

# СУХИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ СМЕСИ

УДК 666.9.031: 517.8

Соха В.Г., доктор техн. наук, Лауреат Государственной премии в области науки и техники, генеральный директор «Хенкель-Баутехник Украина», г. Киев;

Карапузов Е.К., канд. техн. наук., лауреат государственной премии в области науки и техники, заместитель генерального директора по техническим вопросам «Хенкель-Баутехник Украина», г. Киев;

Ляшенко Т.В., доктор техн. наук, профессор, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса;

Крюковская С.А., аспирант, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса

## РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРЦЕМЕНТНЫХ РАСТВОРОВ С ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ ФИБРОЙ И VINNAPAS® 5014 F

Полимерцементные композиции с полимерной фиброй представляют основу сухих смесей для строительных растворов разного назначения [1–3], в частности, для наливных самовыравнивающихся покрытий. Соединение в смесях неорганических и полимерных связующих является существенным для обеспечения высокого качества материала. Органический компонент, как правило – диспергируемые полимерные порошки. Наиболее известные из них VINNAPAS® (фирмы WACKER POLYMERS [4]), соединяясь с цементом, образуют «идеальные» вяжущие системы, значительно улучшающие технологические свойства смесей, водоудерживающую способность, адгезию, когезию, прочность при изгибе и другие критерии качества затвердевших композитов.

Из множества других компонентов сухих смесей для устройства полов [2, 3, 5] в данной работе выделены неоднозначно влияющие на свойства композиций эфиры целлюлозы, необходимые для обеспечения водоудержания и снижения седиментации, а также полимерные волокна, которые вводят для уменьшения усадочных деформаций, повышения прочности, трещиностойкости и износостойкости.

Введение фибры, направленное на улучшение свойств затвердевшего материала, может, в то же время, препятствовать этому улучшению, ухудшая удобоукладываемость и другие свойства жидкой смеси. Для определения оптимального содержания фибры, зависящего от свойств матрицы, для рационального проектирования композиций того или иного назначения необходимы зависимости критериев поведения материала ( $Y$ ) от его рецептуры (вектора  $x$ ). В набор критериев должны входить и свойства готового материала, и реологические характеристики технологической смеси. Целесообразно (как показано, в частности, в работах [6–7] и косвенно декларируется комитетом RILEM 222-SCF “Simulation of fresh concrete flow”), чтобы среди последних были характеристики состояния структурированной жидкости, определяемые в прямых реологических измерениях, а также параметры соответствующих реологических уравнений.

Зависимости  $Y(x)$  могут быть получены в виде многофакторных экспериментально-статистических (ЭС) моделей [8–10]. Описывая рецептурные поля

критериев  $Y$  (в координатах состава  $x$ ), ЭС-модели позволяют [11–14] квантифицировать и анализировать индивидуальные и совместные эффекты компонентов, а также симулировать в вычислительных экспериментах уровни свойств множества композиций в исследуемом диапазоне для выявления и измерения связей между свойствами и поиска допустимых, оптимальных и компромиссно оптимальных рецептур.

В данной работе этот подход использован при исследовании реологического поведения и свойств полимерцементных композиций, составляющих основу сухих смесей для самовыравнивающихся полов. Исследовались составы, содержащие диспергируемый полимер Виннапас «нового поколения», соединяющий функции связующего и суперпластификатора. Фирма-производитель рекомендует это полимерное вяжущее, VINNAPAS® 5014 F (F – от Flow, класс продуктов с высокой растекаемостью без разжижителей), в том числе для машинной технологии подачи и наливки раствора.

**Эксперимент и модели.** Варьируемые в эксперименте 4 параметра состава (факторы  $X_i$ ) представлены в таблице 1; их значениям соответствуют уровни нормализованных факторов,  $|x_i| \leq 1$  [8–10]. Количество цемента и песка оставалось постоянным (соответственно 39 и 57 массовых частей в 100 м.ч. сухой смеси [5]). Следует отметить, что: пересчет дозировки  $V$  в проценты от массы сухой смеси дает диапазон

Таблица 1

Значения параметров состава в эксперименте

i	Фактор $X_i$	Уровни		
		$x_i = -1$	$x_i = 0$	$x_i = +1$
1	Количество VINNAPAS® 5014 F, V (% от массы цемента)	2,3	3,9	5,5
2	Молекулярная масса меилцеллюлозы, ММС (по вязкости водного раствора, мПа·с)	300	1500	3000
3	Дозировка метицеллюлозы, МС (% от массы цемента)	0,10	0,25	0,40
4	Содержание полипропиленовой фибры (3 мм), F (% от массы цемента)	0,2	0,6	1,0

