

термическому анализу: тез. докл. – Самара, 1993. – С. 72. **5.** А.с. № 1830380 СССР, МКИ С04 В 33/32. Способ получения карбида кремния / Г.Д. Семченко, Е.К. Старолат, О.В. Дуников, С.М. Логвинков. Бюл. № 28. **6.** Семченко Г.Д. Механохимическое инициирование синтеза SiC / [Г.Д. Семченко, В.В. Калинин, О.Т. Николов, Е.Е. Старолат] // Теория и практика процессов измельчения и разделения. – Одесса, 1995. – Ч. 2. – С. 41 – 48. **7.** Семченко Г.Д. Деякі аспекти зародкоутворення SiC при термообробці геля з тетраетоксисилану / Г.Д. Семченко // Розвиток технічної хімії в Україні. – К.: НВЛ ВПФ НТУ «КПІ», 1995. – Вип. 1. – С. 8 – 9. **8.** Старолат О.Є. Дослідження структури і фазового складу нитридкремнійової кераміки, яка одержана з застосуванням золь-гель методу / [О.Є. Старолат, Г.Д. Семченко, Ю.М. Шмигарьов та інші.] // Розвиток технічної хімії в Україні. – К.: НВЛ ВПФ НТУ «КПІ», 1995. – Вип. 2. – С. 14 – 15.

Поступила в редколлегию 15.06.09

УДК 666.974

**С. КОВАЛЬ**, докт. техн. наук, **М. ЦИЯК**, канд. техн. наук,  
**М. СИТАРСКИ**, инж.-магистр,  
(Университет Варминско-Мазурский в Ольштыне, Польша)

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ ПОИСКА СОСТАВОВ САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА

Для пошуку оптимальних складів бетонів, що самоущільнюються (SCC), запропонована методика, яка заснована на генеруванні випадкових оцінок властивостей методом Монте-Карло з виключенням у процесі ітерації складів, що не задовольняють заданим критеріям якості.

A methodology of establishing composition of Self-Compacting Concrete (SCC) was proposed. It's based on generating casual valuation of property by method of Monte-Carlo with exception in the proces of integration of compositions not eligible any standard of quality.

**Введение.** Отказ от виброуплотнения, помимо экономии энергии, времени и трудозатрат при использовании самоуплотняющихся бетонов (*Self-Compacting Concrete, SCC*), приводит к существенному улучшению качества бетонных и железобетонных конструкций.

Кроме того, вносит определенный вклад в защиту здоровья человека и окружающей среды, что отвечает концепции устойчивого развития общества.

Возрастает и социальная привлекательность труда занятых бетонными работами людей [1].

Бетоны типа SCC используются в Польше, начиная с 1999 года [2], чему способствует наличие высокоэффективных суперпластификаторов и дисперсных добавок, и, главное, потребность в таких бетонах на объектах промышленного и гражданского строительства, особенно в случае высокого насыщения арматурой железобетонных конструкций.

На актуальность тематики самоуплотняющегося бетона указывает и большое количество международных симпозиумов, прошедших в последнее десятилетие.

В то же время анализ литературных данных показал, что пока не существует общепризнанной методики подбора состава SCC, требования к его качеству сформулированы в общем виде; существующие рекомендации построены на новых экспериментальных тестах («L-Box Test», «U-Funnel Test» и др.), имитирующих поведение смеси в конструкции [3].

Расчетные методы проектирования базируются [4] на различных теоретических предположениях и предусматривают, в частности, оптимизацию реологических параметров бетонной смеси, создание наиболее плотной упаковки заполнителей и наименьшего количества раствора, максимальное содержание заполнителя из условия блокирования расплыва, и минимального количества раствора, необходимого до обеспечения самоуплотнения смеси и др. Однако реализация на практике данных методик требует определения большого количества коэффициентов эмпирическим путем, в том числе, с использованием специальных вискозиметров для бетонной смеси, которые относятся к эксклюзивным.

Известны возможности создания SCC при незначительной модификации типовых составов вибрируемых бетонов; используя высокоэффективные добавки можно получить бетон типа SCC с показателями, удовлетворяющими конкретным потребителям [1, 2, 4].

