

нентов бетона) может быть достигнуто путем соответствующего подбора объемной концентрации заполнителя.

Таким образом, важными достоинствами предложенной структурно-механической модели бетона являются не только общность методологии рассмотрения диаграмм деформирования для бетонов с плотным и пористым заполнителем (при различных соотношениях между модулями деформаций компонентов бетона), но и выявление предполагаемой формы разрушения бетона, а также установление оптимальности состава бетона по критерию прочности.

С помощью разработанной структурно-механической модели были выполнены расчеты по экспериментальным данным [14-16] для бетонов различных составов и прочности. Основные сведения о выборке опытных образцов приведены в таблице. Следует отметить, что наибольшей полнотой изложения исходных экспериментальных данных характеризуются исследования Budi Aulia T., Deutshmann K. [15], в которых в качестве матрицы использовался цементно-песчаный раствор (на кварцевом песке) одного состава, а в качестве заполнителей использовалось 7 различных видов заполнителей.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанная структурно-механическая модель бетона позволяет с приемлемой точностью прогнозировать параметры диаграммы деформирования бетона при сжатии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Карпенко Н.И. Общие модели механики бетона. — М.: Стройиздат, 1996. — 416 с.
2. Холмянский М.М. Бетон и железобетон: Деформативность и прочность. — М.: Стройиздат, 1997. — 576 с.
3. Тур В.В., Рак Н.А. Прочность и деформации бетона в расчетах железобетонных конструкций: Монография. — Брест, БГТУ, 2003. — 252 с.
4. PrEN 1992-1-1:2003. Design of concrete structures. General. Common rules for building and civil engineering structures. — Brussels, CEN, 2003.
5. СНБ 5.03.01-02 Бетонные и железобетонные конструкции. Мн: РУП «Стройтехнорм», 2003. — 140 с.
6. Разработка расчетной модели учета структуры высокопрочного бетона при определении его предельной сжимаемости и несущей способности конструкций в условиях нагружения с градиентом деформаций: Отчет о НИР (заключит.) / Белорусская государственная политехническая академия; Рук. Н.А. Рак. — №ГР2000522. — Минск, 2000. — 55 с.
7. Расчет конструкций из высокопрочного бетона учетом их контактного взаимодействия в каркасных зданиях: Отчет о НИР (заключит.) / Белорусская государственная политехническая академия; Рук. Н.А. Рак.— № ГР 2001770.— Минск, 2001.— 118 с.
8. Рак Н.А. К построению методики расчета железобетонных конструкций с учетом неоднородности структуры бетона // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. — 2001. — № 1(7) — С. 90-99.
9. Рак Н.А. Стержневая расчетная модель бетона как структурно неоднородного материала // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. — 2003. — № 1(19) — С. 145-151.
10. Рак Н.А. Структурно-механическая модель бетона. 1. Прогнозирование модуля деформаций бетона // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. — 2004. — № 1(25).
11. Shah S. and Chandra S. Critical Stress, Volume Change, and Microcracking of Concrete // ACI Journal. — 1968. — Vol. 65, № 9. — P. 770-781.
12. Harsh S., Shen Z. and Darwin D. Strain-Rate Sensitive Behavior of Cement Paste and Mortar in Compression // ACI Materials Journal. — 1990. — V. 87, № 5. — P. 508-516.
13. Рыскин М.Н. Структурно-механические свойства и технология высокопрочного бетона: Дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / БНТУ. — Минск, 2002. — 296 с.
14. Budi Aulia T., Deutshmann K. Effect of Mechanical Properties of Aggregate on the Ductility of High- Performance Concrete // Leipzig Annual Civil Engineering Report. — 1999. — № 4. — P. 133-148.
15. De Larrard F. and Belloc A. The Influence of Aggregate on the Compressive Strength of Normal and High-Strength Concrete // ACI Materials Journal. — 1997. — V. 94, № 5. — P. 417-426.
16. Haidar K., Pijaudier-Cabot G. Influence of Porosity on Fracture Characteristics in Mortar Structures // Proceedings of 15th ASCE Engineering Mechanics Conference (EM-2002). — 2002. — 8 p.

УДК 666.97.12:620.18.001.5

Рыскин М.Н., Рак А.Н.

К ВОПРОСУ О КОМПОЗИЦИЯХ, СТРУКТУРЕ И РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ БЕТОНОВ

Применительно к технологии бетона термин самоуплотнение подразумевает способность бетонной смеси без расслоения заполнять предоставленное ей пространство, т.е. форму с арматурным каркасом, и уплотняться без какого-либо механического воздействия (например, вибрационного), только под влиянием собственного веса или, что более точно, от действия исключительно гравитационных сил.

Удобоукладываемость самоуплотняющихся бетонов (СУБ) может характеризоваться следующими свойствами [1]: 1) заполняющая способность (текучесть); 2) проникающая способность (отсутствие блокировки между арматурой или узкими опалубочными полостями); 3) устойчивость к расслоению (стабильность). Только в случае соответствия всех трех свойств заданным значениям бетонная смесь может быть определена как СУБ.

Для оценки удобоукладываемости СУБ наиболее предпочтительными следует считать реологические методы [2,3]. Измеряемые по ним реологические константы наиболее точно позволяют судить о реальных процессах, происходящих в бетонных смесях. Консистенцию структурированной, пластично-

вязкой среды, каковой является бетонная смесь, наиболее полно описывают следующие характеристики: предельное напряжение сдвига, вязкость, угол внутреннего трения.

