

# Как превратить бетоны старого поколения в высокоэффективные бетоны нового поколения



Рассмотрены принципы превращения цементоемких бетонов старого поколения в высокоэффективные малоцементные бетоны нового поколения. Показана топологическая структура порошково-активированных бетонов с низким удельным расходом цемента на единицу прочности и физико-технические показатели тяжелых бетонов.

## В. И. Калашников,

*д-р техн. наук,  
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

Цементные бетоны начали производиться после изобретения и промышленного освоения производства портландцемента в первой половине XIX века. Начиная с этого периода и до 30-х годов XX века повышение прочности бетонов старого поколения следовало за повышением активности цементов. Качество бетонов, при прочих равных условиях, определялось маркой цемента. Качество заполнителей по показателям прочности, водостойкости и морозостойкости и качество воды затворения было высоким, неизменным и predetermined природой, но строители не могли в то время освоить это высокое качество, кроме воды затворения, в полной мере (к сожалению, и в настоящее время как во многих странах, так и в России в настоящее время).

На эволюционном пути улучшения качества бетона, повышения его прочности были прорывные технологии, связанные с разработкой высокоэффективных способов уплотнения, в соответствии с законом водоцементного отношения: виброуплотнения, виброуплотнения с пригрузом, по-

личастотного виброуплотнения, виброштампования, вибропроката, центрифугирования, вибровакуумирования и т. п. С развитием более энергозатратных технологий появились в эти периоды бетоны нового поколения, прочность которых превышала в 1,5-2 раза прочность бетонов, изготовленных из пластичных смесей.

Ресурсо- и энергосберегающими бетонами нового поколения можно считать и бетоны на появившихся шлакопортландцементах, если принимать во внимание не их технические, а экономические показатели, с сопутным решением экологических задач, связанных с утилизацией металлургических шлаков. Новым этапом в истории бетонов стало использование пуццоланических добавок и изготовление более водостойких бетонов для подводных сооружений.

Важным прогрессивным этапом в эволюции бетонов явилось использование пластифицирующих добавок с 30-х годов XX века, и прежде всего технических лигносульфонатов (в России названных СДБ). Хотя эти добавки обладали умеренным пластифи-

*\*Примечание:*

*В работе принимали участие В. М. Володин, Д. М. Валиев, Е. В. Гуляева, И. Ю. Троянов, А. В. Хвастунов, М. Н. Мороз*

цирующим действием, они сыграли большую роль в повышении прочности, долговечности бетонов и экономии ПЦ. В дальнейшем, до 90-х годов прошлого столетия, лигносульфонаты усовершенствовались с помощью различной модификации. Модифицированные лигносульфонаты и в настоящее время включены в стандарты ряда стран как пластификаторы бетонных смесей.

Самым важным этапом в развитии техники бетонов следует считать изобретение в 1969 году в Японии сильных пластификаторов на нафталинсульфонатной основе. Он характеризуется использованием рецептур бетонов старого поколения, модифицированных суперпластификаторами. Этот этап, к сожалению, продолжается в настоящее время в России и в других странах. Это поистине революционный этап в технологии бетонов старого поколения, и поэтому его следует отнести к переходному этапу в эволюции бетонов на пути к бетонам нового поколения. С использованием этих и подобных им СП на меламинасульфонатной основе, стали активно применяться высокопластичные бетонные смеси, изготовленные как на индивидуальном вяжущем — цементе, так и на композиционных вяжущих: шлакопортландцементах, с добавками золы, дисперсных минеральных наполнителей. Использование СП позволило повысить прочность «жирных» бетонов из пластичных и высокопластичных смесей до 70–80 МПа, снизить расходы цемента до 20–30%. Результаты могли бы быть значительно выше, но по-прежнему использовались бетонные смеси со старой рецептурой, т.е. в составах использовались три твердых компонента: цемент, мелкий заполнитель — песок и крупный заполнитель — щебень. В таких бетонах для полной реализации пластифицирующего действия СП не хватало дисперсного компонента — цемента. Только при избытке его совместно с водой увеличивался объем реологической матрицы. В лучших случаях, в жирных бетонах цемент заменялся на 10–30% дисперсным наполнителем. Но такая замена для снижения расхода цемента не меняла структурной топологии бетона и его прочности. В бетонах низких марок М200–300 такая замена приводила к снижению прочности. Суперпластификаторы не пластифицировали «тощие» бетоны с малым количеством водно-дисперсной фазы, т.е. цементного теста. С увеличением содержания цемента до 500–600 кг/м<sup>3</sup> пластификация возрастала, и можно было уменьшать содержание цемента до 20–30% без снижения прочности.

Бетоны с СП с высокой прочностью могли быть получены с расходом цемента 800–1000 кг/м<sup>3</sup>, но такие бетоны, во-первых, имели большую усадку, низкую трещиностойкость и высокую ползучесть. Во-вторых, они были крайне неэкономичными, а дисперсные наполнители, с помощью которых уже тогда можно было вместо цементно-

водной дисперсии, обогащенной цементом, использовать цементно-минерально-водную дисперсию, высоко наполненную минеральным порошком. Но дисперсные наполнители вводились очень осторожно и в небольших количествах. Физико-химические основы пластифицирования (разжижения) дисперсных систем из минеральных порошков высокоселективными диспергаторами не были разработаны. Хотя условия дезагрегирования структурированных дисперсных систем с позиций термодинамических и механических вибрационных представлений были широко освещены в работах Н.Б. Урьева [1,2] при исследовании дисперсий глин, водно-угольных суспензий, суспензий талька, электрокорунда и т.п. Научные работы, посвященные физико-химическому диспергированию высококонцентрированных минеральных порошков различной химико-минералогической природы для производства строительных материалов с сохранением чрезвычайно длительной агрегативной устойчивости, были рассмотрены в многочисленных ранних работах кафедры «Технология бетонов, керамики и вяжущих» [3], включающих многолетние исследования. В них [4] было показано, что при введении суперпластификаторов С-3, ЛСТ, Melment, Wiscoment, существенно уступающих по пластифицирующему действию современным СП на поликарбонатной основе, можно снизить предел текучести дисперсий с объемной концентрацией твердой фазы 65–72% в 10<sup>3</sup>–10<sup>4</sup> раза, что более существенно, чем при интенсивных вибрационных воздействиях на них. Аналогичное понижение выявлено и для вязкости.

