

# ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО БЕТОНА

## OPTIMIZATION OF SELF-COMPACTING HIGH PERFORMANCE CONCRETE COMPOSITION

Для исследования были выбраны бетоны с известными данными о составе и свойствах. Различные свойства, заполнители и смеси указывают на разнообразие самоуплотняющихся высококачественных бетонов (СУВКБ), и на необходимость рассмотрения схожих смесей для распространенного применения. Результаты исследования даны в статистических терминах – амплитуда, частота, функции распределения, среднее значение и децили. Статья будет полезна для тех, кто знаком с СУВКБ, для практиков и исследователей.

Concretes with well-known data on composition and properties were selected for research. Different properties, aggregates and mixes testify to diversity of self-compacting high-performance concretes (SCHPC) and show necessity to consider similar mixes for the widespread applications. Results of research are given in statistical terms – amplitude, frequency, functions of distribution, mean value and deciles. The article will be useful for those familiar with SCHPC, practical engineers and researchers.

### ВВЕДЕНИЕ

Увеличение количества публикаций в журналах и в материалах международных конференций в прошлом десятилетии указывает на постоянный рост исследований самоуплотняющихся высококачественных бетонов. Статьи дополняются значительным числом документов по их применению. Это касается практи-

ческого применения СУВКБ, его преимуществ и недостатков, стоимости, эффективности графика строительства, преимуществ в производственных условиях, влияния на окружающую среду. Большинство работ включает детальную информацию о выборе исходных материалов, составе смеси и свойствах полученного бетона [1-20].

### ХАРАКТЕР АНАЛИЗИРУЕМЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

В данной статье анализируются свойства исходных материалов, пропорции смеси.

На рисунке 1 приведены география исследований СУВКБ и время появления публикаций. Первоначальные исследования СУВКБ выполнены в Азии. Широкое внедрение в Азии способствовало распространению его в Европе.

Приведены года публикаций (обычно после завершения проекта), страна, в которой проводили исследования, область применения, исходные материалы, состав смеси, свойства (прочность на

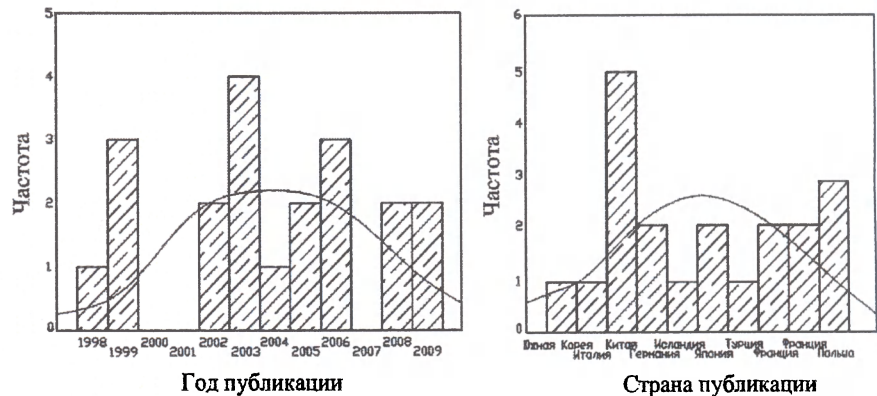


Рисунок 1 - Годы публикаций и география исследований

С.Н. Леонович,  
доктор технических наук, заведующий кафедрой «Технология строительного производства» Белорусского национального технического университета, г. Минск, Беларусь  
Д.А. Литвиновский,  
аспирант Брестского государственного технического университета, г. Брест, Беларусь

сжатие) в раннем и 28-суточном возрасте. Многие публикации содержат больше информации, чем рассмотрено в данной статье. Пробелы на диаграмме указывают на отсутствие информации.

### СВОЙСТВА В РАННЕМ ВОЗРАСТЕ

В анализируемых исследованиях широко используется и универсально применяется тест по диаметру растекания и времени растекания конуса Абрамса  $f_{l_{с\text{аб}}}$ . Примерно в 25 % исследований значения  $f_{l_{с\text{аб}}}$  570 мм и 690 мм (рис. 2).