С одной стороны бетонная смесь СУБ должна обладать высокой деформативностью, которая обеспечивает заполнение опалубки смесью и ее уплотнение под действием только собственного веса. Т.е. с точки зрения реологии смесь должна иметь низкое значение τ_0 — предельного напряжения сдвига. С другой стороны должно быть достигнуто высокое сопротивление расслоению между крупным заполнителем и растворной частью при транспортировании бетонной смеси и ее течения через участки опалубки с высокой концентрацией арматурных стержней. Это условие обеспечивается, если смесь обладает высокой вязкостью (ν) растворной составляющей (цементного теста). На рис. 1 показано, что область бетонных смесей, обладающих свойствами самоуплотнения, соответствует определенным диапазонам изменения реологических констант бетонной смеси ν и τ_0 [4].

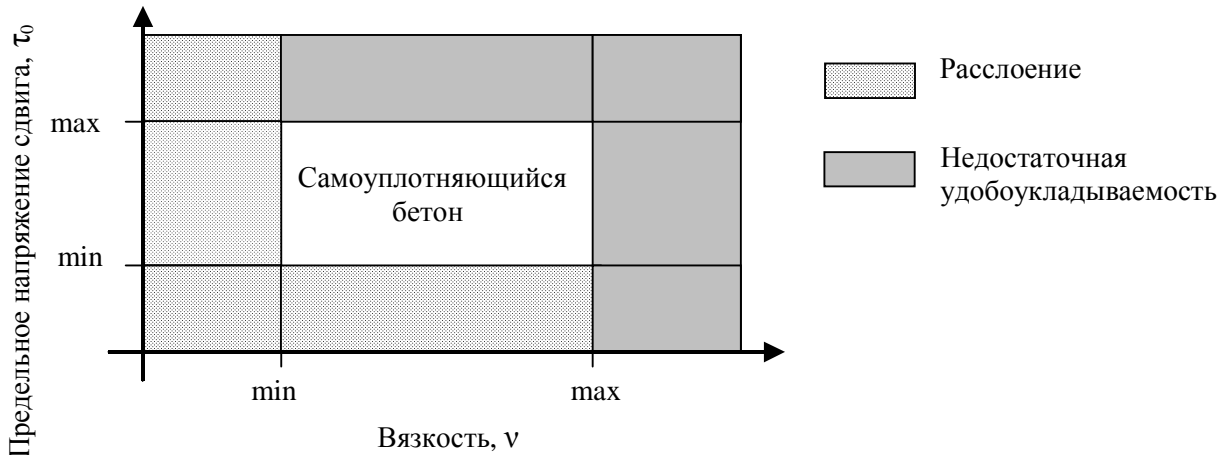


Рис. 1. Диапазон изменения реологических констант СУБ.

Таблица 1. Соотношения компонентов в самоуплотняющейся бетонной смеси

Автор	Соотношения компонентов бетонной смеси			
	$V_{кр.з}/V_з$	$V_n/V_з$	$V_{вяж.}/(V_{вяж.} + V_з)$	$(V_{вяж.} + V_n)/V_з$
Окамура [7]	0.64	0.36	0.22	0.64
Юргенталь [8]	0.54	0.46	0.24	0.78
Амброуз и др. [9]	0.44	0.56	0.18	0.78

Примечания. $V_з$, $V_{кр.з}$, V_n , $V_{вяж.}$ – абсолютные объемы в бетоне, соответственно, заполнителя, крупного заполнителя, песка, вяжущего.

Очевидно, что самоуплотняемость бетонной смеси, или другими словами соответствующие значения ее реологических параметров, зависит от состава смеси и характеристик используемых материалов. Причем эффект самоуплотнения в равной степени может быть заблокирован как нерациональным соотношением компонентов в бетоне, так и качеством его составляющих.

Современная технология получения СУБ включает в себя следующее:

1. тщательный подбор granulometрии заполнителей с ограниченным содержанием крупного заполнителя;
2. высокая объемная концентрация цементного теста в бетоне, имеющего достаточно низкое водовязущее отношение;
3. обязательное применение супер- или гиперпластификаторов, причем, как правило, в повышенных в сравнении с обычными бетонами дозировках;
4. использование тонкодисперсных наполнителей.

В принципе, к настоящему времени, известны основные количественные соотношения исходных материалов (цемента, дисперсных наполнителей, мелкого и крупного заполнителей, воды, химических добавок) характерные для самоуплотняющихся бетонных смесей. Они установлены путем обобщения экспериментальных исследований и служат базой для проектирования композиций таких бетонов в ряде методик [1,5,6].

Например, согласно рекомендациям EFNARC [1] в составах СУБ должны быть выдержаны следующие пропорции: а) объемное водовязущее отношение ($V_{воды}/V_{вяж.}$) от 0,8 до 1,1; б) объемное содержание вяжущего в диапазоне 160 ... 240 л/м³; в) объемное содержание теста в бетоне не менее 40 %; г) содержание крупного заполнителя – 28...35% от объема смеси по абсолютной величине; д) объемное содержание песка – не менее 40 % в растворе и 50 % в смеси заполнителей; ж) расход воды не выше 200 л/м³ и др.

Однако соотношения компонентов бетона в зависимости от свойств используемых материалов могут колебаться в широких пределах, а иногда и выходить за указанные выше границы. Подтверждением этому служат опытные данные, све-

денные в табл. 1 [7-9]. Диапазоны изменения некоторых пропорций (например, $V_{кр.з} / V_з$), обеспечивавших получение СУБ, значительны и, следовательно, говорить о каких-то фиксированных соотношениях компонентов такого бетона без учета их характеристик неправильно.

При разработке состава СУБ большое значение имеет правильный выбор вяжущего, расход которого является довольно высоким и составляет обычно 450-600 кг (160 ... 240 л) на 1м³. По-видимому, для самоуплотняющихся бетонов должны быть сохранены рекомендации (данные для бетонов традиционной удобоукладываемости) не превышать общее количество цемента и минеральной добавки выше 650 кг/м³. Это может привести к снижению прочности и трещиностойкости бетона, отрицательно сказаться на его долговечности, вызвать повышенные деформации усадки и ползучести [10].