Наиболее важным для технологий строительных материалов в этих работах были экспериментальные доказательства достижения водоредуцирующих эффектов, равных 8–15 (800–1500%), против 1,8–2,0 в цементных дисперсиях [4]. В этих экспериментах гравитационная текучесть пластифицированных минеральных суспензий сохранялась при снижении содержания воды в 8–15 раз! Именно такие кардинальные изменения реологических свойств и водоредуцирующих эффектов послужили основой для создания высокопрочных и особо высокопрочных бетонов нового поколения. Высокое обогащение пластифицированных цементных суспензий дисперсным наполнителем позволило считать реологию бетонных смесей с каменной мукой и тонким песком краугольным камнем новых технологий. В соответствии с этим, нами в 2007 году была сформулирована новая стратегия прогресса в получении высоконаполненных и высокоэкономичных бетонов рядовых марок М200–М600 и бетонов повышенной прочности М600–М1000: «Через рациональную реологию в будущее бетонов» [5]. Под рациональной реологией порошково-активированной бетонной смеси понимается «высокая» реология предельного дис-

## Цементные бетоны начали производиться после изобретения и промышленного освоения производства портландцемента в первой половине XIX века.

пергирования и разжижения цементного теста значительным количеством порошковой и тонкозернистой дисперсной фазы в дисперсионной среде. Основой создания всех высокоэффективных бетонов без реакционно-активных пуццоланческих добавок от классов В15–В20 до В100–В120, согласно нашим исследованиям, служат гиперпластификаторы в сочетании с новой рецептурой сухих компонентов, взаимно усиливающих друг друга при превращении геля в золь. Как известно, гель характеризуется дисперсией воды в твердой фазе (вода дискретна, дисперсные частицы — непрерывны), а золь — дисперсией твердой фазы в воде. Присутствие микрокремнезема нанометрического масштабного уровня усиливает этот переход и вместе с тем образует дополнительную цементирующую фазу с увеличением класса бетона до 120–140 МПа.

За рубежом стратегия создания бетонов нового поколения реализуется лишь в высокофункциональных (High Performance Concrete) и ультрафункциональных (UHPC) бетонах с высокой прочностью при относительно низких уровнях наполнения бетонов дисперсными и микродисперсными компонентами в связи с высокими расходами цемента (500–750 кг/м<sup>3</sup>). Степень наполнения обычно не превышает 30–50% от массы цемента.

Создание высокопрочных и сверхвысокопрочных бетонов нового поколения за рубежом началось с конца 80-х годов прошлого столетия и было вызвано необходимостью строительства из бетонов, взамен стали, небоскребов, морских платформ

для добычи нефти и газа, большепролетных мостов и других сооружений.

Современные высококачественные бетоны (ВКБ) классификационно сочетают в себе большой спектр бетонов различного назначения: высокопрочные и ультравысокопрочные бетоны [6], самоуплотняющиеся бетоны (SVB, SCC) [7], самонивелирующиеся (SLS), высококоррозионностойкие бетоны [8], реакционно-порошковые, в том числе, дисперсно-армированные бетоны (Reaktionspulver beton — RPB или Reactive Powder Concrete — RPC) [9]. Эти виды бетонов удовлетворяют высоким требованиям по прочности на сжатие и растяжение, трещиностойкости, ударной вязкости, износостойкости, коррозионной стойкости, морозостойкости.

Безусловно, переходу на новые виды бетонов способствовали, во-первых, революционные достижения в области пластификации бетонных и растворных смесей, а, во-вторых, появление наиболее активных пуццоланических добавок с высоким количеством наночастиц верхнего нанометрического уровня (100–300 нм) — микрокремнеземов, дегидратированных каолинов и высокодисперсных зол. Сочетание суперпластификаторов и, особенно, экологически чистых гиперпластификаторов на поликарбоксилатной, полиакрилатной и полигликолиевой основах позволяет получать сверхтекучие цементно-минеральные дисперсные системы и бетонные смеси. Благодаря этим достижениям, количество компонентов в бетоне с суперпластификатором достигло 6–8, водоцементное отношение снизилось до 0,24–0,28, при сохранении пластичности, характеризующейся осадкой конуса не менее 4–10 см. В самоуплотняющихся бетонах (Selbstverdichtender

Beton-SVB) с добавкой каменной муки (КМ) или без неё, но с добавкой МК в высококачественных бетонах (Ultrahochfester Beton, Ultra hochleistung Beton) на гиперпластификаторах, в отличие от литых на традиционных СП, совершенная текучесть бетонных смесей сочетается с низкой седиментацией и самоуплотнением при самопроизвольном удалении воздуха.

В целом, такие эффективные бетоны называются бетонами нового поколения, но это название относят только к высокофункциональным, к высокопрочным и особо высокопрочным бетонам, производимым за рубежом. В них высокий расход цемента 600–700 кг/м<sup>3</sup> соответствует высокой прочности — 150–200 МПа, при которой получают низкий удельный расход цемента на единицу прочности — 3–4 кг/МПа. По нашему мнению с учетом предложенной ранее терминологии [11] порошково-активированных бетонов, к ним необходимо отнести и бетоны рядовых марок с прочностью 20–50 МПа, выпускаемых в количестве 96–97% от всего выпуска бетона в мире, и бетоны с повышенной прочностью  $R_{сж} = 60–100$  МПа. Но такие бетоны, по нашему мнению, можно называть лишь тогда бетонами нового поколения, когда в них удельный расход цемента на единицу прочности на сжатие  $C_{R}^{уд}$  будет не выше 4–4,5 кг/МПа, т.е. не выше, чем в самых прочных бетонах. Почему именно этот показатель является основным критерием подразделения бетонов на бетоны нового поколения, бетоны переходного и старого поколения. Этот критерий является и технико-экономическим и экологическим по следующим причинам.

