

*Баженов Ю.М., доктор техн. наук, профессор,
действительный член РААСН, заведующий кафедрой
“Технология вяжущих веществ и бетонов”
МГСУ, г. Москва, Россия*

СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ БЕТОНА

В последние десятилетия произошли значительные изменения в технологии бетона: от традиционных материалов с ограниченными возможностями к многокомпонентным системам с самыми разными структурами и свойствами, намного расширившими область применения бетонов, их номенклатуру, достигаемый технический и экономический эффект. **Новые бетоны в полной мере отвечают рыночной экономике и позволяют решать большинство строительных задач.**

Этот прогресс был достигнут за счет появления и внедрения в производство различных высокоэффективных химических и минеральных добавок в бетон, создания композиционных вяжущих веществ, расширения сырьевой базы бетонов, интенсификации технологии приготовления бетона и формирования бетонных и железобетонных конструкций и изделий.

Данные тенденции получают дальнейшее развитие. Более глубокое понимание процессов структурообразования бетона, развитие теоретических основ бетоноведения позволит осуществлять более целенаправленное совершенствование технологии бетона, добиваться получения наиболее оптимальных результатов.

Свойства бетона определяются его структурой. Наибольшее значение имеет **микроструктура бетона**. Управление структурообразованием материала на всех этапах производства бетона и конструкций - обязательный признак современной технологии бетона. Для создания оптимальной структуры бетона, предназначенного для разных условий эксплуатации, широко используют специальные **добавки-модификаторы структуры и свойств** бетона.

Добавки подразделяют на два вида: **химические добавки**, вводимые в бетон в небольшом количестве (0,1...2% от массы цемента) и **дисперсные минеральные добавки-порошки** (5...20% и более от массы цемента). В последнее время получают широкое распространение **органоминеральные добавки**, в которых в единую систему объединяются химические добавки и дисперсные минеральные добавки-наполнители. В этом случае достигается **более эффективное воздействие на структурообразование бетона** и получаются наилучшие результаты модификации структуры и свойств бетона.

Из химических добавок наибольшее распространение получили **суперпластификаторы**, позволяющие снизить водопотребность пластичных и литых бетонных смесей на 23...26% и применить при возведении бетонных и железобетонных конструкций литые самоуплотняющиеся и нерасслаиваемые бетонные смеси. С каждым годом увеличивается производство комплексных добавок, в которых к суперпластификаторам добавляются другие эффективные добавки: **антивоздухововлекающие, микропенообразующие, регулирующие сроки схватывания и деформацию структурообразования** и другие. В последнее время появились особо эффективные гиперпластификаторы на основе поликарбоксилатов.

Дисперсные минеральные добавки-наполнители представляют собой порошки различной минеральной природы, получаемые из природного или техногенного сырья (золы, молотые шлаки и горные породы, микрокремнезем и др.). Не растворяясь в воде, эти добавки, по существу, являются тонкой составляющей твердой фазы бетона. В зависимости от их дисперсности минеральные добавки можно подразделить на **добавки-разбавители цемента**,

близкие по своему гранулометрическому составу к цементу, и на *добавки-уплотнители*, например микрокремнезем, метаколин и другие, которые имеют размер частиц примерно в 100 раз меньше зерен цемента (удельная поверхность 20...30 м²/г). В последние годы появились нанодобавки с размером частиц в 0,1...100 Нм.

Добавки-уплотнители являются наиболее эффективными минеральными добавками, так как, заполняя пустоты между зёрнами цемента и его новообразованиями, способствуют уплотнению структуры бетона. При этом увеличивается тонкость новообразований цемента, значительно уменьшаются размеры воздушных пор, повышается реакционная способность смеси цемента с наполнителем, улучшается контактная зона материала. Все это обеспечивает значительное повышение прочности и непроницаемости структуры бетона.

Добавки-разбавители цемента позволяют получать бетоны низкой и средней прочности при применении суперпластификаторов, что без их использования практически невозможно из-за расслоения бетонной смеси. Тем самым обеспечивается не только экономия цемента, но и высокая эксплуатационная надежность бетонов.