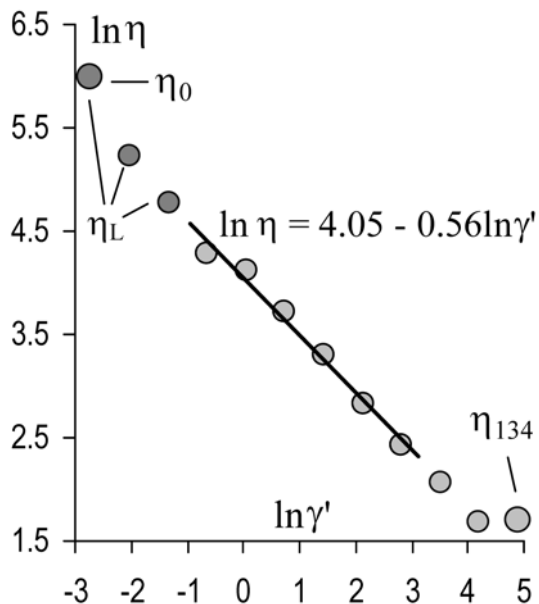


Рис. 1. Точки кривой вязкости для смеси в центре эксперимента

0.9–2.1%, накрывающий интервал достаточно низких дозировок (1–2%), рекомендуемых производителем; MMC = 1500 на самом деле соответствует  $x_2 = -0.11$ , но условно показано в таблице 1 как  $x_2 \approx 0$ .

Для 18 смесей, в соответствии с 4-факторным планом эксперимента 2-го порядка [15], прежде всего, подбиралось количество воды ( $W$ , м.ч. на 100 сухой смеси), обеспечивающее заданную растекаемость технологической смеси – 180 мм (согласно ДСТУ Б В.2.7-126:2006).

Для каждой из 18 смесей на ротационном вискозиметре (с коаксиальными цилиндрами) определена эффективная вязкость  $\eta_\gamma$  (Па · с) в диапазоне скорости сдвига  $\gamma' = 0.066-134.5 \text{ с}^{-1}$ . На рис. 1 показаны данные, полученные для композиции в центре эксперимента – при центральных значениях всех 4-х факторов. В диапазоне средних скоростей (0.52–16.81) кривые вязкости для каждой смеси адекватно описаны (средняя ошибка неадекватности около 10%) уравнениями (1) Отвальда-де Виля [16], где коэффициент  $K$  равен эффективной вязкости  $\eta_1$  (при  $\gamma' = 1$ ), и  $m < 0$  характеризует [11–12, 17] темп разрушения структурированной жидкости (чем больше  $|m|$ , тем менее устойчива структура).

$$\eta_\gamma = K \cdot (\gamma')^m, \quad \ln \eta_\gamma(\mathbf{x}) = \ln K(\mathbf{x}) + m(\mathbf{x}) \cdot \ln \gamma' \quad (1-2)$$

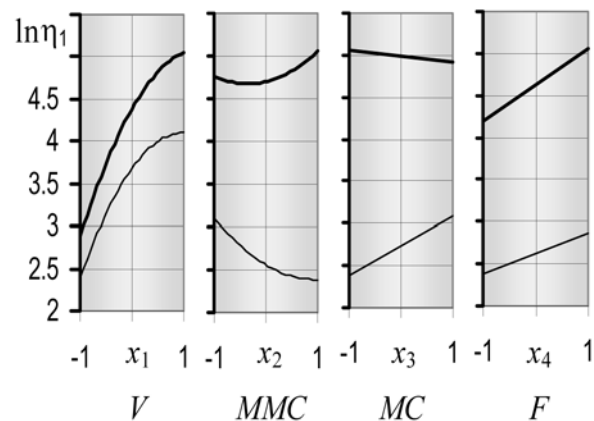


Рис. 2. Влияние параметров смеси на вязкость  $\eta_1$  в зонах минимума и максимума

Параметры тех или иных реологических уравнений, в частности,  $K$  и  $m$  в (1), характеризующие конкретную дисперсную систему с жидкой дисперсионной средой (смесь фиксированного состава), относят к так называемым «константам» физических моделей. В то же время, значения этих критериев реологического поведения технологической смеси зависят от ее состава, что отражено в логарифмической форме (2) уравнения (1). Среди других зависящих от  $\mathbf{x}$  реометрических критериев могут использоваться и некоторые числовые обобщающие показатели кривой вязкости. Это, в частности вязкости, показанные на рис. 1:  $\eta_0$  – при минимальной  $\gamma'$  (0.066),  $\eta_L$  – средняя для 3 нижних скоростей,  $\eta_{134}$  – при  $\gamma' = 134.5$ , возможно, близкая к вязкости жидкости с предельно разрушенной структурой [18].