Обычное содержание цемента в составе вяжущего находится в диапазоне 350-450 кг/м³. Наличие более чем 500 кг в м³ бетона может опасно увеличить усадку и тепловыделения (для массивных конструкций). В литературе, посвященной СУБ, нет четких указаний на минералогический и вещественный состав цемента или его дисперсность, т.е. достаточно соответствия цемента действующим стандартам. Выбор типа цемента определяется требованиями, предъявляемыми к механическим и физико-техническим характеристикам бетона. Тем не менее, влияние характеристик цемента очень значительно. В частности, по данным Smeplass и Mortsell при $V/C=const$ в зависимости от типа используемого цемента разница в количестве цементной матрицы при котором достигался одинаковый расплыв конуса (650 мм) составляла 50...80 л цементного теста на м³ бетона [11]. В рекомендациях EFNARC по самоуплотняющемуся бетону [1] обращается внимание на то, что содержание C_3A в количестве более 10 % может вызывать проблемы с удобоукладываемостью бетонной смеси из-за повышенной водопотребности таких цементов, однако жесткие ограничения на минералогию не накладываются. Вероятно, на практике целесообразно учитывать количество C_3A при назначении дозировки пластификатора [12].

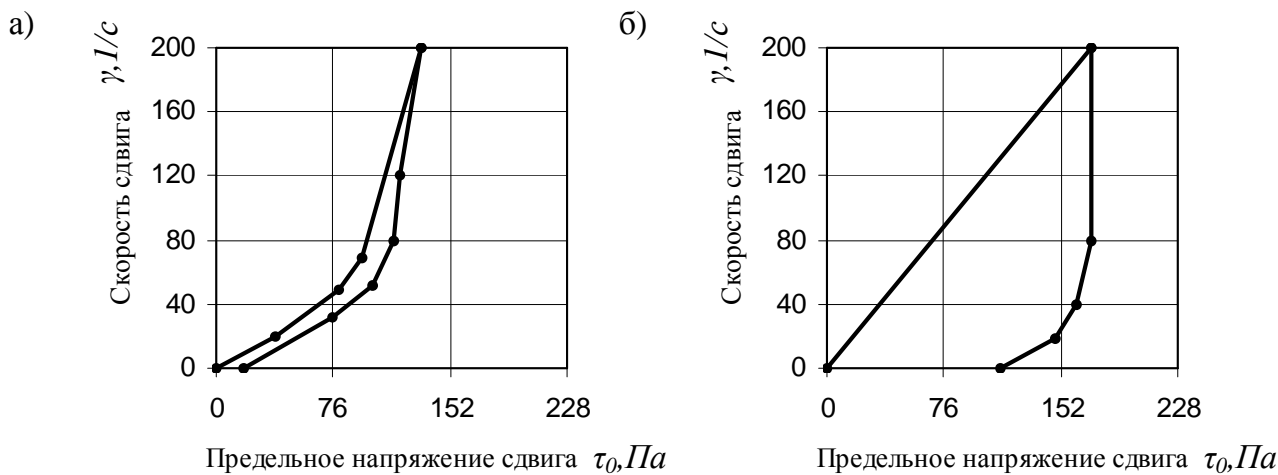


Рис. 2. Реология цементного теста модифицированного а) СП; б) МК+СП. [22].

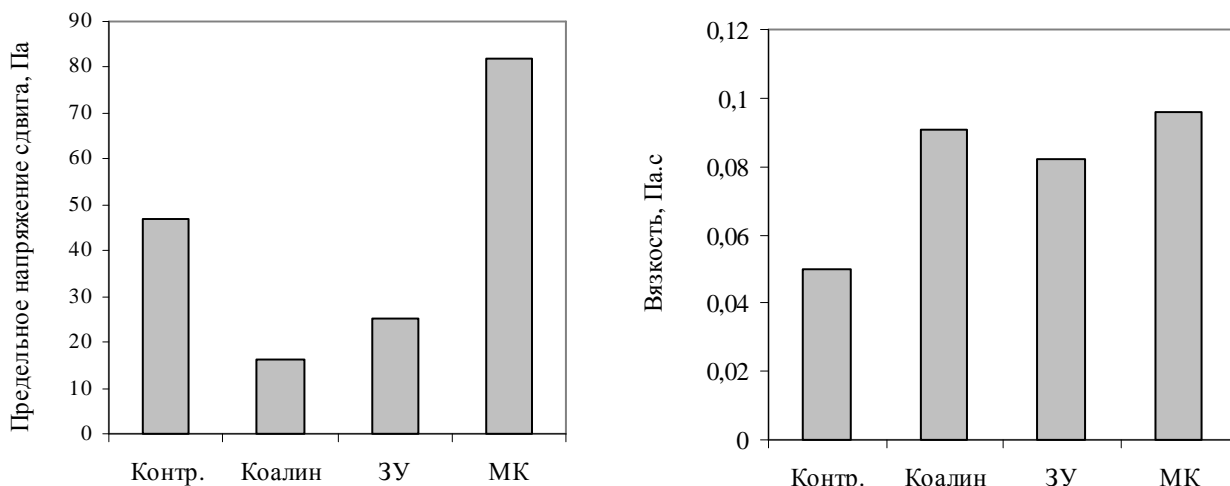


Рис. 3. Влияние АД на реологические свойства цементного теста

Обязательной составляющей композиций СУБ является тонкодисперсный наполнитель, основное предназначение которого – увеличение объема цементного теста в бетонной смеси до значений, обеспечивающих самоуплотнение бетонной смеси. Наряду с этим, применение наполнителя позволяет улучшать физико-технические свойства бетона, уменьшать тепловыделение вяжущего, экономить цемент.

В качестве наполнителей могут быть использованы как инертные добавки: молотые доломит, известняк, песок и др., так и активные минеральные добавки искусственного (зола-уноса, шлаки) или природного происхождения (трепелы, опоки и т.п.) [1,13].

