

УДК 691.175:519.2

ВЛИЯНИЕ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРОВ И ВИДА ПЕСКА НА ВЛАГОПОТЕРИ ТВЕРДЕЮЩЕГО БЕТОНА

Е.П.Гофман, С.В.Коваль (*Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г.Одесса, Украина*)

Проведено моделирование влияния добавки суперпластификатора и вида песка с целью поиска оптимальных условий снижения влагопотерь твердеющего раствора.

Проблема снижения трещиностойкости становится крайне актуальной в связи с усложнением конфигурации конструкций и требованиям к всевозможности бетонных работ. В летний период, когда температуры достигают высоких значений, происходит уменьшение относительной влажности бетона, уложенного в опалубку, что сопровождается образованием пор и развитием химической усадки. Химическая усадка - внутреннее уменьшение объема материала при уменьшении абсолютного объема продуктов гидратации, по сравнению с объемом первоначальных составляющих (цемента и воды).

Методы, которые способствуют снижению усадки и трещинообразованию в раннем возрасте, включают модификацию цемента, применение минеральных и химических добавок, фибр а также надлежащий уход за бетоном. Традиционные методы защиты включают распыление воды, водонасыщенные покрытия, использование туманов, синтетических защитных покрытий, специальных средств для ухода и т.д. Кроме того, применяется разнообразная техника ускоренного ухода, основанная на тепловлажностной обработке, в том числе и с помощью повышенного давления в автоклавах.

Некоторые виды бетонов (особенно высокопрочных) с современными суперпластификаторами имеют весьма низкое водовязущее отношение, и содержат недостаточное количество воды затворения для того, чтобы обеспечить заполнение крупных капилляров, необходимых для поддержания реакций гидратации и пуццолановой реакции в течение времени.

По этой причине общепринято, что методы, основанные на введении дополнительного количества воды (к тому количеству, что рассчитывается по водоцементному отношению, исходя из требуемой прочности), более эффективны для данного типа бетонов. Однако это не способно предотвратить явление уменьшения относительной

влажности твердеющего раствора вследствие потребления капиллярной влаги в процессе гидратации цемента и высыхания.

Идея, по которой влагопотерям можно противодействовать с помощью пористого компонента, чтобы обеспечить дополнительный внутренний источник воды и скомпенсировать водопотери, вызванные химической усадкой в процессе гидратации, была высказана достаточно давно [1]. В процессе формирования гидратов дополнительная вода оттягивается из относительно больших пор легких заполнителей в значительно меньшие поры цементного камня. Это минимизирует развитие усадки, так как напряжение усадки, согласно уравнению Кельвина-Лапласа, контролируется размерами мельчайших пустых пор.