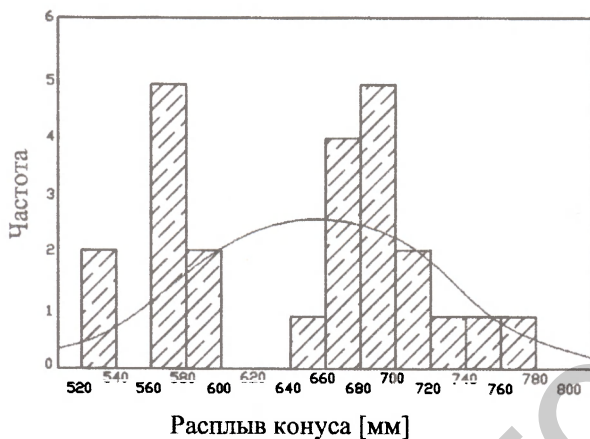


Рисунок 2 - Величины расплыва конуса

Время вытекания бетонной смеси из V-образной воронки упоминается примерно в половине случаев. Показатели отличаются значительно: время растекания изменяется от 2,4 до 13 с, а время вытекания из V-образной воронки от 4,6 до 6 с.

### ПРОЧНОСТЬ НА СЖАТИЕ

Во всех представленных случаях был использован бетон в возрасте 28 суток. Диапазон значений прочности на сжатие - от 51 до 170 МПа, около 40 % составов - в пределах 50-60 МПа (рис. 3). Это подтверждает возможность производства СУВКБ. Прочность главным образом определяется композицией вяжущих, а не отношением «вода/вяжущее», как в бетонах.



Рисунок 3 - Прочность на сжатие в возрасте 28 сут

### СОСТАВ СМЕСЕЙ

Тип крупного заполнителя и максимальные размеры заполнителей показаны на рисунках 4 и 5. Гравий используется более чем в трех случаях, базальт - в двух, в одном - применяется щебень, легкий заполнитель, гранит, измельченный гравий.

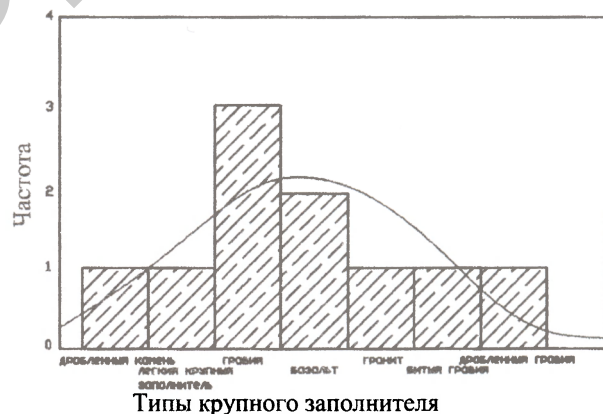
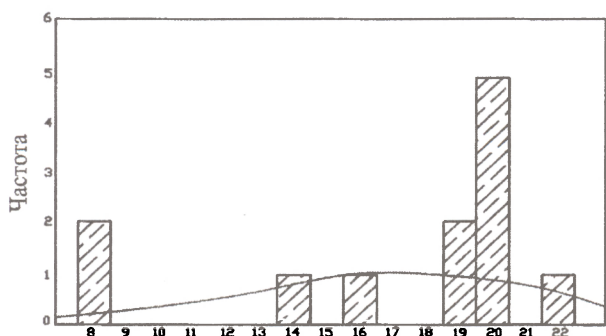


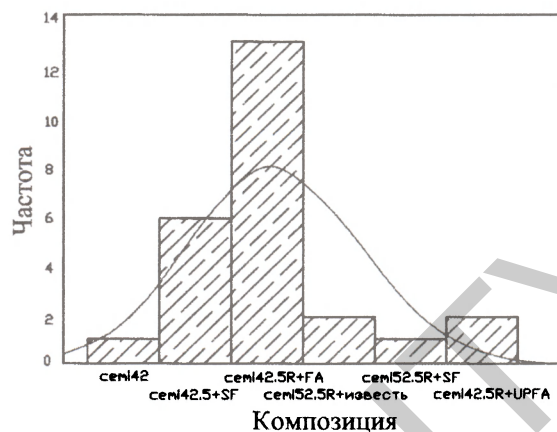
Рисунок 4 - Тип крупного заполнителя

В пяти случаях (около 42 %) использовался заполнитель максимальной крупностью 20 мм, в двух случаях - менее 8 мм. Крупный заполнитель (рис. 6) варьируется от 700 до 1200 кг/м<sup>3</sup>, в 66 % случаев - от 800 до 1000 кг/м<sup>3</sup>. Средним значением содержания крупного заполнителя является 917 кг/м<sup>3</sup>.



