

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОЛОТОГО ИЗВЕСТНЯКА-РАКУШЕЧНИКА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА

**Поляков Д.М.** (Одесская государственная академия строительства и архитектуры)

**Введение.** В настоящее время тенденция в технологии бетона является применение самоуплотняющихся бетонных (СУБ) смесей, которые

способных уплотняться без вибрации, полностью заполнять форму в густоармированных конструкциях [1]. Для изготовления самоуплотняющегося бетона, одним из требований является введение тонкодисперсных минеральных добавок.

Известные тонкодисперсные добавки (микрокремнезем, метаксаолин) эффективны в технологии монолитного бетона, однако отличаются высокой стоимостью и применяются в основном в бетонах для спецконструкций. Поэтому в качестве альтернативного варианта для получения однородных смесей и бетонов, рассматривался молотый до оптимальной (по энергозатратам и свойствам) удельной поверхности известняк. Приготовление такого наполнителя значительно менее энергозатратно, чем, в частности, метаксаолина, а известняк широко распространен на юге Украины[4].

Щебень и песок, получаемые дроблением и рассевом отходов камнепиления известняков-ракушечников по своим механическим характеристикам пригодны для приготовления легкого и облегченных бетонов и конструкций из них, что показано в работах П.Л.Еременка[2], других специалистов. Однако исследования по использованию молотого известняка в качестве наполнителя для высокоподвижных и литых бетонных смесей, который необходим, в том числе, для самоуплотняющихся бетонов, в Украине до настоящего времени не проводились.

Для анализа влияния факторов и оптимизации состава SCC использованы экспериментально-статистические модели (ЭС-модели), полученные при реализации 27 опытных точек (составов) по D-оптимальному плану эксперимента  $N_{a5}$ ; В группе факторов управления свойств «матрицы» изменялись на трех уровнях дозировка поликарбонатного суперпластификатора Релаксол Супер ПК ( $СП=X_1=0,50\pm 0,05$  % от массы цемента), содержание наполнителя (Н) – молотый известняк-ракушечник  $S_{уд}=2500$  см<sup>2</sup>/г в диапазоне ( $H=20\pm 10\%$ ) и водоцементное отношение ( $B/C=0,40\pm 0,02$ ). Свойства «каркаса» регулировались долей песка в смеси заполнителя ( $r=50\pm 5\%$ ) и содержанием мелкой фракции щебня 5-10 мм в крупной 5-20 мм: ( $Щ_м=60\pm 20$  %). Водосодержание смесей менялось от 171 до 186 л/м<sup>3</sup>, расход цемента ПЦ II/A-Ш-400 постоянный  $C=450$  кг/м<sup>3</sup>.

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), воздухоовлечение  $V_{ВВ}$ , а также прочность затвердевшего бетона R в возрасте 3 и 28 суток нормального твердения.

Удобоукладываемость бетонной смеси. Оценить осадку конуса самоуплотняющихся бетонов не представляется возможным, т.к. смесь имеет специфическую консистенцию (консистенция меда) поэтому предложены новые способы и методики оценки удобоукладываемости смеси: по расплыву конуса, истечение из V-образной воронки, нивелирования «L-box test» .

Так, для расплыва конуса смеси получена (при ошибке эксперимента  $s_3 = 1,2$  см и одностороннем риске  $\alpha=0,2$ ) структурированная модель второго порядка, в которой выделены блоки двух подсистем факторов:

$$D = 70,5 + \begin{array}{|l|} \hline \begin{array}{l} +9,3x_1 \\ +1,42x_{12} \\ -2,0x_2 \\ +3,32x_{23} \\ +10,3x_3 \\ \text{(a)} \end{array} \\ \hline \begin{array}{l} -5,8x_1^2 \\ -6,6x_{13} \\ +1,85x_2^2 \\ -5,14x_3^2 \end{array} \\ \hline \begin{array}{l} - \\ 0,32x_{14} \\ +2,54x_{15} \\ - \\ 1,45x_{24} \\ - \\ 0,45x_{25} \\ +1,39x_{34} \\ \pm 0,0x_{35} \text{ (c)} \end{array} \\ \hline \begin{array}{l} -1,5x_4 \\ \pm 0,0x_4^2 - 0,82x_{45} \\ -1,36x_5 \\ +1,73x_5^2 \text{ (b)} \end{array} \\ \hline \end{array}$$