С помощью ЭС-моделей «константы» могут быть описаны как функции состава и проанализированы с помощью вычислительных экспериментов на рецептурных полях этих критериев. Такое объединение моделей разной природы [19–20], «квази-фундаментальных» и экспериментально-статистических, может служить мостом между общими закономерностями и конкретными технологическими условиями при разработке конкретных материалов.

Значения  $K$  и  $m$  в (1) для 18 композиций позволили описать зависимости  $K(\mathbf{x})$  и  $m(\mathbf{x})$  в (2) нелинейными ЭС-моделями. Ниже приведена такая модель (3) для  $K = \eta_1$  (со значимыми эффектами при ошибке эксперимента 11% – ошибке оценки  $K$ ).

$$\ln \eta_1 = 4.06 + 0.70x_1 - 0.41x_1^2 + 0.25x_1x_2 - 0.05x_1x_3 + 0.11x_1x_4$$

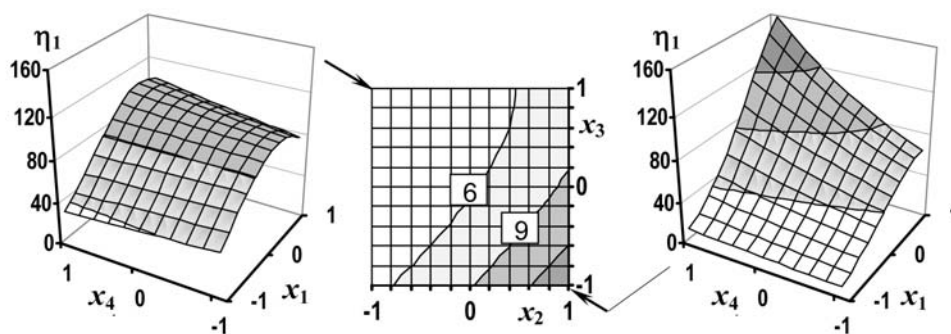


Рис. 3. Два локальных поля  $\eta_1(x_1, x_4)$  и относительный перепад  $\eta_1$  за счет  $V$  и  $F$  для разных MMC и MC – на квадрате  $\{x_2, x_3\}$

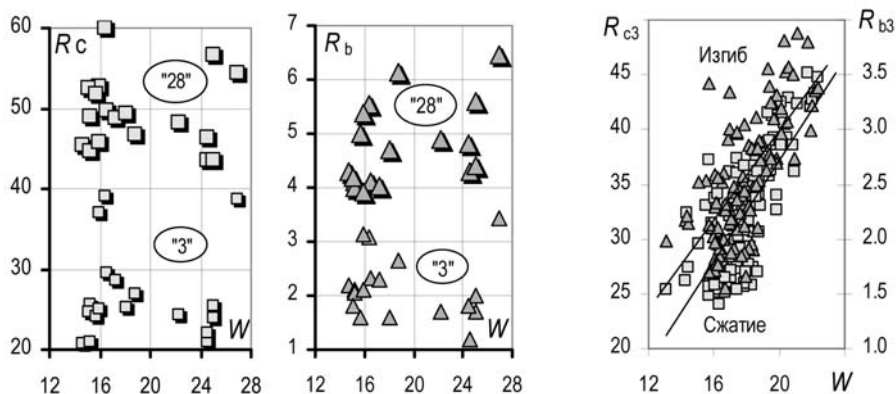


Рис. 4. Диаграммы рассеяния экспериментальных значений водопотребности и прочности и их значения для генерированных композиций при верхнем содержании VINNAPAS® (справа)

$$\begin{aligned}
 & - 0.09x_2 - 0.20x_2^2 \pm 0 x_2x_3 \pm 0 x_2x_4 \\
 & + 0.13x_3 \pm 0 x_3^2 - 0.16x_3x_4 \\
 & + 0.17x_4 \pm 0 x_4^2
 \end{aligned}$$

Уравнение (3) описывает рецептурное поле вязкости  $\eta_1$ , с минимальным уровнем  $\eta_{1,\min} = \exp(2.387) = 10.9$  (при  $x_1 = x_3 = x_4 = -1$ ,  $x_2 = 0.87$ ) и максимуме  $\eta_{1,\max} = 156.6$  Па·с ( $x_1 = x_2 = x_4 = +1$ ,  $x_3 = -1$ ). Однофакторные локальные поля  $\ln\eta_1$  на рис. 2, полученные подстановкой в (3) координат экстремумов, отражают влияние на эту характеристику отдельных параметров смеси.