**Методика.** Оптимизация состава велась при весьма жестких условиях к качеству бетона, заданных потребителем: бетонные смеси должны иметь расплыв конуса  $D \geq 70$  см при показателе неоднородности (сегрегации) SR – не более 1 % и воздухововлечении NP – не более 6 %.

Прочность в 28 сут – не менее 60 МПа, а в возрасте 3 дней – не менее 30 МПа.

Для оптимизации состава SCC использованы экспериментально-статистические модели (ЭС-модели), полученные при реализации 27 опытных точек (составов) по D-оптимальному плану эксперимента  $Na_5$ .

В группе факторов управления свойств «матрицы» изменялись на трех уровнях дозировка поликарбоксилатного суперпластификатора BV-10 ( $SP = X_1 = 1,4 \pm 0,4$  % от массы цемента), содержание золы уноса фильтров ТЭС, «porioł lotny», в диапазоне  $P1 = 30 \pm 10$  %) и водоцементное отношение ( $C/W = 0,43 \pm 0,03$ ). Свойства «каркаса» регулировались долей песка в смеси заполнителя ( $Pp = 50 \pm 5$ %) и содержанием мелкой фракции щебня 4 – 8 мм в крупной 8 – 16 мм: ( $z_d = 50 \pm 10$  %).

Водосодержание смесей менялось от 172 до 196  $dm/m^3$ , расход дорожного цемента СЕМ I 42,5 HSR/NA постоянный  $C = 400$   $кг/м^3$  [5].

В соответствии с рекомендациями EFNARC [3], экспериментально определялись диаметр расплыва бетонной смеси  $D$ , см, время  $T_{50}$  и  $T_{70}$  расплыва до  $D_1 = 50$  см и  $D_2 = 70$ , показатель сегрегации  $SR$  (как процентное отношение растворной части смеси в нижней и верхней части вибрированного вертикально трубчатого образца), воздухововлечение  $VB$ , а также прочность затвердевшего бетона  $R$  в возрасте 3 и 28 суток нормального твердения.

В нашем подходе по ЭС-моделям свойств бетона методом Монте-Карло генерируется случайное множества оценок этих свойств.

В ходе нескольких итераций исключаются составы не удовлетворяющие требованиям к SCC по методике [6].

Схема процедуры оптимизации показана на рис.1.



Рис.1. Схема процедуры итерации генерированных составов

Этап «1-0». На первом этапе, используя пятифакторные модели, генерируются методом Монте-Карло равномерно распределенные в области 1000 случайных точек (составов) четырехмерного куба, к которым добавлены 27 вершин ( $\pm 1, \pm 1, \pm 1, \pm 1$ ), всего 1027 составов.

Этап «1-1». На втором этапе генерируемый массив (координаты факторов  $x_1 - x_5$  и соответствующие оценки пяти свойств) сепарируется. Для дальнейшего анализа отбираются те составы уровня критериев ( $D, SR, NP, R_1, R_{28}$ ), которые удовлетворяют предъявленным им нормативным требованиям, а остальная часть состава («неудовлетворительное» составы по нормативу) удаляются.

Таким образом, этап «1-1» формирует допустимую область. На данном этапе были исключены составы, которые не соответствовали критерию диаметра расплыва  $D < 70$  см. После удаления осталось 145 составов.

Этап «1-2». На третьем этапе рассмотрен показатель сегрегации. Отсортировав данные и разместив их в порядке возрастания, были удалены составы с показателями расслоения  $SR > 1$  %. После исключения осталось 35 составов, или 3,5 % от первоначального числа.

Этап «1-3». На следующем этапе исключались составы, которые не отвечали требованиям прочности на 28 сутки. Были удалены составы, у которых показатель  $R_{28}$  оказался меньше, чем 60 МПа.

На этапах «1-4» и «1-5» были удалены составы, которые не удовлетворяли показателям прочности на 1 сутки и необходимому воздухоовлечению.

Как указывалось, – это прочность  $R_3 < 30$  МПа, а для ВВ это показатели выше 6 %.

После указанных операций осталось 9 составов, которые отвечали всем требованиям критериев, предъявляемым к SCC.

Учитывая, что поликарбоксилатные добавки дорогостоящи, был исключены составы, содержащие наибольшее количество СП.

Схема на рис. 2а иллюстрирует сам подход, а диаграммы на рис. 2б показывают сокращение числа вариантов.