В настоящее время широкое использование в технологии бетона получает микрокремнезем (МК), представляющий собой ультрадисперсные (средний размер – 0,1...0,3 мкм при $S_{уд}=15000-45000 \text{ см}^2/\text{г}$) отходы металлургических производств, связанных с выплавкой сплавов содержащих кремний [14]. Целесообразность применения МК в составах СУБ связана в первую очередь с механизмом формирования структуры дисперсной системы "цемент – микрокремнезем – вода", который выражается в заполнении МК объема между грубодисперсными частицами цемента и образовании коагуляционных контактов, что ведет к повышенной вязкости, пластической прочности и тиксотропности цементного теста [15]. Это оказывает существенное влияние на реологические показатели теста (бетонной смеси), и, соответственно, предоставляет возможности по их

корректировке в СУБ. Согласно исследованиям М. Коллепарди комбинированная добавка МК + суперпластификатор (СП) модифицирует вязкопластические свойства цементной пасты (рис. 2), которая демонстрирует высокую когезию в покое состоянии и, одновременно, высокую текучесть при движении, проявляя при разгрузке свойства ньютоновской жидкости. Следовательно, введение микрокремнезема может компенсировать отсутствие других наполнителей, при небольших расходах цемента в СУБ (~350 кг/м³) [16].

Учитывая, что величина увеличения прочности бетона при введении микрокремнезема соизмерима с результатом добавления суперпластификатора при снижении В/Ц и может достигать 25 % и более (высокая эффективность МК в высокопрочных бетонах общеизвестна [17]), можно определить область применения МК в СУБ – получение бетонов повышенной прочности и водонепроницаемости.

Значительный интерес у исследователей в последнее время вызывает ультрадисперсный аморфный коллоидный кремнезем – Ultra Fine Amorphous Colloidal Silica (UFACS) или нанокремнезем с размером частиц 5...50 нм, т.е. намного меньшим по сравнению с микрокремнеземом. В дозировке примерно 5% нанокремнезем уменьшает выделение цементного молока и повышает устойчивость к расслоению. Из-за очень большой удельной поверхности (80-1000 м²/г) и сферической формы частиц UFACS увеличивает стабильность СУБ, особенно при низком содержании наполнителя [18].

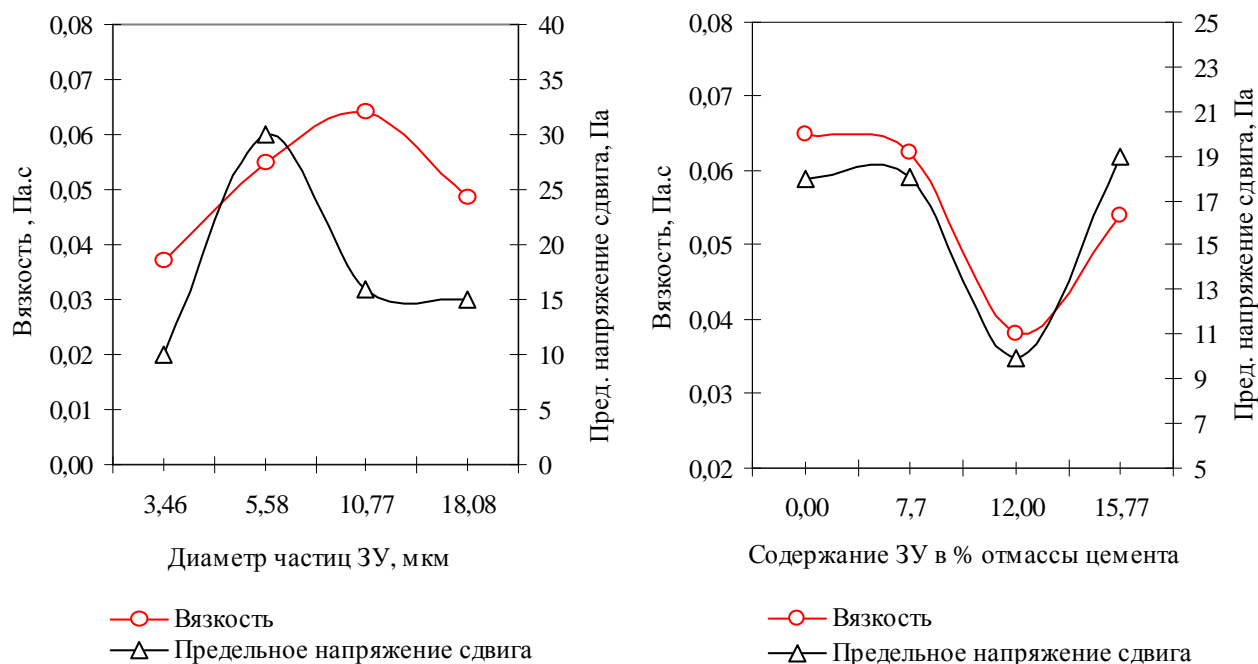


Рис. 4. Реологические константы цементно-золяного теста [30]

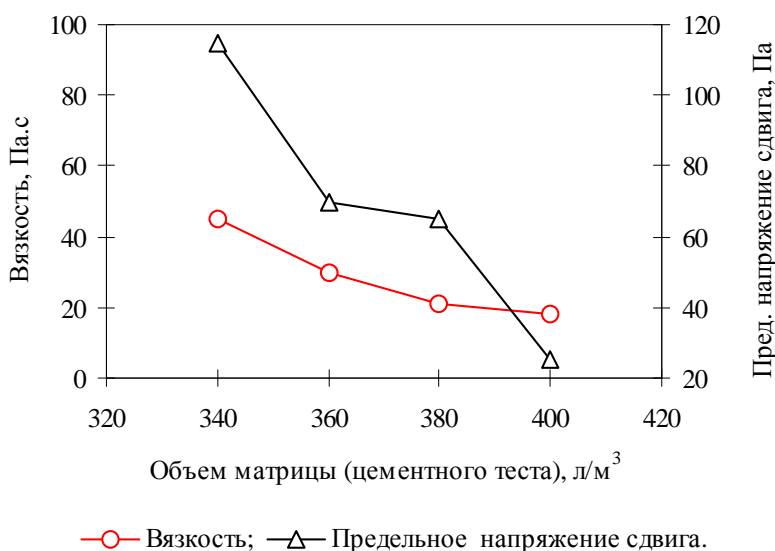


Рис. 5. Влияние объема матрицы на реологические параметры бетонной смеси в СУБ.

