гидротермально- и термально-синтезными системами твердения.

2. Разработка моделей механики проявления конструкционных и функциональных свойств бетонов как структурированных твердых тел – формализации и модели для сопротивления разрушению при нагрузках и воздействиях.

3. Формирование современной информационной модели бетона.

4. Обоснование процедур конструирования структур.

5. Алгоритмизация процедур конструирования структур.

6. Разработка программного обеспечения конструирования структур.

7. Реализация цифровых программ синтеза конструкции структур.

Список источников

1. Чернышов Е.М., Макеев А.И. Материаловедение и технология строительных композитов как система научного знания и предмет развития исследований. Ч. 3. Системная идентификация «конструкции структуры» конгломератных строительных композитов (в качественной постановке проблемы) // Изв. вузов. Строительство. 2021. № 3. С. 5–26.
2. Чернышов Е.М., Макеев А.И. О проблеме развития, эволюции «цифрового подхода» в материаловедении и технологии строительных композитов // Современная наука: теория, методология, практика: Материалы III Всерос. (национальной) науч.-практ. конф. / Тамбовский гос. техн. ун-т. Тамбов, 2021. С. 9–21.
3. Михайлов В.В. Элементы теории структуры бетонов. М.: Стройиздат, 1941. 227 с.
4. Скрамтаев Б.Г. Теория прочности бетона и новые виды бетонов. М.: Стройиздат, 1934. 55 с.
5. Скрамтаев Б.Г. Исследование прочности бетона и пластичности бетонной смеси. М.: Стройиздат, 1936. 222 с.
6. Юнг В.Н. Теория микробетона и ее развитие // Труды сессии ВНИТО о достижениях советской науки в области силикатов. М.: Промстройиздат, 1949. С. 50–53.
7. Шейкин А.Е. Прочность цементного камня. Л.: ЛИИТ, 1940. 191 с.
8. Ахвердов И.Н., Смольский А.Е., Скочеляс В.В. Моделирование напряженного состояния бетона и железобетона. Минск: Наука и техника, 1973. 231 с.
9. Гордон С.С. Структура и свойства тяжелых бетонов на различных заполнителях. М.: Стройиздат, 1969. 151 с.
10. Состав, структура и свойства цементных бетонов / под ред. Г.И. Горчакова. М.: Стройиздат, 1976. 144 с.
11. Горайнов К.Э., Счастный А.Н. Теоретические и технологические основы получения высокопрочного цементного и силикатного камня // Строит. материалы. 1976. № 4. С. 28–29.
12. Иванов И.А. О действии некоторых факторов, определяющих структуру легких бетонов // Материалы четвертой конференции по ячеистым бетонам. Саратов: Приволж. кн. изд-во, 1969. С. 290–300.
13. Иванов Ф.М. Исследование морозостойкости бетона. Защита от коррозии строительных конструкций и повышение долговечности. М.: Стройиздат, 1969. С. 109–115.
14. Комплексный закон структурообразования: Методические указания по курсу «Общая теория строительных материалов». Ч. 1 / сост. А.В. Нехорошев. М.: МНИЗ, 1977. 52 с.
15. Мельниченко П.А. Структурно-статистический подход к решению задачи управляемого структурообразования композитов // Снижение материалоемкости и повышение долговечности строительных изделий. Киев: Будивельник, 1974. С. 66–76.
16. Подвальный А.М. Определение величины собственных деформаций в бетонном конгломерате на различных структурных уровнях // Завод. лаб. 1973. № 10. С. 1204–1206.
17. Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Добавки в бетон. М.: Стройиздат, 1973. 207 с.
18. Рыбьев И.А., Нехорошев А.В. Исходные методические позиции при исследовании искусственных строительных конгломератов // Строит. материалы. 1980. № 2. С. 24–26.
19. Соломатов В.И. Элементы общей теории композиционных строительных материалов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1980. № 8. С. 61–70.

20. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат, 1979. 344 с.
21. Чернышов Е.М. Системный анализ структуры силикатных автоклавных материалов и его приложения к изучению свойств, определяющих стойкость // Долговечность конструкций из автоклавных бетонов. Таллин, 1981. С. 14–18.
22. Lach W. Die Mikrostruktur – das Kernproblem Silikate. Tonind. 1976. Ztg. 100. H. 1. S. 7–15.
23. Райхель В., Конрад Д. Бетон. Ч. I. Свойства, проектирование, испытание / пер. с нем. М.: Стройиздат, 1979. 111 с.
24. Соломатов В.И. Развитие полиструктурной теории композиционных строительных материалов // Изв. вузов. Строительство. 1985. № 8. С. 58–64.
25. Чернышов Е.М. Материаловедение и технология строительных композитов как система научного знания и предмет развития исследований. Ч. 2. Развитие и эволюция научного знания о конгломератных строительных композитах как структурированных системах // Изв. вузов. Строительство. 2020. № 1. С. 57–77.
26. Селяев В.П., Селяев П.В. Физико-химические основы механики разрушения цементных композитов. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2018. 220 с.
27. Чернышов Е.М., Дьяченко Е.И., Макеев А.И. Неоднородность структуры и сопротивление разрушению конгломератных строительных композитов: вопросы материаловедческого обобщения и развития теории / под общ. ред. Е.М. Чернышова. Воронеж: ВГАСУ, 2012. 98 с.
28. Чернышов Е.М., Макеев А.И. К моделированию напряженного состояния структурно-неоднородных конгломератных композитов в строительных конструкциях // Междунар. журн. по расчету гражд. и строит. конструкций. 2015. Т. 11, № 2. С. 160–170.
29. Макеев А.И. Методологические основания теории конструирования и синтеза оптимальных структур конгломератных строительных композитов // Науч. вестн. Воронежского гос. архитектурно-строительного ун-та. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2015. № 1. С. 29–37.
30. Чернышов Е.М., Макеев А.И. О проблеме управления рецептурно-технологическими факторами получения бетонов в задачах конструирования и синтеза оптимальных их структур // Academia. Архитектура и строительство. 2018. № 3. С. 135–143.
31. Чернышов Е.М., Макеев А.И., Коротких Д.Н. Базовые положения механики проявления конструкционных свойств конгломератных строительных композитов. Ч. 1. Обзор результатов теоретических исследований проблемы конструирования и синтеза структур современных высокотехнологичных бетонов // Изв. вузов. Строительство. 2020. № 8. С. 43–51.
32. Чернышов Е.М. Материаловедение и технология строительных композитов как система научного знания и предмет развития исследований. Ч. 1. Постановка проблемы и ее существо // Изв. вузов. Строительство. 2018. № 12. С. 41–51.
33. Чернышов Е.М., Макеев А.И. Разрушение конгломератных строительных материалов: основные концепции, механизмы процессов, принципы и закономерности управления // Строит. материалы. 2007. № 9. С. 63–65.
34. Чернышов Е.М., Макеев А.И. Типы подструктур в целостной полиструктуре бетона и закономерности формирования параметров поля напряжений в композите (к развитию теории конструирования и синтеза структур конгломератных строительных композитов) // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2020 году: Сб. науч. тр. РААСН. Т. 2. М.: Изд-во АСВ, 2021. С. 304–314.

References

1. Chernyshov E.M., Makeev A.I. Materials science and technology of building composites as a system of scientific knowledge and a subject of research development. P. 3. System identification of the «structure structure» of conglomerate building composites (in a qualitative formulation of the problem). *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo = News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2021; (3): 5–26. (In Russ.).
2. Chernyshov E.M., Makeev A.I. On the problem of development, evolution of the «digital approach» in materials science and technology of building composites. Modern Science: theory, methodology, practice: Materials of the III All-Russian (national) Scientific and Practical conference. Tambov State Technical University. Tambov, 2021. P. 9–21. (In Russ.).
3. Mikhaylov V.V. Elements of the theory of concrete structure. Moscow: Stroyizdat, 1941. 227 p. (In Russ.).
4. Skramtayev B.G. The theory of concrete strength and new types of concrete. Moscow: Stroyizdat, 1934. 55 p. (In Russ.).
5. Skramtayev B.G. Investigation of the strength of concrete and the plasticity of the concrete mixture. Moscow: Stroyizdat, 1936. 222 p. (In Russ.).
6. Yung V.N. Theory of micro-concrete and its development. Proceedings of the VNITO session on the achievements of Soviet science in the field of silicates. Moscow: Promstroyizdat, 1949. P. 50–53. (In Russ.).
7. Sheykin A.E. The strength of the cement stone. Leningrad: LIIT, 1940. 191 p. (In Russ.).
8. Akhverdov I.N., Smol'skiy A.E., Skochelyas V.V. Modeling the stress state of concrete and reinforced concrete. Minsk: Nauka i tekhnika, 1973. 231 p. (In Russ.).
9. Gordon S.S. Structure and properties of heavy concrete based on various aggregates. Moscow: Stroyizdat, 1969. 151 p. (In Russ.).
10. Composition, structure and properties of cement concretes. Edited by G.I. Gorchakova. Moscow: Stroyizdat, 1976. 144 p. (In Russ.).
11. Goryaynov K.E., Schastnyy A.N. Theoretical and technological bases for obtaining high-strength cement and silicate stone. *Stroitel'nyye materialy = Building materials*. 1976; (4): 28–29. (In Russ.).
12. Ivanov I.A. On the action of some factors that determine the structure of lightweight concrete. Proceedings of the fourth Conference on Cellular concrete. Saratov, 1969. P. 290–300. (In Russ.).
13. Ivanov F.M. Study of concrete frost resistance. Corrosion protection of building structures and increased durability. Moscow: Stroyizdat, 1969. P. 109–115. (In Russ.).
14. Comprehensive law of structure formation: Methodological instructions for the course «General theory of building materials». P. 1. The compiler A.V. Nekhoroshev. Moscow, 1977. 52 p. (In Russ.).
15. Mel'nichenko P.A. Structural-statistical approach to solving the problem of controlled structure formation of composites. Reducing the material consumption and increasing the durability of construction products. Kiev: Budivel'nik, 1974. P. 66–76. (In Russ.).
16. Podval'nyy A.M. Determination of the value of intrinsic deformations in a concrete conglomerate at various structural levels. *Zavodskaya laboratoriya = Factory laboratory*. 1973; (10): 1204–1206. (In Russ.).
17. Ratinov V.B., Rozenberg T.I. Concrete admixtures. Moscow: Stroyizdat, 1973. 207 p. (In Russ.).
18. Ryb'yev I.A., Nekhoroshev A.V. Initial methodological positions in the study of artificial building conglomerates. *Stroitel'nyye materialy = Building materials*. 1980; (2): 24–26. (In Russ.).
19. Solomatov V.I. Elements of the general theory of composite building materials. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura = News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture*. 1980; (8): 61–70. (In Russ.).