Графики, показывающие последовательные изменения интервалов 5 факторов  $X_1 - X_5$  (рис. 3) и изменения в ходе вычислительного эксперимента нормируемых критериев (рис. 4) при поиске рациональных составов.

После проведения итерационного поиска выбирается компромиссный состав, свойства которого удовлетворяют заданным требованиям.

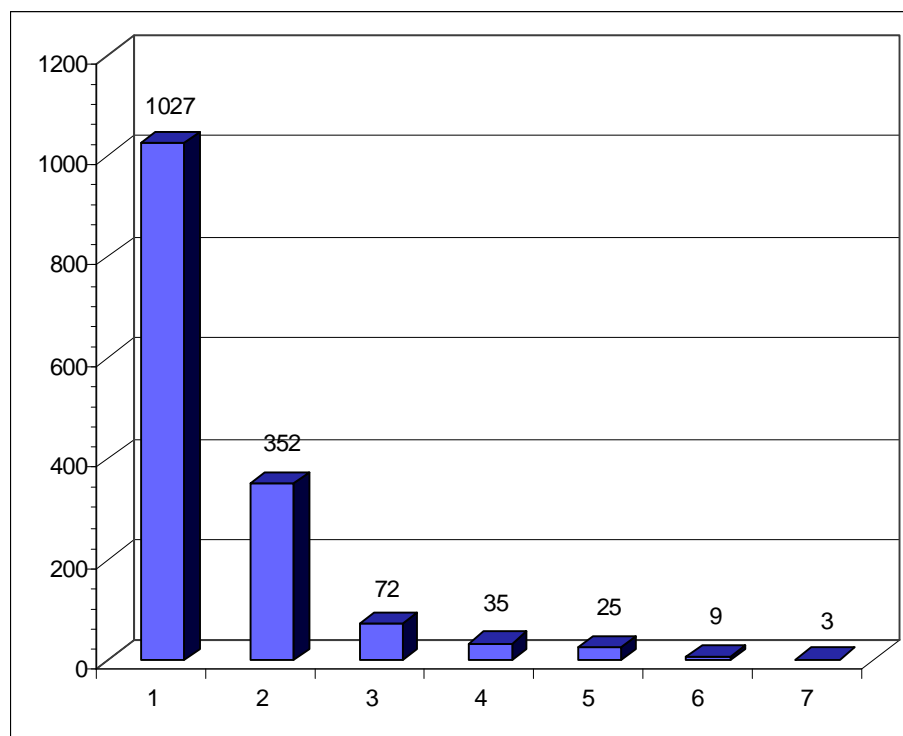
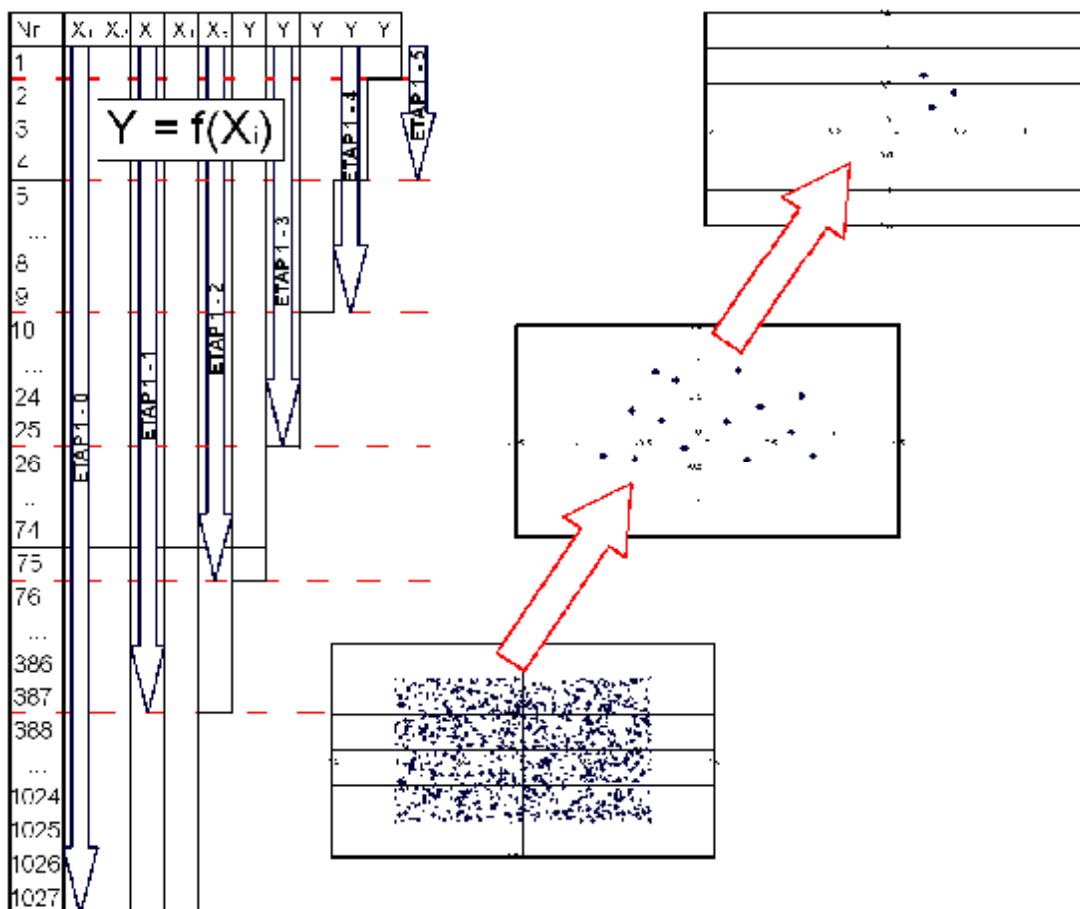