Данные о других реометрических характеристиках, о водопотребности, о прочности при сжатии и изгибе через 3 и 28 суток твердения ( $R_{c3}$ ,  $R_{b3}$ ,  $R_{c28}$ ,  $R_{b28}$ , МПа), динамическом модуле упругости  $E$  (ГПа), водопоглощении и других свойствах для каждой из 18 композиций позволили описать рецептурные поля этих критериев качества материала аналогичными (3) ЭС-моделями.

**Реометрические характеристики.** Реологические свойства дисперсных систем [18], характеризующие формирующиеся структуры композитов в начале «рождения», в то же время определяют надежность технологии и затраты энергии. С учетом этого проанализировано влияние управляемых параметров смеси на указанные выше реометрические критерии.

Уравнение (2) с  $K(x)$  и  $m(x)$  в виде ЭС-моделей дает возможность оценить эффективную вязкость любой технологической смеси в исследуемом диапазоне для любой скорости сдвига в пределах аппроксимации Оствальда-Вилля. Модель (3) и кривые на рис. 2 пока-

зывают, что количество «вяжущего – суперпластификатора» более чем другие факторы увеличивает  $K = h_1$ . То же относится и к содержанию фибры в случае достаточно вязких смесей. Факторы метилцеллюлозы значимо изменяют степень влияния  $V$  и  $F$ , причем молекулярная масса и дозировка в противоположном направлении. Это видно на рис. 3, где показаны зависимости  $h_1$  от  $V$  и  $F$  при верхнем содержании «низкомолекулярной» метилцеллюлозы ( $x_2 = -1$ ,  $x_3 = +1$ ) и наоборот ( $x_2 = +1$ ,  $x_3 = -1$ ).

Влияние Виннапаса наиболее весомо и для других реометрических характеристик:  $h_0$  и  $h_L$  (тесно коррелированных),  $h_{123}$ ,  $|m|$ . Для этих критериев можно отметить следующее:

- $|m|_{\min} = 0.42$ ,  $|m|_{\max} = 0.73$ , рост  $|m|$  (а следовательно, большее падение  $\eta_1$ ) с увеличением  $F$  до 0.85–0.9% ( $x_4 = 0.69$ ), неоднозначное влияние метилцеллюлозы;
- $h_{0,\min} = 99.6$ ,  $h_{L,\min} = 63.8$ ,  $h_{0,\max} = 927$ ,  $h_{L,\max} = 619$  Па·с, неоднозначное влияние ММС и МС, заметное увеличение  $h_L$  с увеличением  $F$  в зоне максимума;
- при высокой скорости сдвига дозировка МС не оказывает влияние на вязкость смеси, в частности на  $h_{134}$ , которая заметно падает при увеличении молекулярной массы; в вязких смесях снижению вязкости при повышенных  $\dot{\gamma}$  может способствовать увеличение содержания фибры.

**Прочность.** Участие полимерного вяжущего со свойствами суперпластификатора приводит, судя по экспериментальным данным, показанным на рис. 4, к отсутствию отрицательной статистической связи

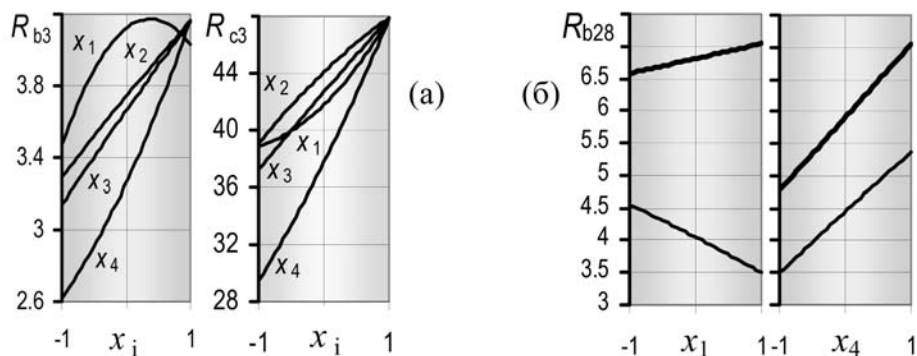


Рис. 5. Однофакторные зависимости в зонах максимумов ранней прочности (а), в зонах максимума и минимума 28-дневной прочности при изгибе (б)