Во-первых, высокопрочные (ВПБ) и, особенно, сверхвысокопрочные (СВБ) бетоны с прочностью 100–200 МПа и более являются «экзотикой» и не появятся в короткие сроки в преимущественных объемах в зданиях и сооружениях [10]. По мере перехода строительства на использование ВПБ и СВБ для уникальных зданий и сооружений будет сохраняться производство цементосодержащих бетонов старого поколения с удельными расходами цемента  $C_{R}^{уд} = 8–10$  кг/МПа. Эти бетоны с прочностью 20–60 МПа необходимо заменить в короткие сроки высокоэкономичными бетонами нового поколения с  $C_{R}^{уд} \leq 4,5$  кг/МПа с расходами цемента на 1 м<sup>3</sup> бетона не более 150–300 кг вместо 300–600 кг. В этом случае не потребуются дополнительных наращиваний объемов производства портландцемента и строительства новых цементных заводов с длительными сроками окупаемости и большими энергозатратами.

Во-вторых, ограничения в строительстве новых цементных заводов — это исключение дополнительной эмиссии углекислого газа CO<sub>2</sub> в атмосферу от известняка и отходящих газов цементных печей, что является частичным решением экологической проблемы в регионах.

Таким образом, к бетонам нового поколения нельзя относить только высокопрочные и сверхвысокопрочные. К ним необходимо отнести все порошково-активированные тяжелые песчаные и щебеночные бетоны с широким диапазоном прочностных показателей:

- бетоны рядовых марок с диапазоном прочности 20–60 МПа;
- бетоны с повышенной прочностью от 60 до 100 МПа;
- высокопрочные бетоны с прочностью от 100 до 150 МПа;
- сверхвысокопрочные бетоны с прочностью от 150 МПа и более.

Что же объединяет и различает эти бетоны, если основной показатель их — прочность бетона — различается в 8–10 раз, а расход цемента — в 2–3 раза? Прежде всего они многокомпонентны. Многокомпонентность их определяется не только разнообразием химико-минералогического состава, но и масштабными уровнями дисперсности компонентов. Их объединяет наличие трех реологических матриц, а отличает — различное объемное содержание этих матриц в бетонах разных классов.

В составе, дополнительно к цементу, присутствуют дисперсные компоненты, по крайней мере, двух масштабных уровней. Новая реологически активная рецептура и новая топологическая структура позволяет снизить удельный расход цемента на единицу прочности  $C_{R}^{уд}$  до 4–4,5 кг/МПа и менее.

Новая рецептура — это повышенное содержание дисперсной фазы за счет добавления тонкомолотых, реологически активных в смеси с цементом и суперпластификаторами нового поколения, молотых горных пород. Содержание их в бетонах, по результатам наших исследований, варьирует от 40 до 110% к массе цемента, увеличиваясь при уменьшении содержания цемента.

В бетонах нового поколения каменная мука может заменяться на 10–20% и более пуццоланическими добавками микрокремнезема, метакаолина и т.п.

В новой рецептуре должен быть тонкий песок фракции 0,1–0,6÷0,1–0,4 мм, который, в смеси с цементом и суперпластификатором, усиливает реологическое действие последнего. Содержание тонкого песка в щебеночных бетонах нового поколения может изменяться от 80 до 350% к массе цемента.

Новая рецептура предусматривает снижение доли крупного или среднего песка и щебня, т.е. бетон должен быть малощебеночным с содержанием щебня 800–1000 кг/м<sup>3</sup>.

В соответствии с новой рецептурой формируется и новая топологическая структура, в которой существенно увеличивается объем реологической составляющей в бетонных смесях, обеспечивающий их пластичность и растекаемость. Если для заводской технологии

Новым этапом в истории бетонов стало использование пуццоланических добавок и изготовлением более водостойких бетонов для подводных сооружений.

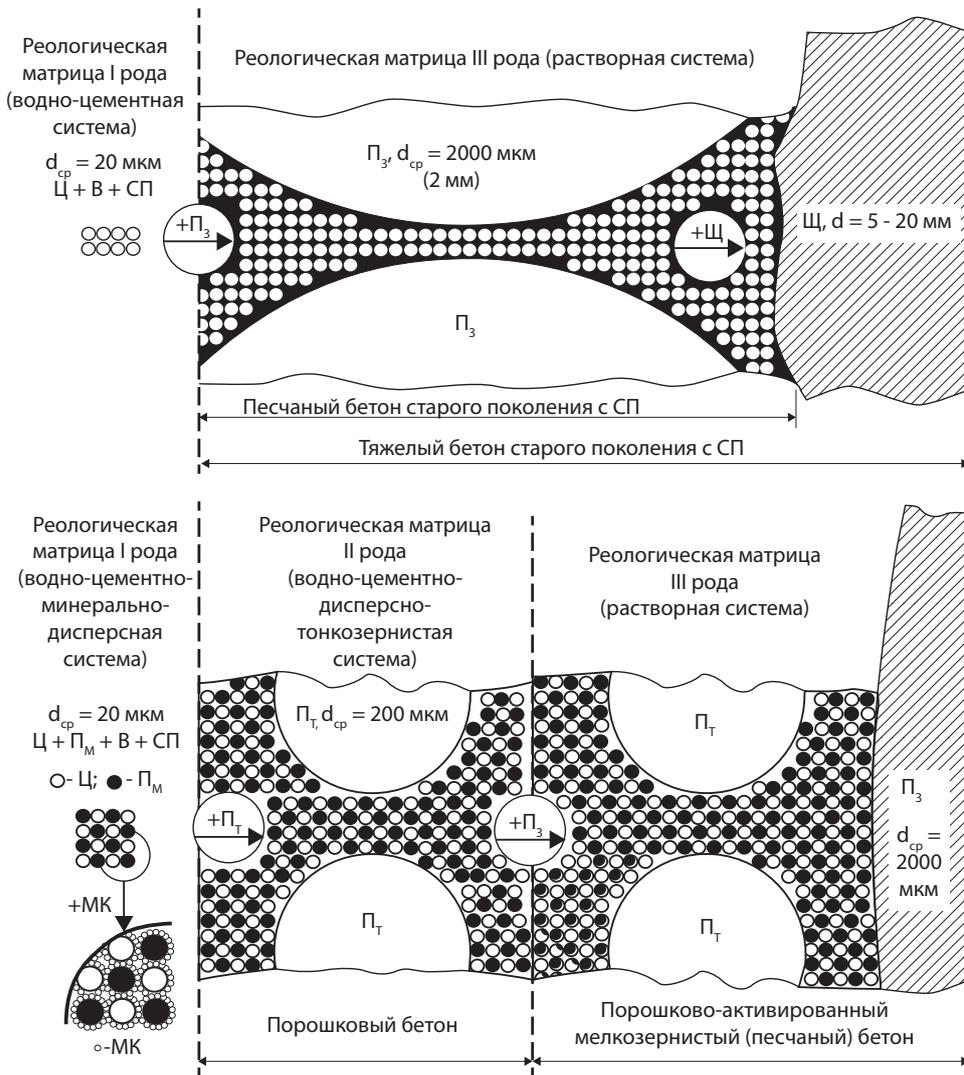


Рис. 1 (а) — Топологическая структура бетонов старого поколения (в том числе СП), (б) — Топологическая структура порошково-активированного бетона нового поколения (щебень условно не показан)