Рис. 2. Иллюстрация схемы итерации (а) и сокращение числа вариантов в процессе поиска компромиссных составов (б)

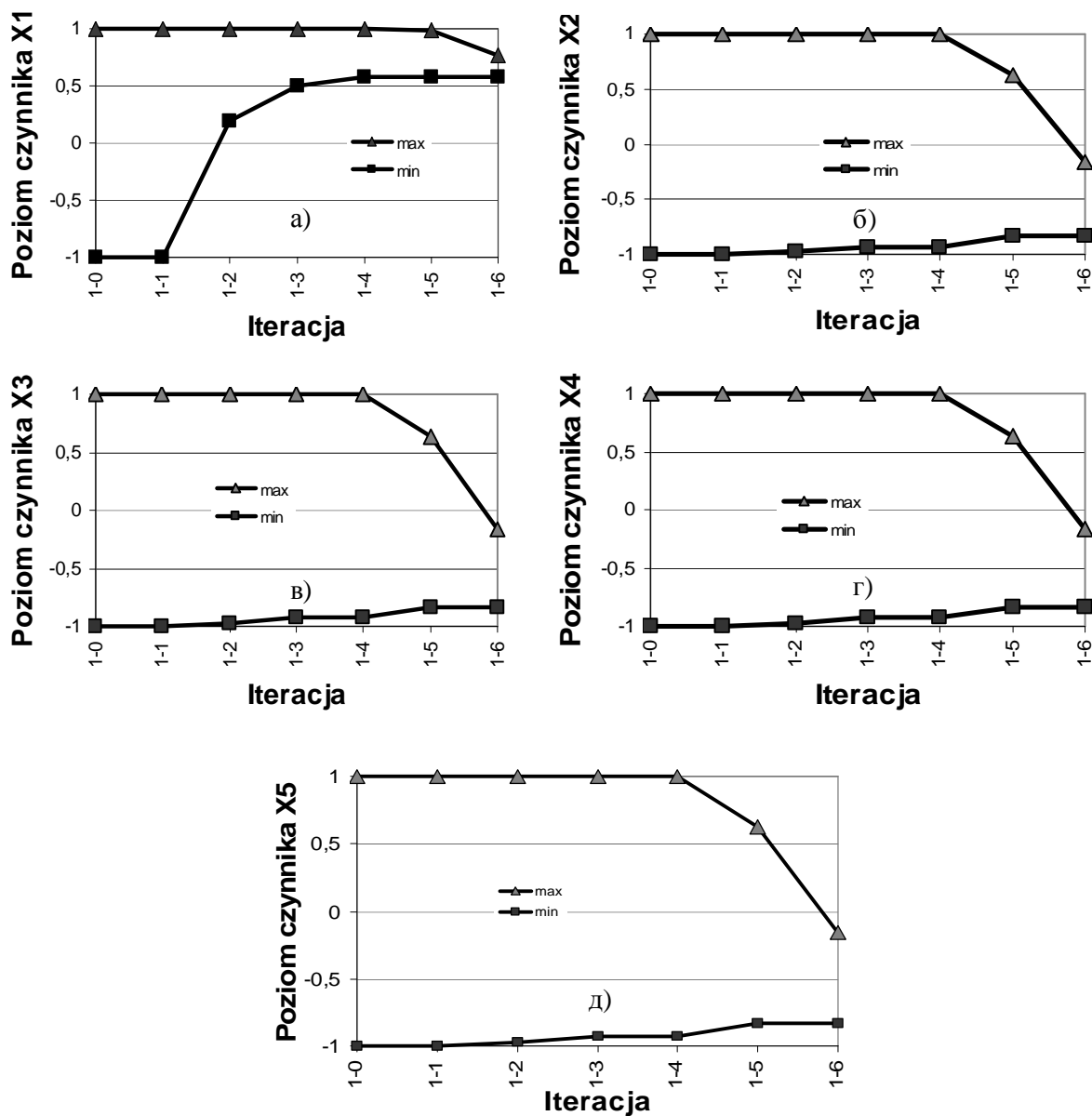


Рис. 3. Трансформация коридора допустимых значений уровней факторов: дозировок СП (а) и минеральной добавки (б), В/Ц (в), доли песка (г) и мелкого щебня (д) в бетоне.

**Экспериментальные результаты.** В таблице приведены оптимальные составы бетонов, отвечающих поставленным требованиям по критериям по-

требителя. Проведена идентификация оптимизированных составов относительно принадлежности к бетонам класса SCC с помощью специальных тестов [1 – 4].

Среди трех составов, выбранных в ходе итераций, наилучшие показатели по результатам тестов для SCC отмечены для состава № 3.