Минеральные добавки делятся на химически активные и инертные. *Активные добавки* способны в присутствии воды взаимодействовать с диоксидом кальция при обычных температурах, образуя соединения, обладающие вяжущими свойствами. Некоторые из них, например молотые доменные шлаки, способны к самостоятельному твердению, которое активизируется в присутствии диоксида кальция. Активные минеральные добавки используют для управления процессом структурообразования.

Одной из наиболее эффективных минеральных добавок является микрокремнезем - отход производства кремнийсодержащих сплавов: ферросилиция, кристаллического кремния и других. В процессе производства образуются сверхмелкие частицы кремнезема (0,1...0,5 мкм) с содержанием в продукте 85...98% SiO₂. Однако тонкий порошок обладает высокой водопотребностью (нормальная густота 40...140%), что требует значительного увеличения расхода воды в бетонной смеси: в равноподвижных смесях на каждый килограмм введенного в смесь микрокремнезема расход воды возрастает на 1 л. Поэтому микрокремнезем применяют совместно с суперпластификатором, позволяющим значительно уменьшить расход воды. Одновременно особотонкодисперсные минеральные добавки повышают эффективность действия суперпластификаторов.

Активно воздействует на подвижность бетонной смеси та часть суперпластификатора, которая адсорбируется на поверхности твердой фракции бетонной смеси, существенно влияя на поверхностные взаимодействия и эффект смазки. Часть суперпластификатора, находящаяся в водном растворе в порах системы, более пассивна и лишь увеличивает расход суперпластификатора. Поэтому введение тонкодисперсных наполнителей уменьшает объем крупных водяных пор, повышает удельную поверхность твердой фазы и тем самым увеличивает активную часть суперпластификатора и его воздействие на систему в целом (чем-то аналогично уменьшению расхода битума или смолы за счет применения минеральных порошков в асфальто- или полимербетонах).

В последнее время предлагаются более дешевые, хотя и несколько менее эффективные, чем микрокремнезем, тонкодисперсные добавки: специально переработанные отходы газобетона и производства силикатного кирпича, метаколин и другие. Предварительное приготовление органо-минеральной добавки обеспечивает ее высокую гомогенизацию и улучшение свойств. С целью экономии дорогого микрокремнезема используют системы "суперпластификатор – микрокремнезем – зола" или другие подобные системы. Для регулировки твердения в органо-минеральные добавки вводят специальные вещества, например фосфорорганический комплексон.

Существенное значение имеет порядок введения добавки в бетонную смесь. При предварительном введении в процессе домола цемента суперпластификатор способен более компактно располагаться на поверхности зерен, возрастает доля активной части суперпластификатора, его эффективно действующее содержание увеличивается в 2-3 раза

по сравнению с введением непосредственно в бетонную смесь. Соответственно повышается положительный эффект от его применения.

При применении органо-минеральных добавок или систем «микрокремнезем – суперпластификатор» необходимо учитывать особенности введения добавок при домоле цемента, увеличивая долю суперпластификатора и определяя количество тонкодисперсного компонента по достижении наибольшей плотности твердой фазы композиционного вяжущего вещества.

При введении суперпластификатора в процессе приготовления композиционного вяжущего (возможно, совместно с другими химическими добавками) его оптимальная дозировка составляет 2-3%, что обеспечивает лучшую пластификацию цементного теста и бетонной смеси. Нормальная густота уменьшается в 1,7-2 раза (например, с 28% до 14%), что позволяет использовать в производстве особоплотные бетонные смеси с В/Ц 0,2-0,3 и получать высокую прочность бетонов. Такие композиционные вяжущие, получившие название «вяжущие низкой водопотребности» (ВНВ), в будущем получат широкое применение. Их состав будет усложняться, в него будут вводиться компоненты, обеспечивающие наилучшую пригодность материала к предназначенным условиям применения.

При введении добавок в бетонную смесь на поверхности зерен цемента адсорбируется не чистая добавка, а раствор суперпластификатора, и активная часть суперпластификатора уменьшается. Поэтому в бетонной смеси оптимальное содержание суперпластификатора составляет 0,7-1,2%, после чего эффективность действия добавки снижается. При введении органо-минеральных добавок суперпластификатор через раствор адсорбируется на зернах цемента, и его оптимальная доля приблизительно соответствует показателям, получаемым при введении суперпластификатора непосредственно в бетонную смесь. Однако общее содержание суперпластификатора в этом случае должно быть выше, так как часть его адсорбируется тонкодисперсным наполнителем.