Блок (а), включающий оценки влияния на D трех факторов «матрицы» при среднем уровне факторов «каркаса», описывает локальное поле  $D(x_1, x_2, x_3)$  при  $x_4, x_5=0$ ; изменение этого поля с изменением количества песка и крупного заполнителя отражают блоки (b) и (c). С другой стороны, блок (b) соответствующий локальному полю  $D(x_4, x_5)$  при  $x_1, x_2, x_3=0$ , оценивает влияние доли песка и крупности щебня при средних уровнях дозировки СП, Н и В/Ц. Блок (c) представляет изменения в эффектах взаимодействий.

Максимальный уровень поля (1)  $D_{\max} = 83,49$  см, минимум  $D_{\min} = 20,61$  см, т.е. изменение этого свойства в исследуемой области составов четырехкратное. На рис.2 показано влияние пяти факторов в области минимума и максимума D, что моделирует условия «хорошей» и «плохой» рецептуры бетона [5]. Введение СП в любом случае приводит к увеличению расплыва, как и повышение водосодержания бетонной смеси. Концентрация дисперсной минеральной добавки приводит к снижению расплыва, так как известняк является пористым материалом, адсорбирующий на себя воду, как и содержание песка в смеси. Аналогичный анализ  $T_{50}$  указал на удлинение времени расплыва при повышении количества песка и минеральной добавки, быстро адсорбирующих жидкую фазу.

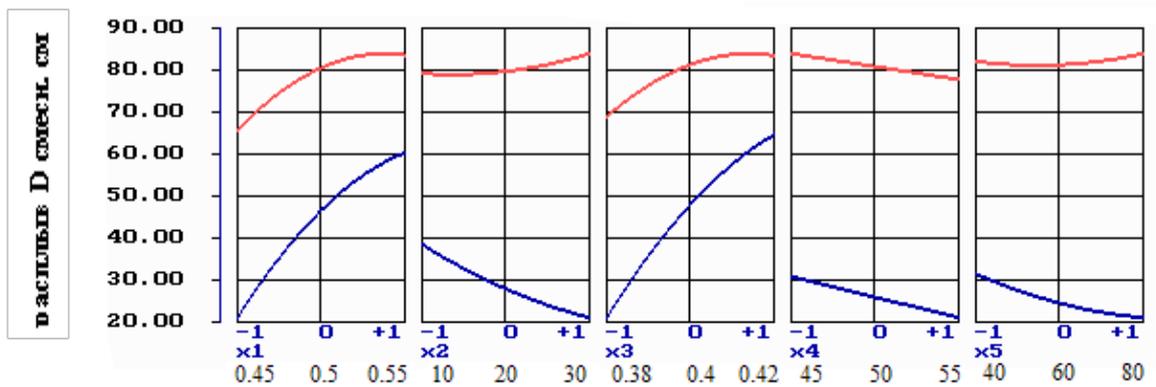


Рис.2. Зависимости влияния факторов состава в области максимума и минимума показателя D

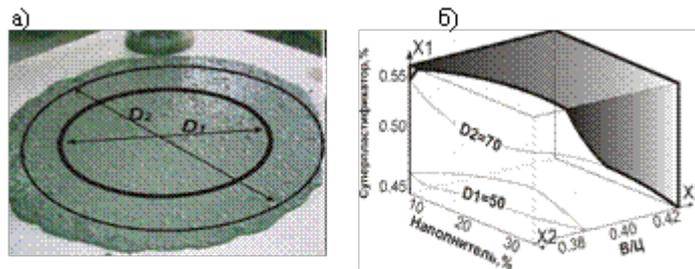


Рис.3 Оценка характеристик распыва D смеси (а) и диаграмма влияния факторов «матрицы» ( $x_4, x_5 = 0$ ) с выделением области  $D_1 \geq 70$