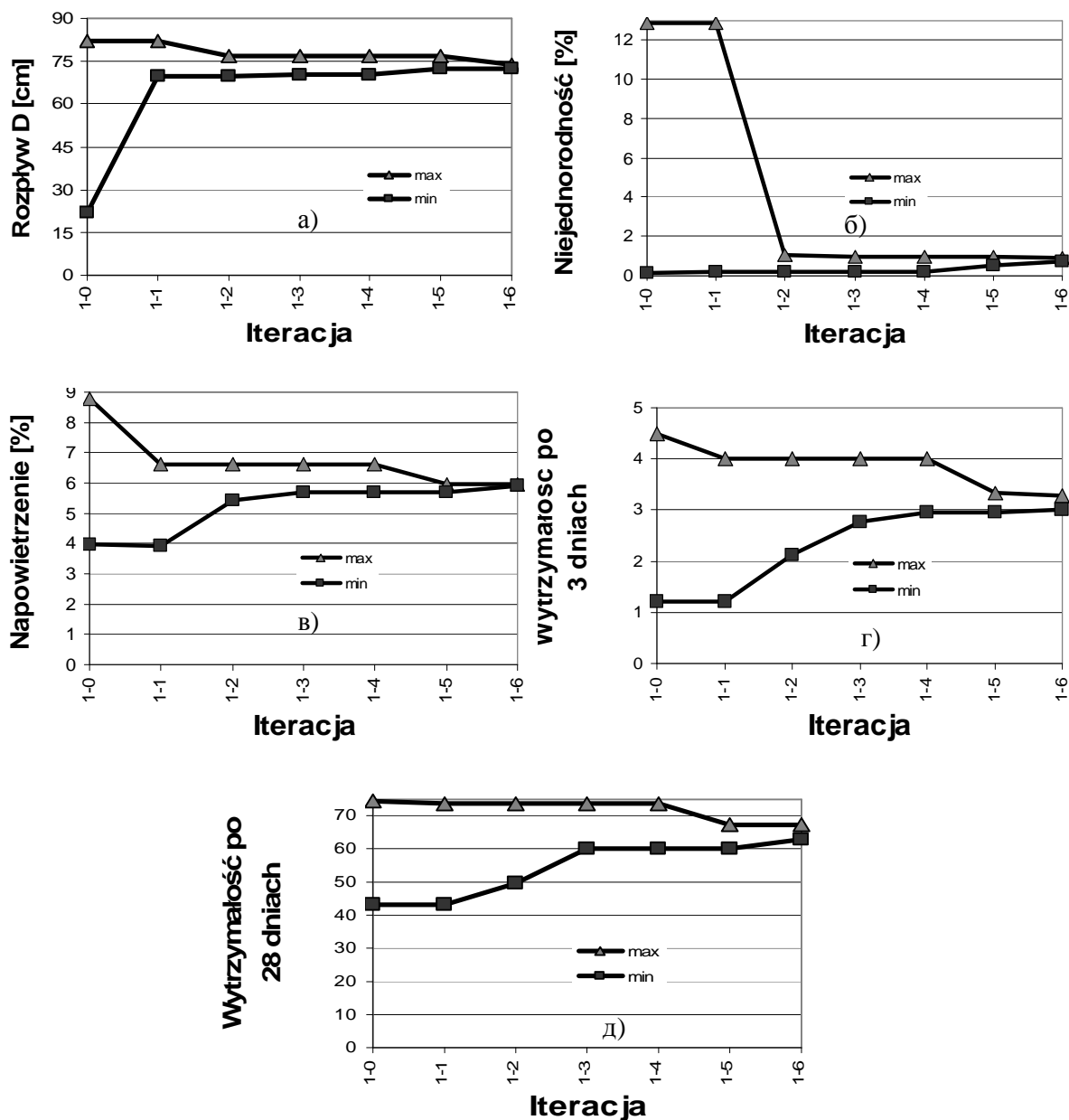


Рис. 4. Изменение в процессе поиска компромисса значений критериев качества: расплыв конуса D (а), показатель сегрегации SR (б), воздуховлечение NP смеси (в), а также прочность  $R_3$  бетона в после 3 дней твердения (г) и в «марочном» возрасте  $R_{28}$  (д)

По критерию сегрегации этот состав относится к классу SR2.

Класс по удобоукладываемости SF2 определен по времени расплыва  $T_{50} = 5$  с и истечению из воронки «Funnel» ( $T_v = 12$  с).

Согласно результатам теста «L-Вох», устанавливающего способность смеси к самовыравниванию, бетонная смесь относится к классу PA2 (отклонение от горизонтали менее 0,2).

Проведенные исследования развивают методологию проектирования составов многокомпонентных модифицированных строительных материалов.

Таблица

Характеристики выбранных по результатам итерации составов

№	Содержание компонентов в м <sup>3</sup>							Показатели качества				
	Ц, кг	В, дм <sup>3</sup>	П, кг	Щ <sub>м</sub> , кг	Щ <sub>к</sub> , кг	ЗУ, кг	СП, дм <sup>3</sup>	D, см	SR, %	ВВ, %	R <sub>3</sub> , МПа	R <sub>28</sub> , МПа
1	400	187,2	758	404	431	154	6,04	72,5	0,9	5,9	32	66