не требуются пластичные смеси, то реология их изменяется содержанием воды. При этом в топологической структуре щебеночных бетонов условно выделяются три реологические матрицы, отличающиеся содержанием в их объеме высокодисперсных, тонкозернистых наполнителей и мелкого и крупного заполнителя (рис. 1 а, б):

- основная высокодисперсная реологическая матрица I рода состоит из высокодисперсных частиц цемента, молотого наполнителя и микрокремнезема;
- реологическая матрица II рода состоит из матрицы первого рода и тонкого песка;
- реологическая матрица III рода состоит из матрицы II рода и среднего или крупного песков.

Реологическая матрица второго рода — это порошковая или реакционно-порошковая (с микрокремнеземом) бетонная смесь,

из которой могут быть получены высокопрочные и сверхвысокопрочные порошковые и реакционно-порошковые бетоны с прочностью 150-200 МПа. Прочность их зависит от granulometрии тонкого песка и его насыпной плотности в уплотненном состоянии. Чем меньше пустотность его, тем выше прочность бетонов. Тонкозернистые частицы песка фракций 0,1-0,6 мм в порошковой бетонной смеси раздвигаются друг от друга реологической матрицей первого рода по декартовым осям координат между поверхностями частиц. Среднее расстояние  $X$ , в соответствии с нашей формулой.

$$X = a \cdot d \cdot \sqrt[3]{1/C_v} - d$$

где  $d$  — средний диаметр частиц тонкого песка;

$C_v$  — объемная концентрация тонкого песка в порошковой бетонной смеси;

$a$  — коэффициент, зависящий от плотности упаковки, принимаемый для простой кубической с плотностью 0,523 равным 0,806; для случайной с плотностью упаковки 0,64 - 1,0; для гексагональной с плотностью 0,74 - 1,415.

В соответствии с нашими исследованиями, расстояние между частицами тонкого песка в реакционно-порошковом бетоне, обеспечивающее высокую текучесть смесей, находится в пределах 40-55 мкм ( $a=0,806$ ).

Реологическая матрица третьего рода — это не что иное, как порошково-активированная песчаная смесь для получения песчаных (мелкозернистых) бетонов. На ее основе можно получать также порошково-активированные щебеночные бетоны нового поколения. В этой матрице средний или крупный песок должны также иметь непрерывную granulometрию, обеспечивающую максимальную плотность песка в уплотненном состоянии. Частицы песка-заполнителя, так же как в предыдущем случае, раздвигаются матрицей II рода по направлению осей декартовой системы координат и образуют порошково-активированную песчанобетонную смесь (рис. 1 а, б).

В порошково-активированных щебеночных бетонах нового поколения песок-заполнитель и щебень должны иметь непрерывную granulometрию для получения высокой прочности бетонов с низким удельным расходом цемента на единицу прочности.

Наиболее наглядно топологическая структура выявляется на бетонах с малыми расходами цемента, т.е. на тощих бетонах. В таких бетонах старого поколения безразмерный параметр отношения суммы масс песка и щебня —  $\Pi+Щ$  к массе цемента  $\text{Ц}$  равен 7-10. Если принять за основу бетон следующего состава:  $\text{Ц} = 200 \text{ кг/м}^3$ ,  $\text{П} = 850 \text{ кг/м}^3$ ,  $\text{Щ} = 1200 \text{ кг/м}^3$  и  $\text{В} = 180 \text{ л/м}^3$ , то  $(\text{П}+\text{Щ})/\text{Ц} = 10,25$ . Соответственно, объемы компонентов при  $\rho_{\text{ц}} = 3,1 \text{ г/см}^3$ ,  $\rho_{\text{п}} = 2,7 \text{ г/см}^3$  и  $\rho_{\text{щ}} = 2,7 \text{ г/см}^3$ , будут равны:  $\text{Ц} = 66,6 \text{ л}$ ;  $\text{В}_n = 314,8 \text{ л}$ ;  $\text{В}_{\text{щ}} = 444,4 \text{ л}$ . Расчетная плотность бетонной смеси будет  $2430 \text{ кг/м}^3$ , а объем цементного теста —  $246,4 \text{ л}$ . Реальная плотность бетонной смеси может быть меньше, т.к. цементного теста не хватит для заполнения пустот в песке. Такое происходит, если расход цемента снижается до  $140-170 \text{ кг/м}^3$ . В этом случае между частицами песка может реализоваться полусухое трение из-за сцепления частиц песка друг с другом. Особенно часто такое наблюдается на дробленом горном песке.

Если принять насыпную плотность песка достаточно высокой и равной  $1600 \text{ кг/м}^3$ , то пустотность песка составит 41% и при указанной насыпной плотности для приведенного выше состава в песке массой  $850 \text{ кг}$  будет  $218 \text{ л}$  пустот при объеме цементного теста  $246,4 \text{ л}$ . Таким образом, объем цементного теста будет превышать объем пустот

всего лишь на 28,4 л. На схеме топологической структуры (рис. 1, а) небольшой избыточный объем цементного теста размещен в межчастичном пространстве песка и щебня, изображен в виде двух слоев одномерных шарообразных частиц цемента, условно не показанными прослойками воды на поверхности их. Реальная топология прослойки цементного теста будет чрезвычайно разнообразной. Как известно, в гранулометрическом составе цемента присутствуют частицы с размерами 0-200 мкм и 90% частиц имеют размеры 0-80 мкм. Поэтому в зазоре между частицами песка-заполнителя могут размещаться цементные частицы различных размеров, и толщина прослоек может возрастать или уменьшаться в 3-4 раза по сравнению с усредненной прослойкой 40 мкм. Такое же разнообразное изменение прослоек цементно-песчаного раствора происходит и между зернами щебня, т.к. песок может иметь различный гранулометрический состав, в котором присутствуют частицы песка в интервале размеров 0-5 мм.