20. Sheykin A.E., Chekhovskiy Yu.V., Brusser M.I. Structure and properties of cement concretes. Moscow: Stroyizdat, 1979. 344 p. (In Russ.).
21. Chernyshov E.M. System analysis of the structure of silicate autoclave materials and its application to the study of properties that determine resistance. Durability of autoclaved concrete structures. Tallin, 1981. P. 14–18. (In Russ.).
22. Lach W. Die Mikrostruktur – das Kernproblem Silikate. Tonind. 1976. Ztg. 100. H. 1. S. 7–15.
23. Raykhel' V., Konrad D. Concrete. P. I. Properties, design, testing. Transl. from German. Moscow: Stroyizdat, 1979. 111 p. (In Russ.).
24. Solomatov V.I. Development of the polystructural theory of composite building materials. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo = News of Higher Educational Institutions. Construction*. 1985; (8): 58–64. (In Russ.).
25. Chernyshov E.M. Materials science and technology of building composites as a system of scientific knowledge and a subject of research development. P. 2. Development and evolution of scientific knowledge about conglomerate building composites as structured systems. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo = News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2020; (1): 57–77. (In Russ.).
26. Selyayev V.P., Selyayev P.V. Physicochemical foundations of fracture mechanics for cement composites. Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 2018. 220 p. (In Russ.).
27. Chernyshov E.M., D'yachenko E.I., Makeev A.I. Inhomogeneity of the structure and resistance to destruction of conglomerate building composites: issues of materials science generalization and development of theory. Under the gen. ed. E.M. Chernyshov. Voronezh: VSUACE, 2012. 98 p. (In Russ.).
28. Chernyshov E.M., Makeev A.I. Modeling the stress state of structurally inhomogeneous conglomerate composites in building structures. *Mezhdunarodnyy zhurnal po raschetu grazhdanskikh i stroitel'nykh konstruksiy = International Journal for the Calculation of Civil and Building Structures*. 2015; 11(2): 160–170. (In Russ.).
29. Makeev A.I. Methodological foundations of the theory of design and synthesis of optimal structures of conglomerate building composites. *Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Fiziko-khimicheskiye problemy i vysokiye tekhnologii stroitel'nogo materialovedeniya = Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Physico-chemical problems and high technologies of building materials science*. 2015; (1): 29–37. (In Russ.).
30. Chernyshov E.M., Makeev A.I. On the problem of control of recipe-technological factors of concrete production in the problems of design and synthesis of their optimal structures. *Academia. Arkhitektura i stroitel'tvo = Academia. Architecture and construction*. 2018; (3): 135–143. (In Russ.).
31. Chernyshov E.M., Makeev A.I., Korotkikh D.N. Basic principles of the mechanics of manifestation of structural properties of conglomerate building composites. P. 1. Review of the results of theoretical studies of the problem of design and synthesis of structures of modern high-tech concretes. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo = News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2020; (8): 43–51. (In Russ.).
32. Chernyshov E.M. Materials science and technology of building composites as a system of scientific knowledge and a subject of research development. P. 1. Statement of the problem and its essence. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo = News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2018; (12): 41–51. (In Russ.).
33. Chernyshov E.M., Makeev A.I. Destruction of conglomerate building materials: basic concepts, mechanisms of processes, principles and patterns of management. *Stroitel'nyye materialy = Building materials*. 2007; (9): 63–65. (In Russ.).

34. *Chernyshov E.M., Makeev A.I.* Types of substructures in the integral poly-structure of concrete and the regularity of the formation of the parameters of the stress field in the composite (to the development of the theory of design and synthesis of structures of conglomerate building composites). Fundamental, exploratory and applied research of the RAACS on the scientific support of architecture development, urban planning and construction industry of the Russian Federation in 2020. Collection of scientific papers of the RAACS. Vol. 2. Moscow: ASV, 2021. P. 304–314. (In Russ.).

Информация об авторах

Е.М. Чернышов – академик РААСН, доктор технических наук, профессор

А.И. Makeev – кандидат технических наук, доцент, makeev@vgasu.vrn.ru

Information about the authors

E.M. Chernyshov – Acad. of RAACS, DSc, Professor

A.I. Makeev – PhD, Ass. Professor, makeev@vgasu.vrn.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 16.09.2021

Одобрена после рецензирования 18.10.2021

Принята к публикации 26.10.2021

The article was submitted 16.09.2021

Approved after reviewing 18.10.2021

Accepted for publication 26.10.2021