Степень повышения дозировки суперпластификатора зависит от показателя нормальной густоты тонкодисперсного наполнителя, его доли в органо-минеральной добавке и относительного содержания добавки в массе цемента. Применительно к микрокремнезему с нормальной густотой 40% при его суммарном содержании в бетоне 10% (в % от массы цемента) дозировка суперпластификатора увеличивается всего на 8%, при содержании 20% - на 20%, при содержании 40% - на 80%. Соответственно, при нормальной густоте микрокремнезема 60% увеличение дозировки суперпластификатора составит 20, 40 и 200%. При этом предполагается, что микрокремнезем замещает соответствующую часть цемента.

Повышая плотность бетона, измельчая структуру новообразований и пор, связывая частично диоксид кальция, органо-минеральная добавка с микрокремнеземом в результате повышает прочность бетона. При этом резко возрастает подвижность бетонной смеси, что позволяет получать литые самоуплотняющиеся бетоны при Ц/В = 2,5...4, что, в свою очередь, способствует повышению плотности бетона.

Прочность бетона с органо-минеральной добавкой ориентировочно можно определить по формуле:

$$R_6 = K_1 AR_{ц} (Ц/В - 0,5),$$

где K_1 определяет относительное повышение прочности бетона при введении органо-минеральной добавки.

При введении в бетон 10%-й добавки микрокремнезема $K_1 = 1,25$, 20%-й – $K_1 = 1,4$, 30%-й – $K_1 = 1,5$ (в равноподвижных бетонных смесях). В действительности возможно достижение еще лучших результатов. Например, в отдельных опытах введение органо-минеральной добавки повысило прочность бетона в большей степени (табл. 1), при этом подвижность бетонной смеси оценивалась в 20 см осадки конуса.

Таблица 1 - Свойства бетона с добавкой МБ

Расход цемента	В/Ц	Прочность бетона при сжатии в возрасте 28 сут., МПа, при содержании добавки		
		0	10	15
300	0,45	28	47	65
480	0,32	50	75	95

Результаты подтверждают известное положение, что прочность бетона зависит от В/Ц только при прочих равных условиях. Изменение структуры цементного камня и бетона за счет их модификации добавками позволяет при одном соотношении В/Ц получать разную прочность бетона. Это подчеркивает особую важность управления структурообразованием бетона для получения оптимальных результатов.

Как показали исследования, **введение в бетон химических добавок не меняет основных технологических зависимостей бетона**: зависимость подвижности бетонной смеси от расхода воды, прочности бетона - от водоцементного отношения и других, а лишь изменяет их положение в системе "свойства - состав бетона". Аналогичным образом действуют органо-минеральные добавки. Это позволяет проектировать состав бетона и прогнозировать его свойства, используя известные зависимости для классического бетона и вводя к ним поправочные коэффициенты, учитывающие влияние применяемой добавки на структуру и свойства бетона.

Поскольку степень влияния органо-минеральной добавки на подвижность бетонной смеси, прочность и другие свойства бетона зависит от многих факторов, то целесообразно определять ее на основе предварительных испытаний, проводимых на предназначенных к применению материалах и в соответствии с планируемой технологией производства работ. При этом могут быть использованы математические методы прогнозирования свойств бетона на основе анализа банка опытных данных с использованием специальных компьютерных программ.

Введение суперпластификаторов и органо-минеральных добавок изменяет пределы действия известных зависимостей "свойства - водоцементное отношение", что требует проверки доброкачественности бетонной смеси (отсутствия расслоения в пластичных и излишнего воздухововлечения в жестких бетонных смесях). Доброкачественность бетонной смеси обеспечивается, если

$$В/Ц - В_{\Pi} \cdot П/Ц - ВЩ \cdot Щ/Ц = (0,86... 1,65) НГ,$$

где Ц, В, П, Щ - расходы цемента, воды, песка и щебня в кг/м бетона, В_п и В_щ - водопотребность песка и щебня в относительных единицах, НГ - нормальная густота цемента в относительных единицах. Нормальная густота и активность цемента в приведенных формулах должна определяться с учетом влияния органо-минеральных добавок на свойства вяжущих веществ.