Таким образом, в структуре бетонов старого поколения можно выделить водно-цементную дисперсную систему, которая является реологической матрицей первого рода и служит для перемещения частиц песка-заполнителя. Толщина цементно-водной прослойки, ее предел текучести и вязкость будут определять предел текучести и вязкость цементного раствора. Сочетание реологической матрицы первого рода с песком-заполнителем образует растворную реологическую матрицу, из которой можно изготовить песчаный бетон старого поколения. Растворная матрица, как структурная составляющая является, по существу, для бетонов старого поколения

второй матрицей, в которой размещается щебень. Если сравнить топологию бетона старого поколения с топологией порошково-активированных, то в последних имеется промежуточная матрица — дисперсно-тонкозернистая матрица второго рода. Такая реологическая матрица отсутствует в обычных бетонах, и они имеют дисперсную матрицу первого рода и растворную третью рода с грубозернистыми включениями песка. Поэтому цементно-песчаный раствор как реологическая система, в которой масштабный уровень частиц отличается в среднем на два десятичных порядка от 20 до 2000 мкм, названа нами реологической матрицей III рода.

В щебеночном бетоне старого поколения, состоящего из щебня с максимальной крупностью 20 мм, условно можно принять 3 вида десятичных порядков или масштабных уровней: 20 - 2000 - 20000 мкм. В связи с этим, реологические свойства бетонных смесей существенно ухудшаются, т.к. нет частиц промежуточного масштабного уровня со средним размером между 20 и 2000 мкм. Учитывая, что масштабные уровни разграничиваются обычно одним десятичным порядком, в бетон старого поколения необходимо ввести частицы песка со средним диаметром 200-300 мкм, т.е. внести еще один промежуточный десятичный порядок.

С этих позиций топологическая структура порошково-активированных бетонов нового поколения будет кардинально отличаться как для «тощих», так и для «жирных» бетонов.

Во-первых, «тощие» бетоны нельзя сделать качественными даже в присутствии СП и ГП из-за низкого содержания дисперсной фазы. Во-вторых, из-за отсутствия промежуточной тонкозернистой составляющей песка фр. 200-300 мм для заполнения пустот в более крупном песке фр. 0,16-5 мм требуется повышенное количество цемента. Поэтому в бетонах старого поколения, изготовленных из пластичных бетонных смесей, удельный расход цемента достигает 9-12 кг/МПа.

Эти недостатки исключены в порошково-активированных бетонах нового поколения. Добавление к цементу двукратного количества молотого наполнителя в малоцементном бетоне двукратно увеличивает объем цементной матрицы I рода. Если в бетоне используется микрокремнезем, то тончайшие частицы его, агрегированные на микрометрических частицах цемента, дополнительно увеличивают объем этой матрицы и снижают трение, играя роль шарикоподшипников между зернами цемента.

Введение тонкозернистого песка фракции 0,1-0,5÷0,16-0,63 мм (200-300 мкм) увеличивает суммарный объем дисперсно-тонкозернистой матрицы. Реологическая матрица I рода с увеличенным объемом в два раза способствует раздвижке зерен тонкого песка и перемещению их в водно-цементно-микрокремнеземистой матрице. В сово-

купности формируется реологическая матрица II рода. Она служит для перемещения частиц песка-заполнителя. В связи с введением молотого дисперсного наполнителя микрокремнезема и тонкого песка доля песка-заполнителя и щебня уменьшается с тем, чтобы сохранить объем бетона, равный 1000 л. Реологическая матрица III рода для бетона нового поколения принципиально отличается от такой матрицы в бетоне старого поколения. Во-первых, она содержит меньше песка-заполнителя и имеет повышенный коэффициент раздвижки зерен. Во-вторых, с уменьшением объема щебня в бетоне возрастает прослойка между зернами щебня и увеличивается подвижность бетонной смеси.

Проанализируем, как изменяются объемы реологических матриц в бетонах нового поколения (БНП) по сравнению с бетонами старого поколения (БСП) с одинаковым расходом цемента. Пластифицированный бетон нового поколения с расходом цемента 200 кг/м<sup>3</sup>, кроме того, содержит 200 кг/м<sup>3</sup> молотого кварцевого песка, 480 кг/м<sup>3</sup> тонкого песка, 520 кг/м<sup>3</sup> песка-заполнителя, 800 кг/м<sup>3</sup> щебня, 171 л воды.

Соответственно, объемы цемента  $V_{ц}=66,6$  л, молотого песка  $V_{пм}=74,1$  л, тонкого песка  $V_{пт}=177,8$  л, песка-заполнителя  $V_{пз}=192,6$  л, щебня  $V_{щ}=318,5$  л, воды  $V_{в}=171$  л. Объем бетонной смеси составит 1000,7 л, а плотность 2430 кг/м<sup>3</sup>.

Объемы различных матриц будут:

I рода:  $V_I = V_{ц} + V_{пм} + V_{в} = 66,6 + 74,1 + 171 = 311,7$  л.

II рода:  $V_{II} = V_I + V_{пт} = 311,7 + 177,8 = 489,5$  л.

III рода:  $V_{III} = V_{II} + V_{пз} = 489,5 + 192,6 = 692,1$  л.

Для сравнения вычислим объемы матриц в бетоне старого поколения с приведенным выше составом:

I рода:  $V_I = V_{ц} + V_{в} = 66,6 + 180 = 246,6$  л.

III рода:  $V_{III} = V_I + V_{пз} = 246,6 + 314,8 = 561,4$  л.

Рассчитаем условные реологические критерии, характеризующие соотношения объемов реологических матриц и объемов зернистых компонентов.