В обычных бетонах классов В25 и выше содержание тонкодисперсных минеральных добавок, как правило, ограничено 15...20 % от массы вяжущего, так как дальнейшее увеличение дозировки приводит к значительному снижению прочности бетона [19] и делает применение добавки экономически нецелесообразным. Отличительной особенностью композиций СУБ является повышенная дозировка дисперсного наполнителя, которая может достигать 50 % от общего объема вяжущего. Например, в опытах J.K. Su и др. [20] объемная концентрация цемента в составе вяжущего составляла 49 %, а оставшийся объем занимали минеральные добавки: шлак (33 %) и зола-уноса (18 %).

Очевидно, что на реологию цементного теста с тонкодисперсными наполнителями, а значит и на оптимум количества конкретной добавки в составе смешанного вяжущего, влияет ее тип и дисперсность. На рис.3 показано влияние на ν и τ_0 нескольких видов минеральных добавок: ультрадисперсной

золы-уноса (ЗУ, средний диаметр частицы $d = 3.1$ мкм, 12% от массы цемента), каолина ($d = 7.4$ мкм, 8%), микрокремнезема (МК, $d = 0.1$ мкм, 8%) [21]. Как видно, имеется сложная зависимость между реологией цементного теста и характеристиками наполнителя: удельной поверхностью, химсоставом, формой, текстурой, пористостью частиц. Не всегда большая дисперсность однозначно означает увеличение реологических констант цементного теста.

Но более четко это видно при исследовании одной добавки с изменяемой $S_{уд}$, когда отделено влияние типа АМД. На рис. 4 представлены эксперименты по выявлению взаимосвязи ν и τ_0 теста с дисперсностью золы-уноса (средним диаметром частиц наполнителя) и дозировкой той же ЗУ при фиксированной дисперсности ($d_{ЗУ} = 3.1$ мкм) [21]. Отчетливо видны значения размера частиц и содержания добавки (соответ-

ственно, 3.1 мкм и 12 %) при которых наблюдаются минимальные значения ν и τ_0 цементно-зольного теста. Таким образом, можно варьировать реологией бетонной смеси путем изменения типа наполнителя, его дисперсностью и содержанием в вяжущем.

Как правило, предельное содержание АМД в составе вяжущего ограничивается двумя основными факторами: резким падением прочности материала при определенных соотношениях наполнитель/цемент, а также обеспечением долговечности конструкций: морозостойкости и коррозионной стойкости бетона, пассивного состояния арматуры и т.д. Предельный расход конкретной добавки устанавливается экспериментально. В этой связи, можно привести характерные эксперименты J. Deitz и J. Ma [22] по определению оптимальных дозировок в СУБ зол-уноса, образующихся при сжигании бурых углей. Необработанная водой зола, несмотря на ее эффективность с точки зрения прочностных свойств бетонов могла вводиться в количестве не более 30 % от массы вяжущего. При превышении этой границы вяжущее переставало удовлетворять требованиям норм на степень расширения стандартного раствора. Однако эта же зола-унос, прошедшая обработку водой, т.е. представляющая собой химически менее активный наполнитель, была эффективно применена в самоуплотняющихся бетонах в дозировках до 50 %.

Отдельно необходимо коснуться количества в СУБ аморфного микрокремнезема. Оптимальные дозировки МК в бетоне колеблются в зависимости от его водопотребности и пуццолановой активности, расхода вяжущего и В/Ц композиции от 8 до 25 % от массы цемента. Принимая во внимание влияние МК на реологию бетонной смеси, его рациональное содержание в СУБ, по-видимому, не должно превышать 10...15 %.

Цемент, наполнитель, вода затворения и вовлеченный воздух образуют высокогетерогенную полидисперсную систему – цементное тесто (микроструктура бетонной смеси), чьи вязкопластические свойства определяются характеристиками и соотношением компонентов, а также наличием химических модификаторов (см. ниже).

Те же факторы действительны и на макро уровне структуры – обеспечение самоуплотняющихся свойств бетонной смеси зависит, наряду с реологическими параметрами цементной матрицы, и от ее содержания в системе. Вязкость, коэффициент трения и предельного напряжения сдвига бетонной смеси должны уменьшаться (до некоторых предельных/минимальных значений) с ростом объемной концентрации в ней теста. На рис.5 показаны характерные зависимости τ_0 и ν СУБ от относительного объемного содержания в ней цементного теста [11].

Еще один важнейший фактор – используемый наполнитель, хотя к нему в СУБ не предъявляется каких-то особых требований в сравнении с традиционными бетонами.

Все пески, удовлетворяющие действующим стандартам, подходят и для СУБ, но при подборе состава необходимо принимать во внимание ряд параметров мелкого заполнителя. Среди характеристик песка, влияющих на удобоукладываемость (реологические свойства) бетона в первую очередь следует выделить гранулометрический состав песка (модуль крупности), макрорельеф (исходная форма зерен), микрорельеф (шероховатость или текстура поверхности) – интегрально они могут быть оценены удельной поверхностью, а также пустотность и водопоглощение порами.