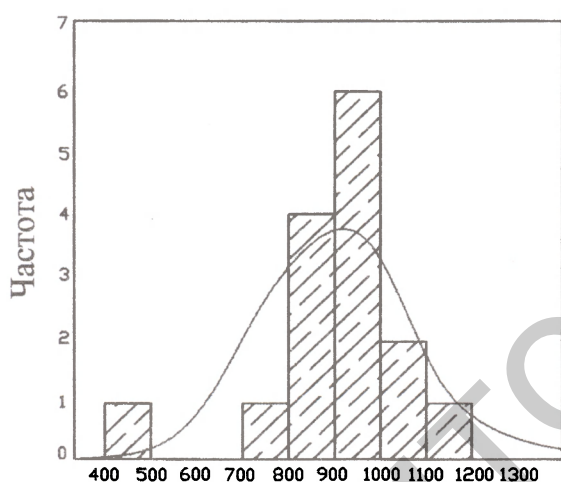
Максимальный размер крупного заполнителя, мм

Рисунок 5 - Максимальный размер крупного заполнителя



Композиция

Рисунок 7 - Компоненты вяжущего



Крупный заполнитель, кг/м³

Рисунок 6 - Количество крупного заполнителя

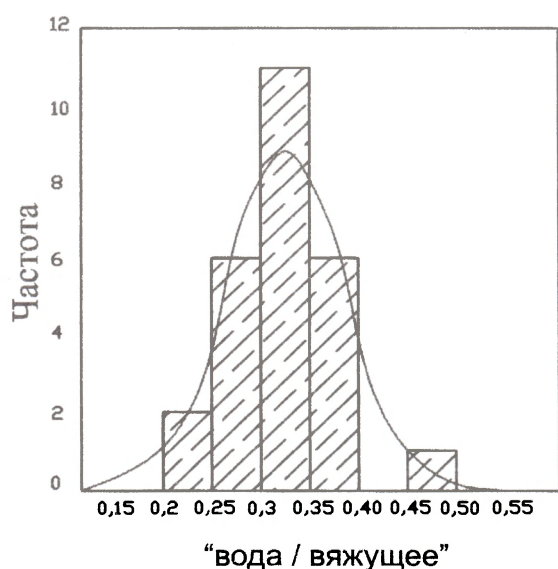
Расход вяжущего варьируется от 400 до 650 кг/м³, в 50 % случаев – 450-550 кг/м³. Среднее значение вяжущего всех составов находится на уровне 525 кг/м³.

На рисунке 7 показано используемое количество вяжущего. За исключением одной смеси, во всех использовался цемент с добавкой, уже включенной в цемент или добавленной при замесе. Наиболее часто использовалась зола-унос (13 случаев), а также микрокремнезем - в 6 случаях.

Исходя из анализируемых исследований, минеральные добавки в смеси понижают рост температуры при гидратации. Зола-унос придает более высокую прочность бетону за определенное вре-

мя и улучшает функциональные свойства бетона, делая его более прочным, долговечным и более стойким к химическим воздействиям. Микрокремнезем – постоянная составляющая высокоэффективных бетонов. Малые частицы микрокремнезема заполняют поры между частицами цемента и между матрицей цементного камня и заполнителем. Микрокремнезем, соединяясь с гидроксидом кальция, образует гидросиликат кальция. Результатом реакции является большая плотность, прочность и пониженная водопроницаемость.

Отношение «вода/вяжущее» изменяется от 0,2 до 0,5 и в 90 % случаев - в диапазоне 0,25-0,4 (рис. 8).



«вода / вяжущее»

Рисунок 8 - Отношение «вода/вяжущее»

Отношение «вода/вяжущее» имеет очень важное значение для свойств СУВКБ в раннем возрасте и в затвердевшем состоянии. Минеральные добавки оказывают значительное влияние на процесс гидратации, а тем самым - на тепловыделение, прочность и т.д. Среднее значение отношения «вода/вяжущее» составляет 0,325.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В данной статье проанализированы 20 исследований об использовании самоуплотняющегося высококачественного бетона, опубликованные с 1998 по 2009 гг. В статье отражено географическое распространение исследований СУВКБ в этот период и показана применимость использования СУВКБ почти во всех типах строительных конструкций.

2. В 25 % случаев использования СУВКБ, где расплыв конуса варьировался от 570 мм до 690 мм, прочность на сжатие 50 МПа достигалась в 100 % случаев.

3. В сорока двух случаях использовался заполнитель с максимальной крупностью 20 мм. Использование гравия и базальта зависело от местного сырья.

4. Практически во всех случаях использовались смеси портландцемента с минеральными добавками разных типов. Зола-унос и микрокремнезем – самые применяемые добавки (в 52 % и 24 % случаев).