Условный реологический критерий  $I_I$  для реологической матрицы первого рода:

$$I_I = \frac{V_I}{V_{п_1}} = \frac{311,7}{177,8} = 1,75;$$

Условный реологический критерий  $I_{II}$  для дисперсно-тонкозернистой матрицы:

$$I_{II} = \frac{V_{II}}{V_{п_2}} = \frac{489,5}{192,6} = 2,54;$$

Условный реологический критерий  $I_{III}$  для грубозернистой растворной матрицы:

$$I_{III} = \frac{V_{III}}{V_{щ}} = \frac{692,1}{318,5} = 2,17;$$

Самым важным этапом  
в развитии техники бетонов  
следует считать изобретение  
в 1969 году в Японии сильных  
пластификаторов на нафталин-  
сульфонатной основе.

У бетона старого поколения:

$$I_I = \frac{246,6}{314,8} = 0,78;$$

$$I_{III} = \frac{561,4}{444,4} = 1,26.$$

Как видно из значений условных реологических критериев порошково-активированных бетонов, все они значительно больше единицы и характеризуют существенное превышение объемов реологических матриц над объемами тонкозернистых, грубозернистых компонентов, которыми вмещаются в них с большими раздвигами частиц и зерен.

В бетоне старого поколения  $I_I < 1$ , что свидетельствует о недостатке объема цементно-водного теста (матрицы I рода), и такая бетонная смесь будет жесткой или малопластичной.

Определим объемные концентрации матриц в порошково-активированных бетонах: для матриц I рода:

$$C_V^{I_1} = \frac{177,8}{66,6 + 74,1 + 171 + 177,8} = 0,36;$$

для матриц II рода:

$$C_V^{II_3} = \frac{192,6}{489,2 + 192,6} = 0,278;$$

для матриц III рода:

$$C_V^{III_5} = \frac{318,5}{692,1 + 318,5} = 0,315.$$

Для обычного бетона:

для матриц I рода:

$$C_V^{I_3} = \frac{314,8}{66,6 + 180 + 314,8} = 0,56.$$

для матриц III рода:

$$C_V^{III_4} = \frac{444,4}{561,4 + 444,4} = 0,442.$$

Используя ранее приведенную формулу (с коэффициентом  $a = 0,806$ ), можно подсчитать средние расстояния между поверхностями структурных элементов, размещенных в углах куба, приняв частицы условно

шарообразными. Примем усредненные диаметры частиц тонкого песка 0,2 мм, песка-заполнителя — 2 мм, щебня — 10 мм. Тогда расстояние между частицами тонкого песка будет 0,256 мм, между частицами песка-заполнителя — 0,46 мм и между зернами щебня — 1,81 мм.

В бетоне с обычной рецептурой зерна щебня размещаются на расстояниях 0,56 мм, что в три раза меньше, чем в порошково-активированных щебеночных бетонах (ПАЩБ). Для определения расстояний между частицами песка-заполнителя в рассматриваемом бетоне с расходом песка-заполнителя 850 кг/м<sup>3</sup> формула для кубической упаковки дает отрицательный результат, что свидетельствует о контактировании частиц между собой, так как объемная концентрация частиц песка-заполнителя, равная 63,6%, больше 52,3%. При более плотной случайной упаковке шаров ( $C_V = 64,3\%$ ), когда коэффициент  $a = 1,0$ , зерна песка-заполнителя в соответствии с расчетом имеют прошлойку цементного теста  $X_{ПЗ} = 0,44$  мм. Расстояние между зернами щебня составляет 3,1 мм. Для порошково-активированного бетона  $X_{ПТ} = 0,80$  мм,  $X_{ПЗ} = 1,06$  мм,  $X_{Щ} = 4,65$  мм. В случае кубической упаковки частиц песка-заполнителя, когда по расчету не хватает объема цементного теста для заполнения