Взаимосвязь всех эти параметров с предельным напряжением сдвига (τ_0) и вязкостью (ν) самоуплотняющихся растворов смесей были предметом исследований норвежских авторов [23]. В экспериментальной программе использова-

лись десять различных песков: пять естественных и пять искусственных, причем каждая пара имела идентичную гранулометрию при различной форме частиц, фактуре поверхности, пустотности. Модуль крупности песков колебался от 1.5 до 3.0, В/Ц раствора изменялось в диапазоне 0,32... 0,42 (восемь значений), соотношение тесто/песок не изменялось. В основном, свойства растворной смеси определялись именно этими параметрами: τ_0 и ν росли с уменьшением В/Ц и модуля крупности песка. Полностью отделить влияние каждого из остальных факторов на реологию самоуплотняющихся растворов не удалось. Тем не менее, установлено, что в большей мере вязкость и напряжение сдвига зависят (при одинаковой крупности и В/Ц) от формы зерен и пустотности песка, и в меньшей мере от шероховатости.

Еще один важный вопрос – наличие в песке пылевидной фракции, которая должна быть отнесена к объему вяжущего в качестве минеральной добавки. Максимальный размер этой фракции является предметом обсуждения и по разным рекомендациям равен от 0,075 до 0,125 мм [1,5,23,24]. Попробуем определить d_n – размер фракции песка (щебня), которую можно отнести к вяжущему с точки зрения структурно-механического поведения композиционного материала «заполнитель – цементная матрица (тесто/камень)». Из теории строительных композитов следует [25], что включение должно быть отнесено к наполнителю, если оно не оказывает влияние на напряженно-деформируемое состояние его макроструктуры. Такое возможно, когда размер включения меньше чем размер единичного элемента макроструктуры бетона в 5 и более раз [26,27].

Единичный элемент макроструктуры бетонной смеси может быть модельно представлен в виде зерна заполнителя окруженного слоем матрицы. Предполагаем, что зерно имеет форму шара с радиусом, соответствующим равенству удельной поверхности реальных заполнителей. Средняя толщина слоя цементного теста единичного элемента находится делением объема теста в бетоне на $S_{уд.з}$. Приведенный радиус зерен заполнителя (мелкий+крупный), рассчитанный по формуле $r_3=3/(\rho_3 S_{уд.з})$ со взятым усреднено $\rho_3=2650$ кг/м³ и $S_{уд.з}=3,75$ м²/кг, равен: $r_3 \approx 0,3$ мм. Толщина слоя (обмазки) матрицы для принятой модели: $\delta_{матр} = V_{матр} / S_{уд.з} G_3$, что при $V_{матр} = 0,370$ м³ и $G_3 = 1700$ кг/м³ дает значение $\delta_{матр} \approx 0,06$ мм. Таким образом, линейный размер единичного элемента равен $l_{ед} = 2(r_3 + \delta_{матр}) = 2(0,3+0,06) \approx 0,72$ мм. Следовательно, искомая величина равна: $d_n = l_{ед} / 5 = 0,72 / 5 \approx 0,145$ мм.

В наших условиях целесообразнее установить границу, отделяющую наполнитель от заполнителя равной 0,16 мм. Отношение $l_{ед} / d_{0,16} = 0,72 / 0,16 = 4,5 \approx 5$ и, с некоторым допущением, включение фракций заполнителя меньших 0,16 мм в состав вяжущего (другими словами отнесении их к микроструктуре материала) можно считать обоснованным.

Как и в случае с песком, в качестве крупного заполнителя в СУБ могут быть применены все типы заполнителей: дробленые заполнители (щебень) положительно влияют на увеличение прочности бетона, в то время как округленные заполнители (гравий) увеличивают текучесть из-за низкой вязкости. Также, считается, что прерывистая гранулометрия более предпочтительна чем непрерывная, так как при этом самоуплотняющийся бетон имеет большую вязкость [1].

Обычно максимальный размер крупного заполнителя (D_{max}) в СУБ 16-20 мм; однако известны случаи применения щебня фракций до 40 мм [28]. Если все остальные показатели фиксированы то уменьшение/увеличение D_{max} , приводит к

изменению водопотребности заполнителя и пустотности смеси песка и щебня, что и является причиной колебаний удобоукладываемости бетонной смеси. К примеру, по результатам исследований [29] распылв конуса в зависимости от наибольшего размера щебня (единственный переменный фактор) был равен: $PK=63,0$ см при $D_{max}=8$ мм; $PK=67,5$ см при $D_{max}=12$ мм; $PK=68,5$ см (максимум) при $D_{max}=16$ мм; $PK=68,0$ при $D_{max}=25$ мм; $PK=67,5$ при $D_{max}=32$ мм.

По-видимому, основным фактором, определяющим выбор предельного размера щебня/гравия, является густота армирования конструкции, или, что более точно, минимальный просвет между арматурными стержнями (l_{np}). Наименьшие значения отношений между просветом арматуры и D_{max} , обеспечивающие отсутствие блокировки в СУБ, были установлены специальными экспериментами [29] и в среднем равны $l_{np}/D_{max} \approx 2$. При анализе таких данных необходимо принимать во внимание, что наряду с величиной l_{np}/D_{max} на блокировку заполнителя оказывает влияние, объемные концентрации в бетоне крупного заполнителя и цементного камня. Также при назначении крупности заполнителя следует учитывать минимальную ширину полостей опалубочного пространства.

Важнейшее значение в СУБ имеет соотношение между мелким и крупным заполнителем. В соответствующей зарубежной литературе, как правило, рассматривают мезо- и макро структуру бетона, т.е. фиксируют/определяют объем крупного заполнителя в бетоне и объем песка в растворной части композита. С одной стороны при таком подходе не представляется возможным учитывать ряд структурных показателей, например, пустотность смеси заполнителей, толщину прослойки цементного теста и т.п., напрямую определяющих реологию смеси. С другой стороны это упрощает подбор состава СУБ, в особенности, если он носит преимущественно экспериментальный характер.