2	400	182,4	801	358	463	142	6,24	73,5	0,7	5,9	30	63
3	400	185,6	786	340	475	151	6,33	74,0	0,9	5,9	33	68

**Список литературы:** 1. *Szwabowki J.* Betony samozagęszczalne / *J. Szwabowki, J. Śliwiński* // Polski Cement, Budownictwo, Technologie, Architektura. – 2003. – № 2. 2. *Radomski W.* Pierwsze w Polsce zastosowanie betonu samozagęszczalnego w konstrukcji mostu / *W. Radomski* // Inżynieria i Budownictwo. – 2003. – № 2. – S. 103 – 107. 3. Specification and guidelines for self-compacting concrete, EFNARC, 2002. [www.efnarc.org](http://www.efnarc.org). 4. *Urban M.* Metody projektowania betonow samozagęszczalnych / *M. Urban* // Reologia w Technologii Betonu: Gyrażdże Cement. – 2001. – S. 61 – 71. 5. Циак М. Компромиссная оптимизация состава самоуплотняющегося бетона / *М. Циак, С.В. Коваль* // Вісник НТУ «ХП». – 2008. – № 26. – С. 155 – 161. 6. Вознесенский В.А. Компьютерный поиск компромиссных технологических решений: методические указания // [В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, А.Д. Довгань и др.]. – Одесса: ОГАСА, 2006. – 10 с.

Поступила в редколлегию 15.06.09