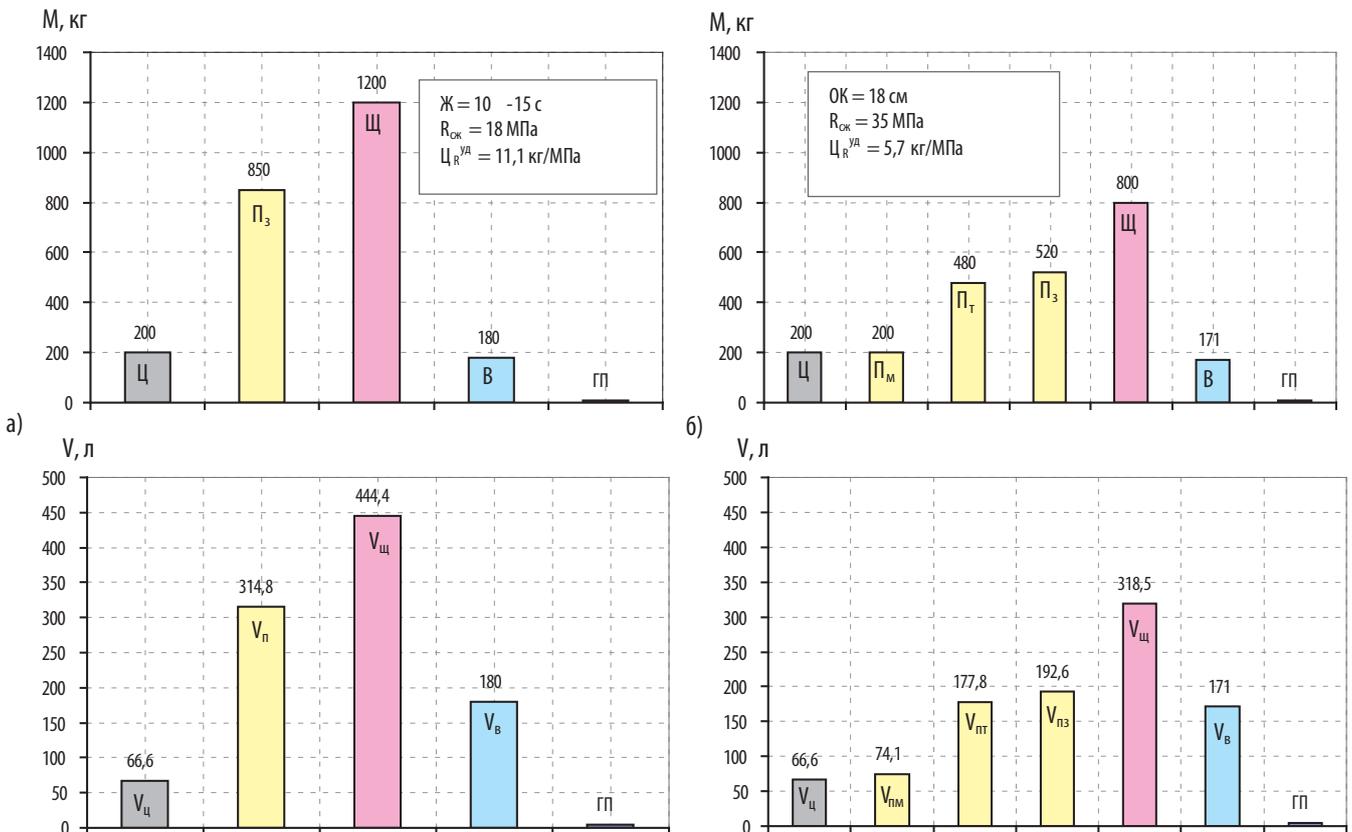


Рис. 2. Составы бетонов старого поколения (а) и нового поколения (б) их прочность и консистенция бетонных смесей

пустот в песке, тончайшая цементно-водная прослойка всегда будет реально образовываться на частицах песка. Но она не обеспечит достаточного уменьшения предела текучести из-за проявления жесткого трения между частицами песка.

Предположим, что между частицами реализовалась наиплотнейшая гексагональная упаковка ( $a = 1,415$ ). В результате более плотной упаковки и раздвижки ее по декартовой системе координат расстояния между структурными элементами увеличатся. Для реакционно-порошкового бетона  $X_{пг} = 0,196$  мм,  $X_{пз} = 2,33$  мм,  $X_{щ} = 10,73$  мм. Для обычного бетона  $X_{пг} = 1,45$  мм,  $X_{щ} = 8,54$  мм.

На рис. 2 изображены составы бетонов нового и старого поколений и их прочность. Видно, что прочность БНП, изготовленного из высокопластичной бетонной смеси, в два раза выше, чем бетона старого поколения.

Таким образом, принципы подбора песков и щебней с оптимальной гранулометрией для бетонов старого поколения остаются неизменными и для бетонов нового поколения. С учетом того, что в составе последних используется тонкий песок фр. 0,1-0,6÷0,1-0,4 мм, он тоже должен иметь высокую насыпную плотность. Поэтому для бетонов нового поколения необходимо иметь набор фракций каждого вида заполнителей для оптимизации гра-

нулометрического состава смеси заполнителей путем смешения их отдельных фракций в заданных пропорциях. К сожалению, российские карьеры поставляют щебень в лучшем случае двух фракций — 5-10 мм и 10-20 мм, в худшем — широкую фракцию 5-20 мм. В последнем соотношении двух промежуточных фракций (5-10 и 10-20 мм) может изменяться в широких пределах, которые обусловлены типом дробильного оборудования и гравитационной сепарацией щебня по его крупности при формировании щебеночных конусов и призм на карьерах.

Пески, добываемые на местных карьерах, имеют значительные колебания фракционного состава, содержат глину, ил и пыль. Использовать их без вибро- и пневмосепарации в высокоэффективных бетонах нового поколения не представляется возможным. Еще более значительным колебаниям гранулометрического состава подвержены речные намывные пески, добываемыми земснарядами. Такие пески легко обогащать, имея 2-3 гидроциклона. Большинство речных песков классифицируются одним гидроциклоном для удаления грубых (гравийных) фракций. Глинистые, илистые и пылеватые частицы остаются в песке. Их содержание может сильно варьировать в зависимости от профиля речного или озерного дна. И Россия, и любая другая страна на все времена останется без бето-

нов нового поколения как с традиционной прочностью, так и высокопрочных и особо высокопрочных, а производство бетонов всегда будет высокозатратным, если не изменится техническая политика в подготовке качественных фракционированных песков, щебней и дисперсных наполнителей.

Важнейшую роль при производстве бетонов нового поколения играют СП. Строительная химия в России поставляется, в основном, суперпластификаторы старого поколения на нафталиновой основе. На этой основе в стране выпускается огромное количество суперпластификаторов, которые модифицируются различными химическими добавками на больших и малых ООО. Реологическая эффективность этих СП существенно уступает гиперпластификаторам на поликарбоксилатной основе. Поликарбоксилатные гиперпластификаторы мало осваиваются в России и поставляются из-за рубежа по очень высоким ценам. Они могут быть чрезвычайно эффективны в высокопрочных и особо высокопрочных бетонах, и особенно для декоративно-отделочных материалов, малых архитектурных форм с широкой цветовой гаммой и т.п., изготавливаемых из литых и высокопластичных смесей.

Методы тестирования СП и ГП по реологической и водоредуцирующей эффективности чрезвычайно разнообразны. Мы ис-

Таблица. Рецептура, технологические и технические характеристики порошково-активированных бетонов нового поколения

Наименование	Ед. измерения	Показатели					
		Класс бетона В100			Класс В 40	Класс В35	Класс В 25
ПЦ500 ДО «Вольскцемент»	кг/м <sup>3</sup>	480	390	-	236	180	150
ПЦ 500 Д) «Мордовцемент»		-	-	319	-	-	-
Песок кварцевый молотый Суд=260-330 м <sup>2</sup> /кг	кг/м <sup>3</sup> % от Ц	260 54	290 74	235 73	217 92	170 93	158 105
Песок кварцевый фр. 0,16-0,63	кг/м <sup>3</sup> % от Ц	480 100	396 101	351 110	469 199	493 271	527 351
Песок гравийный фракционированный фр. 0-2,5 мм	— «—	300	425	-	-	-	-
фр. 0,63-5,0 мм	— «—	-	-	510	-	-	-
Песок гравийный рядовой	— «—	-	-	-	472	534	550
Щебень диабазный фр. 5-10 мм	— «—	840	810	-	-	-	-
Щебень габбро фр.	— «—	-	-	1028	-	-	-
Щебень известняковый	— «—	-	-	-	849	852	830
Микрокремнезем	— «—	-	26	22	31	35	37,6
Новокознецкий	— «—	-	-	-	-	-	-
Гиперпластификатор Melflux 2641	— «—	3,6	2,9	2,8	1,9	1,5	1,25
Отношение массы всех видов песка к цементу	-	1,95	2,9	3,4	4,6	6,6	8,2
Вода	— «—	154	179	120	-	161	155
В/Ц	-	0,32	0,46	0,38	0,62	0,902	1,03
В/Т	-	0,048	0,061	0,048	0,064	0,071	0,068
Осадка конуса	см	21-22	12-14	22-24	8-9	-	-
Жесткость	с	-	-	-	-	20	25
Плотность бетона	кг/м <sup>3</sup>	2530	2490	2534	2360	2340	2390
Водопоглощение	%	1,4	1,3	1,2	1,9	2,1	2,6
Прочность:							
- при сжатии, через 7 суток	МПа	112,0	103,0	111,0	38,0	33,0	22,1
через 28 суток		131,0	137,0	133,6	51,2	43,0	33,6
- на растяжение при изгибе, через 28 суток	МПа	13,1	12,8	14,1	9,4	8,9	6,5
Удельный расход цемента	кг/МПа	3,7	2,84	2,38	4,6	4,2	4,5
Усадка в течении 160-230 сут.	мм/м	0,30	0,28	0,27	0,31	0,32	0,36