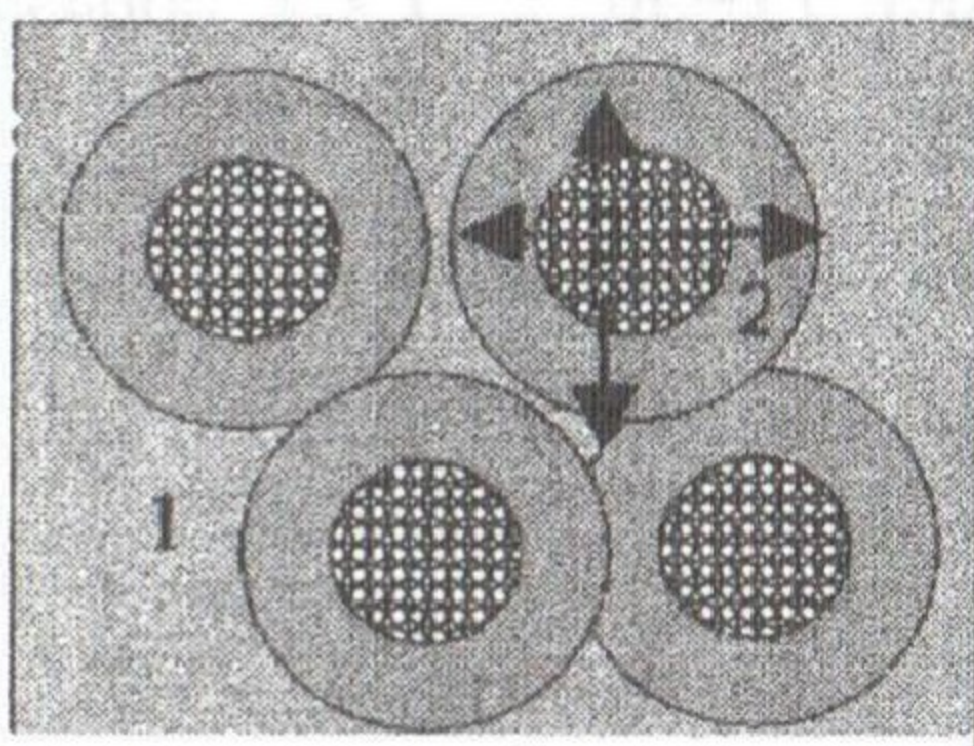


Рис. 1. Схема насыщения цементного камня (1) влагой (2) от мелкого пористого заполнителя (3)

Был выдвинут тезис о необходимости использования для этой цели мелкодисперсного пористого заполнителя, чтобы максимально распределить источники подачи внутренней воды по всему объему цементной матрицы. Показано, что тонкие фракции пористого заполнителя должны быть наиболее эффективны для распределения влаги [2], учитывая, что миграция влаги от частиц ограничена расстоянием 0,1—0,2 м.

Однако считается [3], что реальное расстояние, на которое способна мигрировать вода в цементном камне, значительно больше, а основное влияние на снижение усадки оказывает не расстояние между частицами, а его пористость и водопоглощение.

Учитывая данные теоретические положения, анализировалась возможность снижения влагопотерь твердеющего бетона за счет введения модифицирующих добавок типа суперпластификатора (СП) и одновременного регулирования состава песка.

Фактором управления водосодержанием и плотностью бетона являлась концентрация суперпластификатора «Дофен» ($СП=X_1=0,4\pm 0,4\%$). На отдельных этапах в эксперимент включались другие добавки – С-3 и Релаксол Супер ПК.

В качестве фактора регулирования зернового состава рассматривалось содержание в смеси заполнителей песка крупной

фракции (P_k , фр. 1,2-2,5 мм) в диапазоне изменения $P_k = X_2 = 20 \pm 20\%$ от объема рядового песка (P_m , фр. 0,15-0,3 мм).

Третьим фактором, регулирующим и процессы влагопереноса и развитие внутренних напряжений [4], являлся пористый керамзитовый песок фр. 1,2-2,5 в смеси заполнителей, содержание которого варьировалось в пределах $PK = X_3 = 5 \pm 5\%$.

Основным источником влагопотерь является растворная составляющая бетона, поэтому эксперименты были поставлены с цементно-песчаным раствором. По результатам эксперимента с равноподвижными растворами ($OK = 16,0 \pm 1,0$ см, Ц:П = 1:3), проведенного по D-оптимальному плану B_3 , оценивалось изменение водосодержания W , влагопотерь ($W_t = m_0 - m_t / m_0$) и прочности R . Измерялась масса m при высушивании ($T = 50 \pm 1^\circ C$) образцов раствора, уложенного в полиэтиленовые цилиндрические формы диаметром 60 мм и высотой 100 мм. Всего построено 24 кривых изменения влагопотерь во времени (подобных кривым на рис.2а).