На рис.3б показана диаграмма влияния трех факторов матрицы на показатель распыва  $D_2$ , определенный экспериментально (рис.3а), при фиксированном объеме песка  $\tau=50\%$  и 60 %-ном содержании щебня фр.5-10. Область составов, обеспечивающих хорошую растекаемость смеси ( $D_2 \geq 70$  см), находится в зоне высоких концентраций

СП ( $X_1=0,55\%$ ), повышенного содержания воды и средних дозировок наполнителя, занимая  $\Omega_d=50,1\%$  объема факторного пространства.

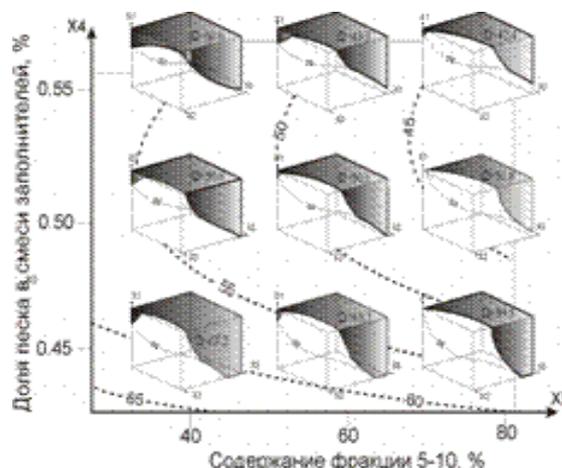
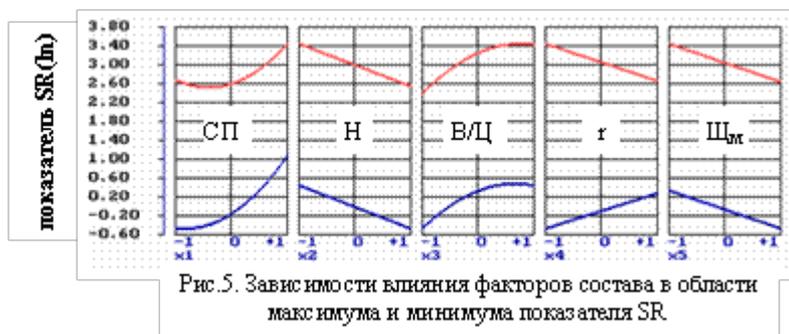


Рис. 4. Девять трехфакторных номограмм, показывающих зависимость эффективности матрицы от факторов

По мере изменения качественного и количественного состава зерновой части, объем области допустимых решений существенно меняется: от  $\Omega_d=42.4\%$  при высоком содержании песка и большом насыщении смеси мелким щебнем, до  $\Omega_d=67,2\%$  при низком содержании песка  $r=45\%$  и мелкого щебня  $\Pi_m=40\%$  (рис.4).

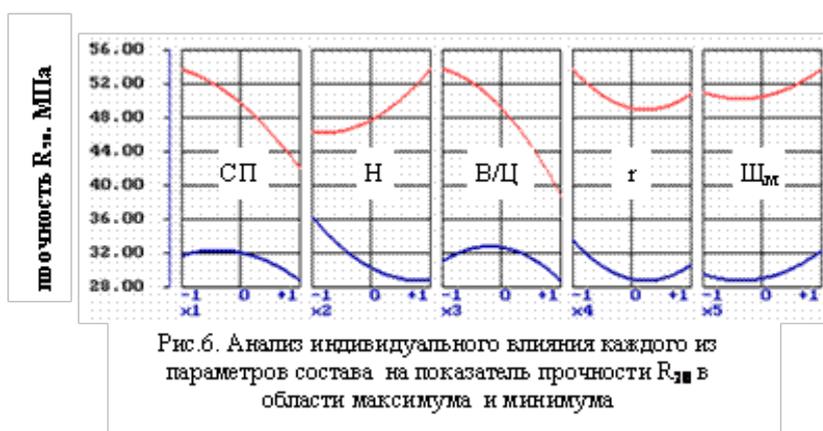
Однородность бетонных смесей. Одной из главных характеристик СУБ является однородность (сегрегация SR), которая, свою очередь, зависит от сил связи между частицами (определяемых в бетонных смесях водосодержанием, модифицирующими добавками ПАВ и тонкодисперсными наполнителями), а с другой – от особенностей зернового каркаса.