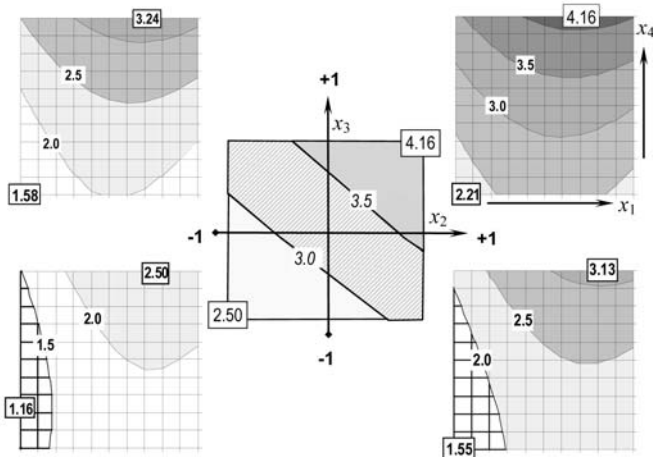


Рис. 6. Поля  $R_{b3}$  в координатах  $V$  и  $F$  (т.е.  $x_1, x_4$ ) для 4 комбинаций ММС и МС ( $x_2, x_3 = \pm 1$ ) и максимум  $R_{b3}(x_1, x_4)$  в зависимости от  $x_2, x_3$

прочности с водопотребностью, характерной для цементных композитов.

Более того, по оценкам  $W$  и  $R$ , полученным для генерированных композиций в вычислительном эксперименте (с помощью ЭС-моделей и алгоритма, описанного в частности в [11–13]), корреляция  $R$  с  $W$  становится значимо положительной при верхних дозировках полимерного вяжущего – суперпластификатора (рис. 4, справа). Очевидно, для этих соотношений компонентов увеличение количества воды приводит к улучшению условий гидратации.

Положительная корреляция ранней прочности при сжатии и изгибе (коэффициент корреляции  $r\{R_{c3}, R_{b3}\} = 0.86$  значим при риске менее 1%), естественно, сохраняется и после 28 суток ( $r\{R_{c28}, R_{b28}\} = 0.55$ ). Некоторая потеря тесноты связи отражает изменения распределения напряжений в зрелой структуре затвердевшего раствора. Об этом свидетельствует и разница в оценках автокорреляции  $R_c$  и  $R_b$ :  $r\{R_{c3}, R_{c28}\} = 0.73$ ,  $r\{R_{b3}, R_{b28}\} = 0.54$ .

Построенные по данным о прочности 18 композиций ЭС-модели позволили оценить обобщающие показатели рецептурных полей прочностных критериев, в частности, определить следующие максимальные и минимальные уровни:  $R_{b3,max} = 4.2$  (при  $x_1 = 0.40, x_2 = x_3 = x_4 = +1$ ),  $R_{b28,max} = 7.0$  МПа ( $x_1 = x_4 = +1, x_2 = 0.53, x_3 = 0.84$ );  $R_{c3,max} = 47.9$  ( $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = +1$ ),  $R_{c28,max} = 60.8$  МПа ( $x_1 = x_3 = x_4 = +1, x_2 = -0.48$ ).

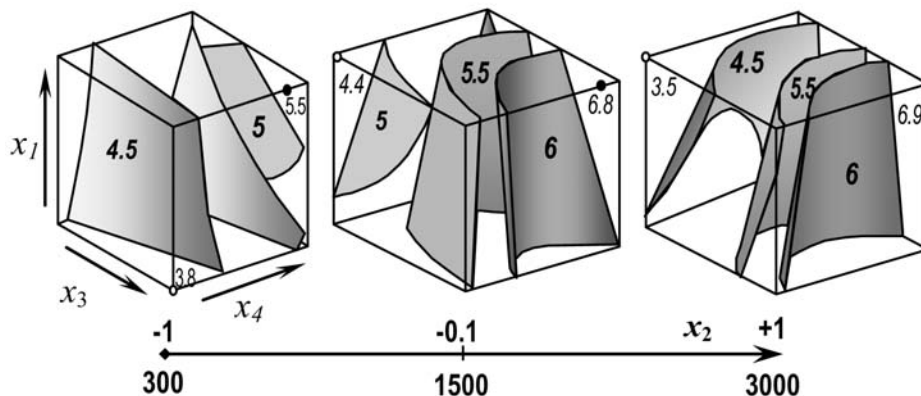


Рис. 7. Поля  $R_{b28}(x_1, x_3, x_4)$  для композиций с метилцеллюлозой разных молекулярных масс