Применение композиционных вяжущих веществ и комплексов химических и минеральных добавок является отличительной особенностью многокомпонентных бетонов. С каждым годом увеличивается их разнообразие. Введение наряду с другими добавками расширяющихся компонентов позволяет получать безусадочные и расширяющиеся бетоны. Создание в структуре тонкодисперсной воздушной фазы обеспечивает получение долговечных бетонов. Применение специально подобранного сырья дает широкую гамму декоративных бетонов, введение фибры или волокнистых добавок - получение фибробетонов с повышенной прочностью при растяжении и другими специальными свойствами. Особенно перспективно применение литых нерасслаивающихся бетонных смесей, содержащих наряду с суперпластификаторами специальные тонкодисперсные наполнители (например,

БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ, ВИРОБИ ТА САНІТАРНА ТЕХНІКА

известняковую муку, золу и другие), причем общее содержание тонкой твердой фракции (цемент + наполнитель) должно быть не менее 1/3 твердой фазы.

Для того чтобы получить бетоны низкой и средней прочности, используют разбавленные композиционные вяжущие (цемент + тонкомолотый шлак, или зола, или другие минеральные наполнители) либо, если применяется суперпластификатор или органо-минеральные добавки, вводят дополнительно тонкодисперсные минеральные добавки - разбавители цемента. Однако поскольку приготовление бетона в этом случае осуществляется при низких водоцементных отношениях, существенно повышается эффективность использования тонкомолотых минеральных компонентов, углубляется гидратация цемента и обеспечивается получение качественных и долговечных бетонов.

При создании конструкционно-теплоизоляционных бетонов по-прежнему будут использоваться легкие заполнители и ячеистые бетоны. Однако в их технологии также получают широкое применение химические и минеральные добавки, композиционные вяжущие вещества, новые виды мелких заполнителей.

Варьируя составы бетона и комплекс используемых компонентов, можно получать многокомпонентные бетоны самых различных свойств и самого разного назначения. Сегодня на практике применяют свыше 1500 разных видов бетона прочностью от 0,3 до 150 МПа и плотностью от 200 до 2800 кг/м³. В перспективе произойдет дальнейшее расширение номенклатуры бетонов.

В наивысшей степени достоинства многокомпонентных бетонов воплотились в концепции "бетонов высокого исполнения" - высококачественных бетонов. В этих бетонах как бы суммируются требования к технологии и свойства бетонов с отдельными высокими показателями: технология бетонных смесей высокой удобоукладываемости, бетона высокой прочности, стабильности объема и долговечности. Эти бетоны должны иметь прочность при сжатии 60...120 МПа и более, морозостойкость свыше 400 циклов, водонепроницаемость более W12, а также низкую проницаемость и ряд других особых свойств.

В технологии высококачественных бетонов наиболее полно реализуются преимущества композиционных вяжущих низкой водопотребности. В табл. 2 приведены свойства высококачественных бетонов на ВНВ, в которых в качестве крупного заполнителя использовался щебень из габродиабазы высокой прочности. Подвижность бетонной смеси составляла 1...4 см. Эти бетоны отличаются высокой прочностью не только в возрасте 28 сут., но и в возрасте 1 сут. (более 100 МПа). Появление таких высококачественных бетонов открывает большие возможности совершенствования строительных конструкций, зданий и сооружений.

Таблица 2 - Свойства высококачественных бетонов на ВНВ

Содержание ВНВ, кг/м ³	Водоцементное отношение	Прочность при сжатии, МПа, в возрасте, сут.		Морозостойкость, циклы
		1	28	
350	0,27	100,5	152,3	800
450	0,23	131,8	171,5	900
550	0,20	142,1	183,2	1100

В течение XXI века обретут широкое распространение и мелкозернистые бетоны. Эти бетоны обладают высокой технологичностью, позволяют получать самые разные структуры и, соответственно, свойства материала, заметно снижают стоимость бетона за счет применения недорогих местных песков и вторичных техногенных отходов. В этих бетонах более полно проявляется влияние различных добавок-модификаторов. Меняя состав и структуру бетона, можно на основе одного и того же сырья (только с разными комплексами добавок) получать мелкозернистые бетоны различного функционального назначения.