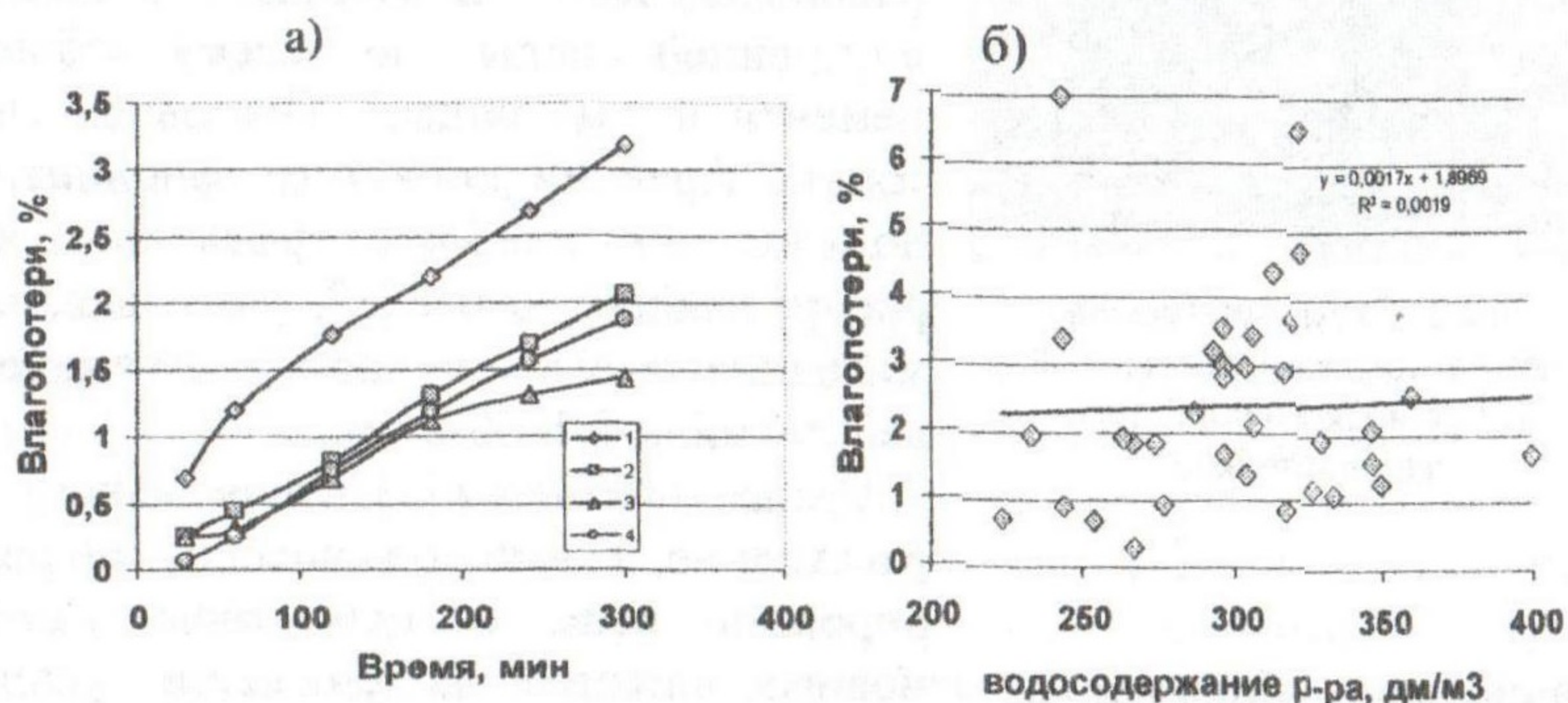


Рис.2. Зависимость влагопотерь от времени (а) и водосодержания (б) раствора: 1-без добавок. 2- С-3; 3- Релаксол Супер; 4- Дофен

Анализ указывает, что снижение общего количества воды за счет суперпластификаторов приводит к уменьшению влагопотерь бетонной смеси (рис.2а). Однако при объединении результатов экспериментов, где учитывается влияние песков, не отмечено прямой зависимости между водосодержанием смесей и влагопотерями (рис.2б)

Анализ кинетики W_t подтвердил известное положение о том, что процесс испарения влаги из свежесформованного раствора имеет два периода, характеризующихся постоянной и падающей интенсивностью испарения. В начальный период (постоянная и максимальная величина интенсивности испарения) выход влаги не лимитируется внутренним массопереносом и зависит от разности парциального давления пара у

поверхности раствора и в окружающей среде. При достижении определенной влажности наступает период падающей интенсивности испарения, ограниченный внутренним массопереносом и характеризуемый углублением зоны испарения и обезвоживания образца раствора от периферии к центру.