Кривые на рис. 5, представляющие индивидуальное влияние факторов состава на прочность растворов, подтверждают существенную роль полимерного вяжущего в формировании структуры композита и безусловный положительный эффект фиброармирования. Следует отметить, что  $R_{b3,max}$  достигается не на верхней границе  $V$  (как для  $R_{c3,max}$ , при  $x_1 = +1$ ), а при более низком содержании полимерного порошка ( $x_1 = 0.4–0.65$ ), и дальнейшее увеличение  $V$  не имеет смысла.

Диаграммы «квадраты на квадрате» и «кубы на отрезке» (рис. 6–7) иллюстрируют взаимное влияние факторов на прочность при изгибе – связанный с трещиностойкостью, существенный для покрытий критерий, особенно в раннем возрасте.

«Качество» и количество метилцеллюлозы (ММС и МС) изменяет значение  $R_{b3,max}$ , обеспечиваемое  $V$  и  $F$  (рис. 6). Чувствительность  $R_{b3}$  к изменениям факторов метилцеллюлозы ( $4.2 / 2.5 \approx 1.7$ ) практически та же, что и для  $R_{c3}$ . По моделям трехдневных прочностей оценена эффективность фиброармирования для определенных ММС и МС – как отношение (4) максимальной прочности на квадрате  $\{x_1, x_4\}$  к уровню прочности при  $x_1$  (т.е.  $V$ ), соответствующем максимуму, но при минимальном  $x_4$  (количестве фибры). Значения эффективности фибры, в диапазоне 1.3–1.65, для ранней прочности оказываются тем больше, чем больше концентрация метилцеллюлозы.

$$EF = R_{\max}\{x_1, x_4\} / R(x_{1,max}, x_4 = -1) \quad (4)$$

Диаграммы на рис. 7 демонстрируют возможности обеспечить требуемую прочность при изгибе через 28 суток за счет соответствующих  $V$ , МС и  $F$  для трех разных эфиров целлюлозы. Видно, что переход от «легкой» к более «тяжелой» метилцеллюлозе изменяет направление градиента поля  $R_{b28}(x_1, x_3, x_4)$  и характер изоповерхностей.

**Динамический модуль упругости.** Рецептурное поле модуля упругости имеет максимальный уровень  $E_{\max} = 27$  ГПа при верхнем значении  $V$  и нижних значениях трех других факторов. Минимум  $E_{\min} = 14.5$  ГПа соответствует минимальным дозировкам компонентов и наибольшей ММС. Прирост  $E$  в области 4-х факторов около 100%, в основном за счет Виннапас, но с учетом количества и молекулярной массы метилцеллюлозы.

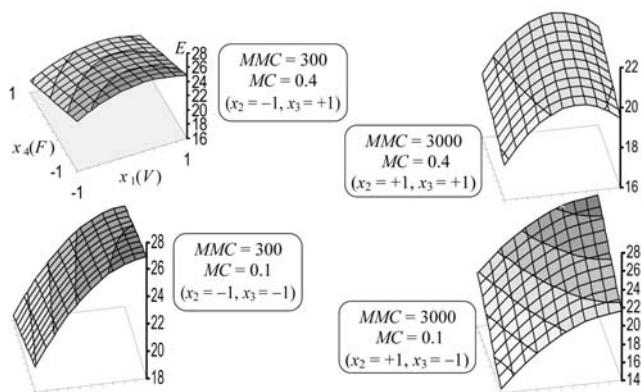


Рис. 8. Локальные поля модуля упругости в координатах  $V$  и  $F$  при двух дозировках метилцеллюлозы двух молекулярных масс

Это отражают диаграммы на рис. 8. Очевидно, что  $MC$  и  $MMC$  определяют условия формирования структуры матрицы, каркаса «фибра-песок», межфазных слоев. Именно факторы метилцеллюлозы обуславливают то или иное влияние короткой фибры на формирование структуры композита. Наименее благоприятной при формировании упругих свойств оказывается смесь с повышенным содержанием эфира целлюлозы повышенной молекулярной массы.