Введение суперпластификатора повышает показатель сегрегации с 4% при малой до 12% при максимальной концентрации. Увеличение количества молотого известняка-ракушечника, имеет четко выраженную тенденцию, приводящую к снижению сегрегации, как и увеличение мелкой фракции щебня в смеси крупной (рис.5).



Прочность затвердевшего бетона. В случае СУБ требования к прочности не всегда являются первостепенными (так как обеспечиваются высокой водоредуцирующей способностью поликарбоксилатных и других «мощных» суперпластификаторов, снижающих В/Ц до 0,3-0,4).

Рис.6 иллюстрирует влияние каждого из параметров состава на 28-суточную прочность. Влияние наполнителя на  $R_{28}$  неоднозначно, т.к. в области «хорошей» рецептуры бетона, наблюдается рост прочности с увеличением дозировки известняка, предположительно причиной упрочнения является проникновение гелеобразной цементирующей массы в поры карбонатного зерна и его цементации[2], обеспечивая прочный и плотный контакт с цементным камнем. Область «плохой» рецептуры, показывает, что если будет подобран неоптимальный состав бетона ( $СП=0,55\%$ ,  $В/Ц=0,42$ ,  $r=52\%$ ,  $\Pi_m=50\%$ ), то наполнитель может привести к снижению прочности.



Введение в исследование дополнительных нормативных значений показателей качества SCC (в частности,  $SR \leq 5\%$ ,  $D \geq 70$  см,  $R_{28} \geq 35$  МПа,  $T_{50} \leq 4$ с,  $V_{вв} \leq 7,5\%$ ) значительно сокращает искомые области рациональных рецептур (рис.7). В случае уменьшения количества мелкой фракции щебня  $\Sigma_{\text{Щ}} < 60\%$  существенно возрастает расслаиваемость смеси; в то же время добавление песка свыше 50 % приводит к резкому повышению воздухововлечения.

Поэтому выполнить требования установленные ООО «Монолитстрой» к бетонным смесям для монолитнокоркасного домостроения ( $SR \leq 5\%$ ,  $D \geq 70$  см,  $R_{28} \geq 35$  МПа,  $T_{50} \leq 4$ с,  $V_{вв} \leq 7,5\%$ ) практически весьма сложно без оптимизации параметров зернового состава.