Кривые влагопотерь с остаточной дисперсией $\delta < 10\%$ и коэффициентом детерминации $R^2 = 0,97...0,99$ описываются зависимостью:

$$W_t = K_0 \tau^{K_1} e^{K_2}, \quad (1)$$

где K_0 - влагопотери твердеющего раствора через 1 час; K_1 - коэффициент, характеризующий скорость роста влагопотерь; K_2 - коэффициент, характеризующий замедление скорости роста влагопотерь во времени ($1 \leq \tau < 7$ час). Значения коэффициентов K_0 ($\ln K_0$), K_1 и K_2 в случае использования «Дофен» приведены в табл.1.

Таблица 1. Параметры К для составов с Дофеном

№	Код			Состав, %			Коэффициенты К			
	x_1	x_2	x_3	Д	ПК	КП	K_2	K_1	$\ln K_0$	K_0
Эталонные составы										
1	-1	-1	-1	0	0	0	-0,04	0,68	0,128	1,14
2	-1	+1	-1	0	40	0	0,11	0,46	-0,565	0,57
3	-1	0	0	0	20	5	-0,02	0,55	0,201	1,22
4	-1	-1	+1	0	0	10	-0,49	1,95	0,455	1,58
5	-1	+1	+1	0	40	10	-0,02	0,68	0,139	1,15
Модифицированные составы										
6	0	0	-1	0,4	20	0	0,14	0,36	0,004	1,00
7	0	-1	0	0,4	0	5	0,12	0,31	0,08	1,08
8	0	0	0	0,4	20	5	0,05	0,80	-0,680	0,51
9	0	+1	0	0,4	40	5	-0,22	1,45	-0,532	0,59
10	0	0	+1	0,4	20	10	-0,20	1,09	0,218	1,24
11	+1	-1	-1	0,8	0	0	-0,08	0,76	0,222	1,25
12	+1	+1	-1	0,8	40	0	-0,19	1,63	-0,898	0,41
13	+1	0	0	0,8	20	5	-0,22	1,39	-0,649	0,52
14	+1	-1	+1	0,8	0	10	0,01	0,62	-0,245	0,78
15	+1	+1	+1	0,8	40	10	-0,34	2,11	-1,079	0,34

Для всего диапазона исследуемых составов коэффициент K_0 изменяется от 0,13 до 1,58 (т.е. в 12,6 раз), коэффициент скорости влагопотерь K_1 - от 0,3 до 2,1 (практически в 7 раз), коэффициент «замедления» K_2 - от -0,49 до +0,22, что говорит о существенном влиянии состава раствора на кинетику влагопотерь. Для каждого из

коэффициентов из функции (1), обобщающей эмпирические кривые влагопотерь твердеющего раствора W_t , построен комплекс экспериментально статистических моделей, показывающих влияние трех факторов состава.

Так, зависимость влагопотерь через 1 час при $T = 50^\circ\text{C}$ для цементно-песчаного раствора, модифицированного Дофеном, при логарифмическом преобразовании (для повышения точности) с ошибкой $s_y = 0,167$ имеет вид:

$$K_0 = -0,26 - 0,30x_1 - 0,12x_1x_2 - 0,21x_1x_3 - 0,36x_2 - 0,13x_2^2 + 0,08x_2x_3 + 0,21x_3^2 \quad (2)$$

В силу достаточно сложного характера влагопереноса в рассматриваемой системе, анализ влияния факторов проведен на изоповерхностях ЭС-моделей. На рис.3а модель (1) отображена в виде изоповерхностей с равным шагом $K_0 = 0,5 \%$ с точкой максимума $K_{0,max} = 1,51$ ($x_1 = -1, x_2 = -0,60, x_3 = +1$) и точкой минимума $K_{0,min} = 0,52$ ($x_1 = +1, x_2 = +1, x_3 = +0,31$). При переходе к натуральным переменным, состав, минимизирующий начальные влагопотери, определяется как: СП=0,8 %, Пк=40 %, КП=6,2 %.