Экспериментальные значения  $E$  и  $R$  для 18 составов не указывают на наличие значимой связи характеристик прочности с  $E$ . Однако возможно, что эти данные представляют разные совокупности (свойства существенно разных композиций). Анализ и сепарация различных условий структурообразования могут дать основания для возможного прогнозирования  $R$  по  $E$ . Выявить наличие корреляции и существенные различия в связях прочности и модуля упругости в разных рецептурных зонах и охарактеризовать разные возможности прогноза  $R$  по  $E$  для разных рецептурных условий позволяют статистические испытания на соответствующих локальных полях свойств [11-13]. Парные выборки любого объема, необходимые для подобного анализа и для построения прогностических уравнений симулируются с помощью ЭС-моделей.

Так диаграммы на рис. 9 представляют по 100 пар значений  $(R_{b3}, E)$ ,  $(R_{b28}, E)$ ,  $(R_{c28}, E)$  для 100 генерированных композиций с разным содержанием VINNAPAS® 5014 F (во всем диапазоне  $2.3 \leq V \leq 5.5\%$ ,  $-1 \leq x_1 \leq +1$ ), при одинаковом минимальном содержании «низкомолекулярной» метилцеллюлозы и максимальном количестве фибры ( $x_2 = x_3 = -1$ ,  $x_4 = +1$ ). Помимо показанных тенденций, следует отметить значимую отрицательную линейную связь  $E$  с ранней прочностью при вариации  $F$  в составах с «низкими»  $MMC$  и  $MC$ . Полученные значения коэффициентов детерминации указали на возможность построения тарировочных зависимостей разного вида и с разными параметрами для определенных групп смесей.

Компромиссно оптимальные композиции. Ниже представлены решения двух вариантов многокритериальной задачи оптимизации при проектировании «легко текущих» смесей для устройства полов. Следовало максимизировать раннюю прочность раствора при изгибе  $R_{b3}(x)$  и минимизировать вязкость смеси

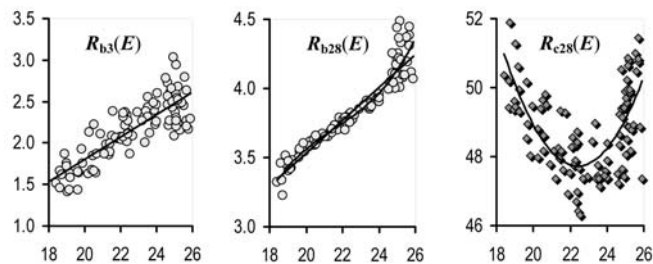


Рис. 9. Диаграммы рассеяния результатов вычислительного эксперимента при  $MMC = 300$ ,  $MC = 0.1\%$ ,  $F = 1\%$

при самой низкой скорости сдвига  $\eta_0(x)$ . При этом должны быть выполнены требования по прочности в 28 суток и вязкости при средних скоростях сдвига.

В первой задаче эти требования сформулированы следующим образом:  $R_{c28}(x) \leq 35$  МПа,  $R_{b28}(x) \leq 6$  МПа,  $30 \leq \eta_1(x) \leq 90$  Па·с.

Для того, чтобы получаемое решение гарантировало выполнение требований, к специфицированным уровням регламентируемых свойств добавлены (со знаком + или -) значения, учитывающие ошибку соответствующей модели. Требование, заданное таким «гарантирующим» уровнем [11, 13, 14], становится более жестким. В данной задаче ограничивающие значения стали равны:  $R_{c28} = 37.89$  (все составы имеют более высокую прочность на сжатие),  $R_{b28} = 6.48$ ,  $\eta_1$  от 35.42 до 76.23.

Очевидно, что должен быть найден компромисс между  $R_{b3,max}$  и  $\eta_{0,min}$ , поскольку наиболее «мощные» факторы  $V$  и  $F$  повышают и прочность, и вязкость. Для поиска компромисса использовано итерационное случайное сканирование рецептурных полей свойств [14]. На каждой итерации сначала определяется область допустимых составов, затем используется пошаговая процедура, сужающая диапазоны компромисса.

В данной задаче получены следующие результаты:

- дозировка Виннапас  $V = 2.4\%$  (по массе цемента,  $x_1 = -0.56$ );
- молекулярная масса метилцеллюлозы  $MMC = 3000$  ( $x_2 = +1$ );
- дозировка метилцеллюлозы  $MC = 0.4\%$  ( $x_3 = +1$ );
- количество фибры  $F = 1\%$  ( $x_4 = +1$ );
- $R_{b3} = 3.8$ ,  $R_{b28} = 6.6$ ,  $R_{c28} = 51.7$  МПа,  $\eta_0 = 363$ ,  $\eta_1 = 37$  Па·с.