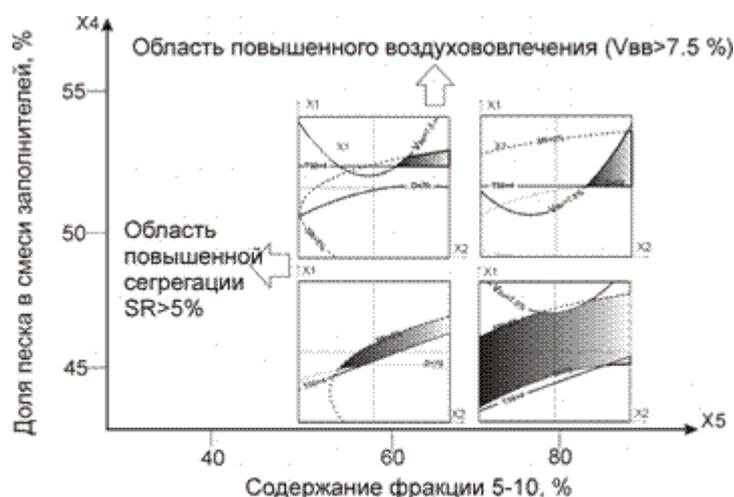


Рис.7 Трансформация области компромиссных решений ( $SR \leq 5\%$ ,  $V_{вв} \leq 7,5\%$ ,  $R_{28} \geq 35$  МПа,  $D \geq 70$  см,  $T_{50} \leq 4$ с) при изменении параметров состава

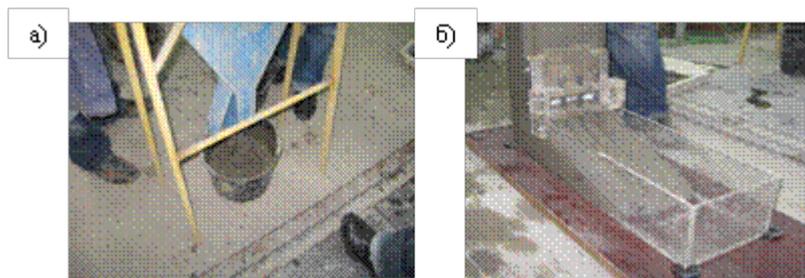


Рис.6. Тест «V-funnel» (а) и «L-Box» (б) для оптимизированной смеси

Была проведена оптимизация составов относительно принадлежности к бетонам класса SCC. Получен состав бетонной смеси (кг/м<sup>3</sup>): Ц=450, В=175, г=814, щебень фр.5-10  $\Sigma_{\text{Щ}}=488$ , щебень фр.5-20  $\Sigma_{\text{Щ}}=325$ , СП =6 л, Н =135 кг, который обеспечивает расплыв конуса  $D=75$  см, что соответствует [4] классу SF2 по расплыву ( $d=66...75$  см). По показателю сегрегации - класс SR2 (раствороотделение  $\leq 5\%$ ). Класс SF2 определен по времени расплыва  $T_{50}=2,3$ с и истечению из воронки «Funnel» 12,4 с (рис.6а). Согласно проведенного теста «L-Box» (рис.6б), устанавливающего способность смеси к самовыравниванию в армированных конструкциях, бетонная смесь относится к классу PA2 (отклонение от горизонтали менее 0,2). Прочность Бетона составила  $R_3=13,3$  и  $R_{28}=43,3$  МПа.

Таким образом, установлено, что использование молотого известняка-ракушечника рациональной удельной поверхности в качестве дисперсного наполнителя позволяет получать бетоны, относящиеся к самоуплотняющимся.

### Литература

1. H Okamura and M Ouchi. 'Self-compacting Concrete. Development, Presentuse and Future'. Proceedingd of the First International RILEM Symposium on 'Self-Compacting Concrete'. Sweden, Proc 7, 1999, pp 3-14.
2. Еременок П.Л., Измайлов Ю.В., Ящук В.Е. Известняковые бетоны и бетониты. – Киев, Бюро технической помощи. НИИСК АС и А УССР, 1958. – 64 с., ил.
3. The European Guidelines for Self Compacting Concrete” Specification, Production and Use, 2005.
4. Поляков Д.М. Анализ влияния молотого известняка-ракушечника как наполнителя бетонной смеси / Д.М. Поляков, Е.П. Гофман, С.В.Савченко, С.В. Коваль // Бетони і розчини з використанням ефективних добавок та відходів промисловості: Збірник матеріалів науково-технічного семінару «Структура, властивості та складу бетону».- К.:ТОВ “ПОЛІПРОМ”. - 2008. – С. 185-190.
5. Коваль С.В. Модифицированные бетоны: моделирование и оптимизация //Строительные материалы и изделия, 2004. - № 4. -С. 20-24.