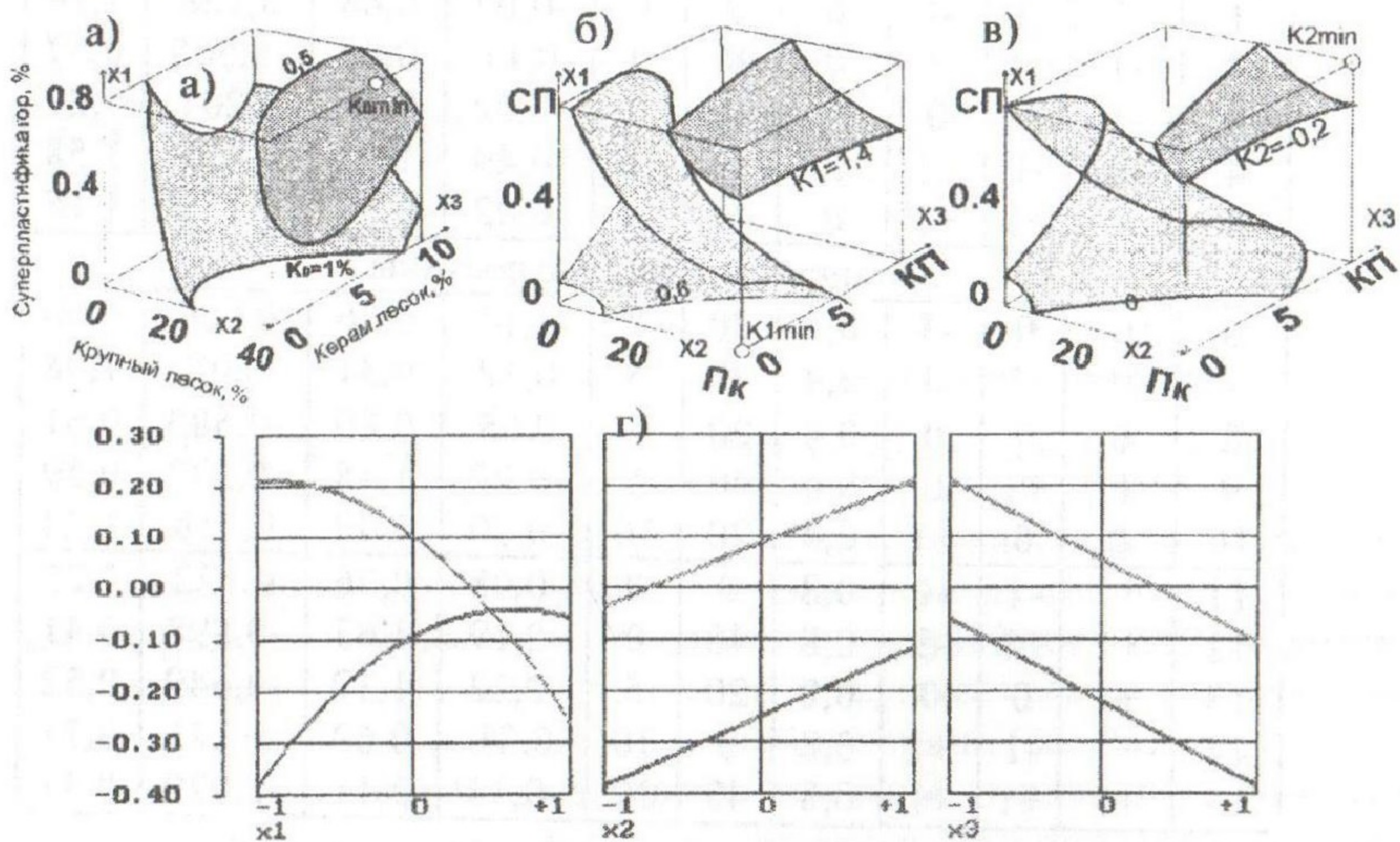


Рис.3. Изменение начальных влагопотерь K_0 (а), их скорости K_1 (б) и снижения темпа K_2 (в), а также параметра K_2 в зоне максимума и минимума W (г)