**Рис. 3.** Памятник из высоко-прочного бетона М1700-2000 в честь 65-ти летия Победы. Сооружен в содружестве с ООО «Новые технологии строительства», г. Красноярск

пользуем простой метод тестирования эффективности СП и, в свою очередь, тестирования цементов (по «отклику» к действию СП) по реотехнологическому показателю растекаемости цементного теста из конуса Хагерманна (форма-конус от встряхивающего столика по ГОСТ 310.4-81). Расплыв цементной суспензии из конуса должен быть не менее 280-320 мм при В/Ц равном 0,16-0,18.

В таблице приводятся составы малоцементных порошково-активированных щебеночных бетонов, их прочностные свойства, удельный расход цемента на единицу прочности, водопоглощение, усадка.

Как следует из таблицы, все щебеночные бетоны, кроме первого и второго, являются малоцементными с расходами цемента от 150 до 319 кг/м<sup>3</sup>. Недостаток цемента восполняется всеми видами песка — молотого, тонкого и песка-заполнителя. Содержание молотого кварцевого песка возрастает от 54 до 105% от массы цемента. Содержание тонкого песка фракции 0,16-0,63 мм увеличивается от 100% (при расходе цемента 480 кг/м<sup>3</sup>) до 350% (при расходе цемента 150 кг/м<sup>3</sup>).

Удельный расход цемента на единицу прочности изменяется от 4,6 до 2,38 кг/МПа. По минимальному значению этого показателя наиболее оптимальный состав содержит цемента 319 кг/м<sup>3</sup> и минимальное количество микрокремнезема — 7% от массы цемента. Мы не обнаружили



**Рис. 4.** Обелиск из высокопрочного бетона М 1700-200. Сооружен в содружестве с ООО «Новые технологии строительства», г. Красноярск

ни в отечественной, ни в зарубежной научно-технической литературе такого низкого удельного расхода цемента. Компания Dickerhoff [12], выпускающая новые виды цементов Veridur, Variodur, Nanodur и др., активно занимается разработкой не только особовысокопрочных и сверхвысокопрочных бетонов и фибробетонов с повышенными расходами цемента, но и эффективных малоцементных бетонов. Бетоны производятся с использованием новых эффективных цементов.

## Литература

1. Урьев Н. Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов. М., Химия, 1988. 286 с.
2. Урьев Н. Б., Потанин А. А. Текучесть суспензий и порошков. М. Химия, 1992. 252 с.
3. Пластификаторы, суперпластификаторы, гиперпластификаторы и композиционные материалы с их использованием (в трудах кафедры «Технология бетонов, керамики и вяжущих» ПГУАС). Теория и практика. Пенза. 2008. 44 с.
4. Калашников В. И. Основы пластифицирования минеральных дисперсных систем для производства строительных материалов. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Воронеж. 1996. 95 с.
5. Калашников В. И. Через рациональную реологию в будущее бетонов // Строительные материалы XXI века. Технологии бетонов. № 5. 2007. С. 8-10 // № 6. 2007. С. 8-11 // № 2008. С. 22-26.
6. Schmidt M. Jahre Entwicklung bei Zement, Zusatzmittel und Beton. Ceitzum Baustoffe und Materialprüfung. Schriftenreihe Baustoffe. // Fest-schrift zum 60. Geburstag von Prof. Dr.-Ing. Peter Schiess. Heft 2. 2003, s. 189-198.
7. Kleingelhöfer P. Neue Betonverflüssiger auf Basis Polycarboxilat. // Proc. 13. Jbasil Weimar 1997, Bd. 1, s. 491-495.
8. Frank D., Friedemann K., Schmidt D. Optimierung der Mischung sowie Verifizierung der Eigenschaften Sauerresistente Hochleistungbetone. // Betonwerk+Fertigteil-Technik. 2003. № 3. S. 30-38.
9. Richard P., Cheurezy M. Composition of Reactive Powder Concrete. Skientific Division Bougies. // Cement and Concrete Research, Vol. 25. No. 7, 1995. — pp. 1501-1511.
10. Мировая премьера в Австрии — арочный разводной мост из высокопрочного фибробетона // Международное бетонное производство. № 3. 2011. С. 132-134.
11. Калашников В. И. Терминология науки о бетонах нового поколения // Строительные материалы. № 3. 2011. С. 103-106.
12. Дейзе Т., Хорнунг О., Мельман М. Переход с технологии Mikrodur к технологии Nanodur. Применение стандартных цементов в практике производства бетонов со сверхвысокими эксплуатационными свойствами // Бетонный завод. № 3. 2004. С. 4-11.

В арсенале компании большое количество эффективных бетонов с  $C_{R}^{уд}$  менее 4 кг/МПа. Наиболее эффективный состав бетона с малым расходом цемента Variodur 30 ЦЕМ II/B-S 52,5 R 270 кг/м<sup>3</sup> имел прочность 95 МПа. ( $C_{R}^{уд} = 2,84$  кг/МПа). Можно с уверенностью утверждать, что стратегия разработки малоцементных, малоусадочных бетонов нового поколения с низкими удельными расходами цемента на единицу прочности является чрезвычайно актуальной и перспективной и за рубежом, и в России.