Когда объем крупного заполнителя в бетоне превышает определенную границу, возможность контакта между частицами крупного заполнителя возрастает. Результатом этого является не только изменение реологических свойств бетонной смеси – повышение вязкости и предельного напряжения сдвига, но и существенный рост риска блокировки при прохождении смеси между арматурными стержнями [30].

Еще одним условием, обеспечивающим получение самоуплотняющегося бетона, является применение химических добавок модифицирующих пластические и вязкие свойства бетонной смеси, и в первую очередь, водоредуцирующих добавок. Создание СУБ стало в принципе возможным благодаря появлению высокоэффективных разжижителей бетонных смесей – суперпластификаторов (СП), обеспечивающих уменьшение водопотребности бетонной смеси на 20...30 %. Основные типы СП в зависимости от химического состава: сульфированные меламинформальдегидные соединения (*MSF*); сульфированные нафталинформальдегидные соединения (*NSF*) и модифицированные лигносульфонаты (*MLS*). Однако многолетнее промышленное применение выявило ряд недостатков свойственных традиционным суперпластификаторам групп *MSF*, *NSF* и *MLS*.

Во-первых, для некоторых технологий (в т.ч. высокопрочные и самоуплотняющиеся бетоны) СП обладают недостаточным водоредуцирующим эффектом. Во-вторых, в условиях монолитного строительства одним из основных качеств бетонной смеси является сохраняемость ее свойств во времени. Несмотря на то, что традиционные суперпластификаторы как ПАВ, несколько замедляют процессы гидратации, и соответственно потерю удобоукладываемости, обеспечить ее показатели близкие к первоначальным на протяжении более 1,0

часа они не могут. Особенно данная проблема актуальна в летних условиях производства работ. Для СУБ жизнеспособность смеси предельно важна, т.к. потеря подвижности означает, по сути, потерю самоуплотняющих свойств. Их восстановление на стройплощадке представляет собой непростую задачу, а при значительной потере подвижности может быть невозможным.

Стремительное распространение современных технологий в бетоне привело к необходимости разработки разжижителей следующего поколения с улучшенными технологическими эффектами. Добавки, химическую основу которых составляют акриловые полимеры (*AP*), получили название гиперпластификаторы (ГП), и позволяют добиться большего в сравнении с традиционными СП водоредуцирующего эффекта (до 40 %), а также успешно решают задачу сохранения подвижности бетонных смесей во времени и при повышенной температуре окружающей среды. Такие результаты обуславливаются механизмом действия ГП, который основывается на стерическом эффекте, связанном со строением молекулярной цепи, имеющей поперечные связи и двух- или трехмерную форму, в то время как суперпластификаторы характеризуются линейной формой полимерной цепи, а в механизме действия преобладает электростатическое отталкивание. Первоначально в Японии, а затем и в др. странах были налажены промышленное производство и коммерческое использование ГП. В настоящее время гиперпластификаторы – один из факторов способствующих все более широкому распространению СУБ в мировой строительной практике.

Современная технология самоуплотняющихся бетонов предполагает широкое использование комплексных химических добавок. Чаще всего СП или ГП совмещаются в СУБ с модификаторами вязкости или замедлителями, но при необходимости возможно введение ускорителей твердения, воздухововлекающих добавок, пеногасителей и т.д.

Целесообразность введения замедлителей определяется температурно-влажностными условиями окружающей среды, видом применяемого пластификатора, временем транспортирования, требованиями к ранней прочности бетона и др. Для данных добавок основным технологическим эффектом является удлинение сроков схватывания цементного теста (как начала, так и конца), приводящее к увеличению времени, в течение которого сохраняется требуемая удобообрабатываемость бетонной смеси [31]. В качестве замедлителей используется большой ряд органических и неорганических соединений, отличных как по химической основе, так и по механизму действия [32,33].

Добавки модифицирующие вязкость (ДМВ), как и суперпластификаторы, служат для обеспечения требуемых реологических свойств бетонной смеси. Введение в композицию СУБ модификаторов вязкости предназначено для предотвращения расслоения бетонной смеси и улучшения ее гомогенности. Эти добавки в дозировке 0,1 – 0,2 % от веса вяжущего позволяют получать СУБ с пониженным объемом цемента и тонкодисперсных наполнителей [34]. Механизм модификаторов вязкости (полиэтилен-гликоль и биополимеры) может быть кратко описан следующим образом. После адсорбции на поверхности частиц цемента полимерных молекул ДМВ они производят долговременный связующий эффект по всем объему цементного теста, значительно повышая вязкость водной фазы. Это объясняет сильное увеличение предельного напряжения сдвига (τ_0) цементного теста и как следствие высокую когезионность бетонной смеси, находящейся в покое или под действием умеренных касательных напряжений. Однако, когда касательное напряжение (τ) намного выше, чем предельное τ_0 , водородные связи между различными полимер-

ными цепями добавки нарушаются, и биополимеры выравниваются в направлении движения не оказывая неблагоприятного воздействия на текучесть бетонной смеси, которая может даже немного повышаться по сравнению с контрольными составами (только с суперпластификатором) для некоторых сочетаний СП и ДМВ. Как правило, введение модификаторов вязкости приводит к небольшому (5...7%) снижению прочности бетона в возрасте 28 суток [29].