Следовательно, вооредуцирование смесей, повышение крупности кварцевого песка и введение в оптимальных количествах пористого приводит к уменьшению влагопотерь в начальный период структурообразования бетона (соответствующего началу схватывания цемента), что должно понизить вероятность усадочных явлений.

Однако скорость влагопотерь, судя по изменению коэффициента K_1 (рис.3.б), снижается только за счет уменьшения общего количества воды в результате редуцирующего действия суперпластификатора. При повышении количества пористого песка скорость влагопотерь несколько возрастает, что может свидетельствовать о постоянной подпитке цементной матрицы влагой из пористой структуры. Рост K_1 при увеличении доли крупного песка (рис.3в), вероятно, связан с тем, что крупный песок не может удерживать адсорбированную воду в той степени, как мелкий песок, обладающий более развитой поверхностью.

Однако именно пористый заполнитель замедляет во времени рост скорости влагопотерь - точка $K_{2.min} = -0,39$ определяется при $x_3 = -0,78$, т.е. КП=8,0 % (рис.3.3.в). Анализ модели K_2 в зоне максимума и минимума (рис.3.г) указал на особенности снижения влагопотерь. Так, модификатор позволяет замедлить рост скорости влагопотерь только в случае интенсивного испарения. Повышение количества плотного песка ускоряет процесс водоотдачи. Пористый песок в оптимальных количествах, при любом составе раствора замедляет скорость влагопотерь, вероятно, задерживая некоторое количество жидкой фазы в своей структуре.

Дополнительно исследовались прочностные свойства растворов в возрасте 28 суток нормального твердения. Так, модель прочности при изгибе, полученной при $s_3 = 0,7$, имеет вид:

$$R_{и} = 5,2 + 0,6x_1 + 0,8x_1^2 + \dots + 0,4x_1x_3 + 0,6x_2 + 0,4x_3 - 1,5x_3^2 \quad (3)$$