Как известно, зона контакта между заполнителем и цементным камнем - слабый элемент структуры бетона. В зоне контакта плотность структуры цементного камня меньше, чем в остальной его структуре вследствие неполного заполнения межзернового пространства твердой фазой. Общая пористость контактной зоны в 2,5-3,5 раза выше пористости цементного камня. В результате прочность на растяжение между цементным камнем и заполнителем достигает только 70% прочности цементного камня. Введение заполнителя ухудшает реологические показатели смеси и требует для получения равноподвижных смесей значительного увеличения водоцементного отношения, что ограничивает величину максимально достижимой прочности бетона. Введение суперпластификаторов или комплексных добавок «суперпластификатор - микрокремнезем - активизирующий компонент» не изменяет характер влияния заполнителя на свойства бетонной смеси и бетона, но позволяет существенно улучшить структуру бетона и повысить его прочность. В таблице 3 показана возможность достижения максимальной прочности бетона на примере мелкозернистого бетона из равноподвижной бетонной смеси, приготовленного на портландцементе марки «500» и на композиционном вяжущем со специальным комплексом модификаторов и с повышенной удельной поверхностью около 600 см²/г (К-1). Применение композиционного вяжущего позволяет существенно снизить В/Ц и повысить прочность бетона.

Таблица 3 - Максимально достижимая прочность мелкозернистого бетона

Вид вяжущего	Состав бетона	В/Ц равноподвижных смесей	Максимальная прочность при сжатии, МПа
ПЦ	1:0	0,3	86
	1:1	0,37	65
	1:2	0,44	51
	1:3	0,51	41
К-1	1:0	0,17	184
	1:1	0,23	131
	1:2	0,29	98
	1:3	0,36	73

Повышение максимально достижимой прочности материала достигается при сокращении расхода заполнителя. Наилучшие результаты могут быть достигнуты на беспесчаном материале. Однако в этом случае заполнитель целесообразно в определенной степени заменить на активный наполнитель, например молотый шлак, позволяющий сократить расход цемента и обеспечить регулируемое структурообразование, и ультрадисперсный наполнитель, например микрокремнезем или другие подобные материалы, способствующие уплотнению структуры и активно влияющие на физико-химические процессы, происходящие в твердеющем бетоне. Введение этих материалов должно согласовываться с комплексом химических модификаторов структурообразования и свойств.

Переход к тонкозернистой структуре бетона позволяет значительно повысить его прочность. В создании таких структур большую роль будут играть наносистемы и нанотехнологии.

Наноматериалы - это вещества с размером частиц от 0,1 до 100 нм, в которых изменение размеров частиц приводит к возникновению нового качества материала. Технология получения таких частиц и дальнейшая работа с ними относится к нанотехнологиям.

В технологиях бетона и порошковых строительных композитов используют очень тонкие минеральные порошки: наносиликаты, фуллерены и другие. В таблице 4 представлены их сравнительные характеристики.

БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ, ВИРОБИ ТА САНІТАРНА ТЕХНІКА

Таблиця 4 - Сравнительные характеристики микрокремнезема и наносиликата

Вид материала	Размер частиц, нм	Число частиц, н/см ³	Удельная поверхность, м ² /г
Микрокремнезем	180	$5,9 \cdot 10^{12}$	15 м ² /г
Наносиликат	14	$1,2 \cdot 10^{16}$	180 м ² /г

При получении эффективных гиперпластификаторов создают молекулы наноразмеров с разной структурой. Для повышения эффективности суперпластификаторов в них вводят наночастицы, например фуллерены, способствующие диспергации материала и его взаимодействию с цементом и твердой фазой бетона. Для специальных бетонов используют минеральное сырье, содержащее наночастицы.

При гидратации цемента, особенно в присутствии модификаторов, образуются коллоидные частицы наноразмеров и гелеподобные тонкие слои на поверхности цементных зерен. Сохранение подобных структур в затвердевшем бетоне способствует повышению его качества. В этой связи приобретают особое значение технологические приемы приготовления бетона и управления его первоначальным структурообразованием.

Для получения тонкозернистых бетонов желательно применять механо-химическую активацию, многостадийное перемешивание, роторные скоростные смесители, термоактивацию и другие технологические приемы.