5. Состав бетонной смеси: вяжущее – 525 кг/м<sup>3</sup>; отношение «вода/вяжущее» – 0,325 (по массе); расход крупного заполнителя – 917 кг/м<sup>3</sup>.

6. В целом исследования подтвердили, что СУВКБ представляет большое семейство составов. Имеются значительные возможности для оптимизации составов для роста эффективности и экономии.

## Литература

1. Choi, Y.W., Kim, Y.J., Shin, H.Ch., Moon, H.V. *An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete* // *Cement and Concrete Research*, 36. - 2006. - P. 1595-1602.

2. Collepardi, M., Collepardi, S., Ogoumah Olagot, J.J., Troli, R. *Laboratory tests and field experiences of high performance SCCs* // *3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete*. - 17-20 August 2003, Reykjavik, Iceland. - P. 904-912.

3. Ding, Y., Zhang, Y., Thomas, A. *The investigation on the workability of fibre cocktail reinforced self-compacting high performance concrete* // *Construction and Building Materials*. - Vol. 22. - Issue 7. - July, 2008. - P. 1462-1470.

4. Ding, Y., Zhang, Y., Thomas, A. *The investigation on strength and flexural toughness of fibre cocktail reinforced self-compacting high performance concrete* // *Construction and Building Materials*. - Vol. 23. - Issue 1. - January, 2009. - P. 448-452.

5. Li, J., Yin, J., Zhou, S., Li, Y. *Mix proportion calculation method of self-compacting high performance concrete* // *SCC'2005-China: 1st International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete*. - RILEM Publications SARL, 2005. - P. 199-205.

6. Ma, J., Dietz, J., Dehn, F. *Ultra High performance compacting concrete* // *3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete*. - 17-20 August 2003, Reykjavik, Iceland. - P. 136-142.

7. Ma, J., Dietz, J. *Ultra High Performance Self-Compacting Concrete* // *LACER II 2002*. - P. 33-42.

8. Nielsson, I., Wallevik, O.H. *Mix design of HS-SCC and practical application* // *3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete*. - 17-20 August 2003, Reykjavik, Iceland. - P. 506-513.

9. Okamura, H., Ouchi, M. *Self-compacting high performance concrete* // *Progress in structural Engineering and Materials* 98. - Vol. 1(4). - P. 378-383.

10. Ozbay, E., Oztas, A., Baykasoglu, A., Ozbebek, H. *Investigating mix proportions of high strength self compacting concrete by using Taguchi method* // *Construction and Building Materials* 23 (2009). - P. 694-702.

11. Rougeau, P., Maillard, J.L., Mary-Dippe, C. *Comparative study on properties of self-compacting and high performance concrete used in precast construction* // *International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. - № 1. - Stockholm, SUEDE (13/09/1999). - 1999. - P. 251-261.

12. Sari, M., Prat, E., Labastire, J.-F. *High strength self-compacting concrete Original solutions associating organic and inorganic admixtures* // *Cement and Concrete Research* 29 (1999). - P. 813-818.

13. Sri Ravindrarajah, R., Siladvi, D., Adamopoulos, B. *Development of High-Strength Self-Compacting Concrete with reduced segregation potential* // *3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete*. - 17-20 August 2003, Reykjavik, Iceland. - P. 530-532.

14. Tang, C.-W. et al. *Optimizing mixture for flowable high-performance concrete via reology tests* // *ACI Material Journal* 2001, November-December. - P. 493-502.
15. Urban, M. *Reologiczne podstawy uzyskiwania betonow samozaguszczalnych o wysokiej wytrzymałości* // *Cement Wapno Beton*. - 5/2008.
16. Urban, M. *Samozageszczalne betony wysokiej wytrzymałości* // *Przegląd Budowlany*. - 12/2006.
17. Urban, M. *Betony wysokiej wytrzymałości o właściwościach samozaguszczalnych* // *20 Konferencja Naukowo-Techniczna*. – Jadwisin, 2006.
18. Van, B.K., Montgomery, D. *Mixture proportioning method for SCC HPC with minimum paste volume* // *International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. - Stockholm, Sep. 13-14 1999. - P. 373-384.
19. Xie, Y., Liu, B., Yin, J., Zhou, S. *Optimum mix parameters of HSSCC with ultrapulverized fly ash* // *Cement and Concrete Research*. - Vol. 32 (2002). - P. 477-480.
20. Yin, J., Xie, Y., Yu, Z. *Optimization of fabrication technology of Self-Compacting High Performance Concrete* // *SCC'2005-China: 1st International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete*. - 26-28 May 2005, Changsha, Hunan, China. - P. 97-107.