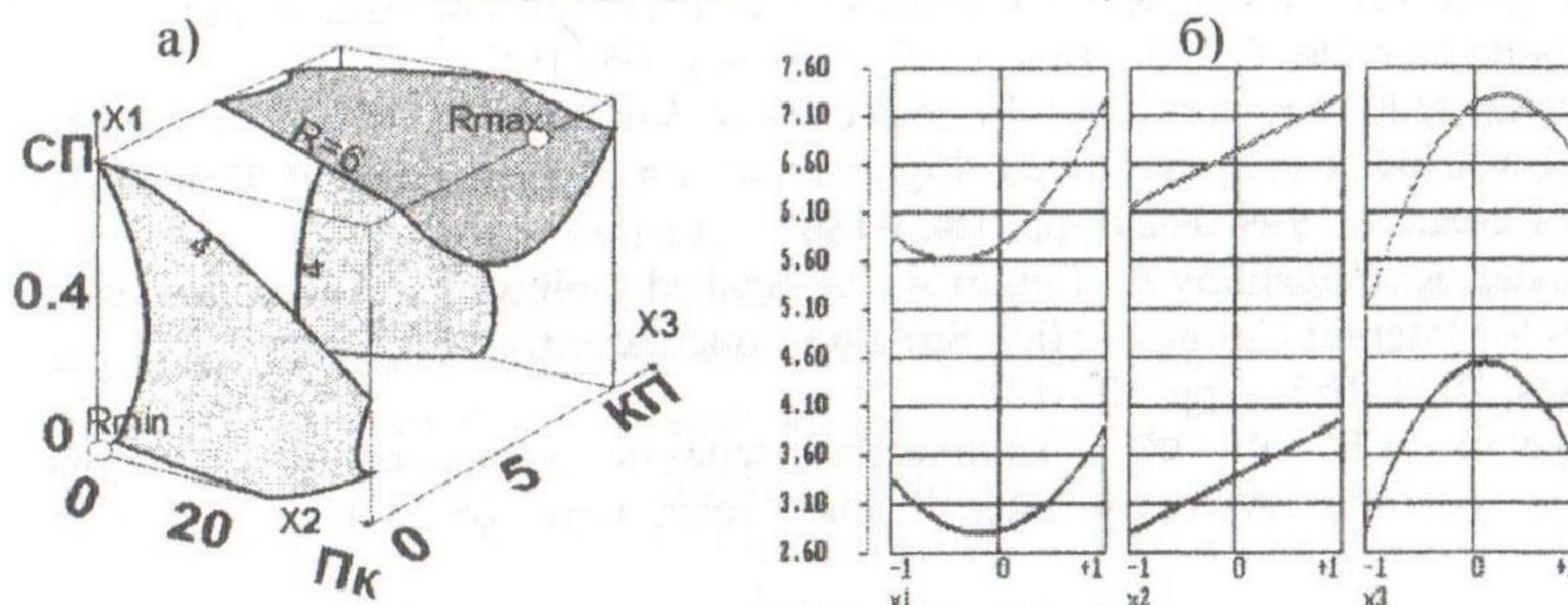


Рис.4. Изменение прочности при изгибе $R_{и}$ в факторном пространстве (а), а также под влиянием факторов в зоне максимума и минимума (г)

содержание пористого песка, позволяющее повысить прочность на растяжение при изгибе. Аналогичные данные получены и для прочности при сжатии. Причину этого факта можно искать и в постепенном распределении внутренней воды по объему цементной матрицы [2], что улучшает условия твердения бетона и уменьшает усадочные деформации, и в снижении внутренних напряжений за счет «работы» пористых дисперсных материалов как демпферных включений [4]. Как показывает анализ индивидуальных зависимостей (рис.4б), использование добавки и регулирование вида и состава песка позволяет повысить прочность на растяжение при изгибе цементно-песчаной матрицы бетона в 1,4...1,6 раза, а прочность при сжатии - на 30-40%

Выводы

Введение керамзитового песка в оптимальном количестве ведет к уменьшению влагопотерь и повышению прочности цементной матрицы бетона, что подтверждает положительную роль пористых частиц с точки зрения снижения внутрискруктурных напряжений и создания благоприятных условий влагообмена с окружающей средой. Уменьшение общего количества воды (без ухудшения свойств смесей) за счет введения суперпластификатора приводит к снижению влагопотерь твердеющего бетона. Повышение крупности песка также снижает влагопотери. Эти технологические приемы весьма эффективны с позиций воздействий на твердеющий бетон с позиций снижения влагопотерь и, соответственно, повышения трещиностойкости бетона монолитных конструкций.

Литература

1. Campbell R.H., Tobin, R.E. Core and Cylinder Strengths of Natural and Lightweight Concrete, ACI Journal, 1967, №64. -pp.190-195.
2. Bentz, D.P., Snyder, K.A., Protected Paste Volume in Concrete: Extension to Internal Curing Using Saturated Lightweight Fine Aggregate» // Cement & Concrete Research, 1999, №29. -pp. 1863-1867.
3. Kovler, K., Souslikov A., Bentur A. Pre-Soaked Lightweight Aggregates as Additives for Internal Curing of High Strength Concretes// Cement, Concrete & Aggregates, 2004, №26. -pp. 131-138.
4. Бабков В.В. Физико-механические аспекты оптимизации структуры цементных бетонов. Автореф. дисс... докт. техн. наук .05.23.05., Л., ЛИСИ, 1990. -43 с.