Тонкозернистые высококачественные строительные композиты и бетоны позволяют создать новое поколение особозффективных ресурсо- и энергосберегающих изделий и конструкций: тонкостенных, слоистых, гибридных, трубчатых, комбинированных из нескольких материалов, позволяющих в несколько раз сократить расход бетона. Для обеспечения долговечности подобных конструкций будут использоваться специальные покрытия с применением наноматериалов и нанотехнологий.

Новые строительные композиты будут многокомпонентными системами, включающими специально подготовленные композиционные цементы, химические добавки-модификаторы, микрокремнезем, наносиликаты или другие ультрадисперсные минеральные компоненты, специальные заполнители и микроволокна. Применение особой технологии (высокого давления и других интенсивных приемов) позволяет снизить водоцементное отношение до 0,06...0,12 и достичь особо высокой прочности материала.

В технологиях бетонов XXI века будут применяться самые разнообразные материалы с широким диапазоном свойств и возможностей (табл. 5).

Таблиця 5 - Свойства разных видов бетона и композитов

Вид материала	Прочность при сжатии, МПа	Морозостойкость, цикл
Обычный бетон	10...50	50...300
Многокомпонентный бетон	40...100	200...500
Высококачественный бетон	80...160	500...1000
Бетонные композиты	150...850	>1000
Бетоны с регулируемой плотностью (200...1800 кг/м ³)	0,1...20	20...150

Это обеспечит создание новых конструкций зданий и сооружений, эффективных технологий их возведения, снижение сроков и стоимости строительства, создаст оптимальную среду жизнедеятельности человека.

В строительстве получают более широкое применение бетоны на специальных вяжущих веществах: серных, полимерных, композиционных гипсовых, каучукоподобных, магниезиальных и других. Однако в технологии таких бетонов будут реализовываться теоретические основы

создания искусственных каменных конгломератов, получившие наибольшее развитие для цементных бетонов и показавшие громадные возможности совершенствования структуры и свойств материалов за счет комплексных модификаторов и интенсивной технологии.

Дальнейшее развитие технологии цементных бетонов будет происходить в направлении применения все более тонких компонентов бетона и перехода к строительным композитам гидратационного твердения на основе ультрадисперсных компонентов и специальной технологии. В области модификаторов будет осуществляться переход к конкретному адресному созданию молекулярной структуры добавки в соответствии с ее предназначением.

УДК 620.18:666.7

*Керш В.Я., канд.техн.наук, проф.,
Холдаева М.И., ст. преп., Штец А.В., ассистент
Одесская государственная академия
строительства и архитектуры,
г. Одесса, Украина*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СВОЙСТВ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ С ПОЛИСТИРОЛЬНЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

Возрастающие требования к теплозащите ограждающих конструкций требуют разработки и применения эффективных энергосберегающих материалов и изделий на их основе. К таким высокоэффективным строительным материалам относятся легкие бетоны на минеральных вяжущих с заполнителем в виде вспененных полистирольных гранул.

Достаточно распространенным в настоящее время является **полистиролбетон** – композиционный материал, в состав которого входят портландцемент, пористый заполнитель – гранулы пенополистирола и, как правило, кварцевый песок в качестве наполнителя. Полистиролбетон обладает рядом преимуществ перед другими конструктивно-теплоизоляционными материалами: пониженной теплопроводностью и сорбционной влажностью, водонепроницаемостью, улучшенными показателями по морозостойкости, устойчивостью к колебаниям рецептуры и технологии.

Наряду с легкими бетонами на цементных вяжущих, весьма перспективными представляются материалы и изделия на основе **гипсовых вяжущих**, которые характеризуются хорошей огнестойкостью, звукоизолирующей способностью, гигиеничностью, широким диапазоном прочностных характеристик и малой теплопроводностью. Применение в качестве легкого заполнителя гранул вспененного полистирола позволяет снизить плотность материала, улучшить теплозащитные и звукоизоляционные свойства, экономить вяжущее.

В отличие от минеральных заполнителей, дозировка пенополистирола задается не по массе, а по объему. Таким образом, можно точно задать объем пор и, благодаря этому, плотность полистиролбетона или гипсополистиролбетона.

Влияние рецептурно-технологических факторов (РТФ) на физико-механические характеристики таких сложных многокомпонентных систем как легкие бетоны с пенополи-