Проведенный выше анализ позволил определить направления дальнейших исследований при разработке рациональных композиций СУБ на основе отечественных материалов. Необходимо определить структурные критерии бетонной смеси, обеспечивающие эффект самоуплотнения; разработать комплексы химических модификаторов (на основе СП или ГП), обеспечивающие требуемые технологические свойства бетонной смеси и физико-технические свойства бетона; получить СУБ на цементах, заполнителях и дисперсных наполнителях производимых предприятиями Беларуси и др. Не менее важной задачей является получение закономерностей связывающих реологические свойства бетонных смесей с их структурой, и разработки на их основе методики по проектированию оптимальных составов самоуплотняющихся бетонов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, EFNARC, 2002.
2. Ferraris C. F., Brower L. E. Comparison of concrete rheometers: International tests at LCPC (Nantes, France) in October, 2000. NISTIR 6819., 2001. 157 с.
3. Блещик Н.П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и прессвакуумбетона. - Минск, 1977. - С. 230.
4. Saak A.W., Jennings H.M., Shah S.P. New Methodology for Designing SCC. ACI Materials Journal, V. 98, No. 6, November – December 2001, pp. 429 – 439.
5. Heirman G., De Geyter N. De invloed van vulstoffen op de eigenschappen van zelfverdichtend beton in vloeibare en verharde toestand. Katholieke universiteit leuven., 2002. – 137 р. Японский стандарт
6. Leemann A., Hoffmann C., Olbrecht H. Self compacting concrete (SCC) / Selbstverdichtender Beton – Zusammensetzung und Eigenschaften Holcim Betontagung 2002
7. Okamura, H. "Self-Compacting High-Performance Concrete", Concrete International, V. 19, No. 7, July 1997, pp. 50 – 54.
8. Yurugi M.; Sakata N.; Iwai M.; Sakaj G. "Mix Proportion for Highly Workable Concrete", Proceedings of the Intern. Conference on Concrete 2000, Dundee, UK, 1993.
9. Ambroise J.; Rols S.; Pera J. "Self-Leveling Concrete-Design and Properties", Concrete Science and Engineering, V. 1, 1999, pp. 140 – 147.
10. Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон. М., Стройиздат, 1971. –209с.
11. Smeplass S. and Mørtzell E: The particle matrix model applied on Self-Compacting Concrete (SCC). The Second International Symposium on Self-Compacting Concrete, 23-25 October, 2001, Tokyo, Japan.
12. Бабаев Ш.Т., Комар А.А. Энергосберегающая технология железобетонных конструкций из высокопрочного бетона с химическими добавками. М.: Стройиздат, 1987. - 240 с.
13. Pedersen B., Mørtzell E. Characterization of Fillers for SCC.// Proceedings from The Second International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, 2001.
14. Ключев А.А. и др. Техногенный микрокремнезем – эффективная добавка в цемент и композиции на его основе. Обзорная информация. Газовая промышленность. Сер. Бурение газовых и газоконденсатных скважин. М.: ВНИИЭгазпром, 1991. - 25с
15. Каприелов С.С. Общие закономерности формирования структуры цементного камня и бетона с добавкой ультрадисперсных материалов. - Бетон и железобетон, 1998.- N 4. - С.19-24.
16. Collepardi M. «Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Europe: Future Directions», International Workshop on the Use of Fly Ash, Slag, Silica Fume, and other Siliceous Materials in Concrete, Sydney, Australia, Concrete Institute of Australia & CANMET, 1988.
17. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. М., 1998 г., 748 с
18. Skarp U., Sarkar S.L. «Enhanced Properties of Concrete Containing Colloidal Silica», Concrete Producer, pp 1-4, December 2000.
19. Островская С.С. Структурно-механические свойства цементно-золевых и цементно-золо-песчаных растворов инъекционного формования: Дис. ...канд. тех. наук: 05.23.05 – Ростов-на-Дону, 1985. – 199 с.
20. Su J.K., Cho S.W., Yang C.C., Huang R. «Effect of Sand Ratio on the Elastic Modulus of Self-Compacting Concrete»./ Journal of Marine Science and Technology, 2002. V. 10, No. 1, pp. 8-13.
21. Ferraris C.F., Obla K.H., Hill R. «The Influence of Mineral Admixtures on the Rheology of Cement Paste and Concrete»./ Cement and Concrete Research, 2001. V. 31, No. 2, pp. 245-255.
22. Dietz J., Ma J. «Preliminary Examinations for the Production of Self-Compacting Concrete Using Lignite Fly Ash»./ LA-GER, 2000. No. 5, pp. 125-139.
23. Bager D., M. Geiker, R. Jensen. Rheology of self-compacting mortars influence of particle grading/ The Second International Symposium on Self-Compacting Concrete, 23-25 October, 2001, Tokyo, Japan.
24. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. М, Стройиздат, 1981, 461с.
25. Бетон как композиционный материал (обзор). Соломатов В.И., Выровой В.Н., Аббасханов И.А. –Ташкент: УзНИИНТИ.– 1984.– 31с.
26. Холмянский М.М. Бетон и железобетон. Деформативность и прочность. - М.: Стройиздат, 1997. - 576 с.
27. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.
28. Tanaka K. Development of low-heat SCC for anchorage 4A of Akashi-Kaikyo Bridge (Written в Japanese), Self-Compacting High performance Concrete, Social System Institute, pp.82-110, March в 1999.
29. Final report of task 2. Brite EuRam Contract No. BRPR-CT96-0366 / Self-Compacting Concrete / Workability., Örjan Petersson, 1999. – 83 p.
30. Okamura, H., Ouchi, M., "Self-Compacting Concrete. Development, Present use and Future", Proceedings of the First International RILEM Symposium Self-Compacting Concrete, Stockholm 1999. RILEM Publication PRO7
31. П1-99 к СНиП 3.09.01-85. Применение добавок в бетоне. Минстройархитектуры РБ, Минск, 2000. – 33 с.
32. Добавки в бетон. Справочное пособие / В.С. Рамачадран, Р.Ф.Фельдман, М. Колепарди и др. Под ред. В.С.Рамачадрана. - М.: Стройиздат, 1988. - 575 с.
33. Ф. Вавржин, Р. Крчма. Химические добавки в строительстве. - М.: Стройиздат, 1964. – 288 с.
34. Robinson, C.E. Manning, and E.R. Morris, «Conformation and physical properties of the bacterial polysaccharides gellan, wellan, and rhamsan», Food Polymers, Gels, Colloids, Special Publication R.Soc. Vol. 82, pp. 22- 33, 1991.