Следует отметить, что оптимальное содержание полимера находится вблизи нижней границы рекомендаций WAKER POLYMERS.

Тем же способом найдено решение второй задачи, где требовалась большая прочность и не столь низкая вязкость:  $R_{c28} \geq 40$  МПа,  $R_{b28} \geq 6.5$  МПа,  $60 \leq \eta_1 \leq 150$  Па·с. Поиск компромисса привел к решению с верхними значениями всех факторов ( $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = +1$ ):  $V = 5.2\%$ ,  $MMC = 3000$ ,  $MC = 0.4\%$ ,  $F = 1\%$ . Значения критериев следующие:  $R_{b3} = 4.0$ ,  $R_{b28} = 6.9$ ,  $R_{c28} = 55.5$  МПа,  $\eta_0 = 600$ ,  $\eta_1 = 134$  Па·с.

**Заключение.** Экспериментально-статистические модели и вычислительные эксперименты позволили охарактеризовать и проанализировать влияние состава фиброполимерцементных композиций на кривые вязкости смесей, свойства затвердевшего раствора,

корреляционные связи свойств. Существенное влияние фибры и диспергируемого полимера, обладающего свойствами вяжущего и высокоэффективной пластифицирующей добавки, заметно меняется в зависимости от количества и молекулярной массы метилцеллюлозы. С помощью итерационного случайного сканирования рецептурных полей свойств найдены составы, обеспечивающие оптимальный компромисс между вязкостью смеси и максимальной ранней прочностью раствора, при выполнении требований к другим характеристикам материала.

#### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Dry Building Mixes Market Research. – Merchant Research and Consulting Ltd., Oct. 2010. – 474 p.
2. Карапузов Е.К., Лутц Г., Герольд Х., Толмачев Л.Г., Спектор Ю.П. Сухие строительные смеси. – Киев: Техніка, 2000. – 225 с.
3. Рунова Р.Ф., Носовський Ю.Л. Технологія модифікованих будівельних розчинів. – Київ, 2007. – 256 с.
4. WAKER POLYMERS VINNAPAS®. Product Overview 2010. Polymer Binders for the European Construction Industry. – 26 p.
5. Соха В.Г. Фіброполімерцементні суміші для улаштування високоміцних покриттів промислових підлог. – автореф. дис. к.т.н.: 05.23.05 / ОДАБА. – Одеса, 2005. – 20 с.
6. Wallevik O.H. Rheology – a new dimension in concrete technology // Proc.Int.Conf. “16 ibausil “. – Weimar: Bauhaus – Universitat, 2006. – P. 2-1417-1430.
7. Kuder K., Ozyurt N., Mu E., Shah S. Rheology of fiber-reinforced cement systems using a custom built rheometer // Proc.Int.Symp. “Brittle Matrix Composites 8”. Cambridge and Warsaw: Woodhead Publ. Ltd. and ZTUREK RSI, 2006. – P. 431-439.
8. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ. – К.: Выща школа, 1989. – 328 с.
9. ЭВМ и оптимизация композиционных материалов / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Я. Иванов, И. Николов. – К.: Будивэльнык, 1989. – 240 с.
10. Методические рекомендации по применению экспериментально-статистических моделей для анализа и оптимизации состава, технологии и свойств композиционных материалов на основе щелочных вяжущих систем / Науч. ред. В.А. Вознесенский, П.В. Кривенко. – ОГАСА, НИИВМ им. В.Д. Глуховского. – К., 1996. – 105 с.
11. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. ЭС-модели в компьютерном строительном материаловедении. – Одесса: Астропринт, 2006. – 116 с.
12. Ляшенко Т.В., Вознесенский В.А. Методы компьютерного материаловедения при анализе взаимосвязи реологических показателей композиций // Вісник Дон. ДАБА. Композиційні матеріали для будівництва. – Макіївка: Дон. ДАБА. – 2001. – Вип. 2001-1(26). – С. 67–74.
13. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. Рецептурно-технологические поля свойств материала в компьютерном строительном материаловедении // Строительные материалы. – 2006. – №3 – Приложение: Наука №7. – С. 8–11.
14. Элементы компьютерного материаловедения при поиске составов сухих смесей для фиброполимерцементных композитов с компромиссными уровнями прочности и усадки / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, В.Г. Соха, Е.К. Карапузов – Строительные материалы и конструкции. – 2004. – №4. – С.16–19.
15. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей / Ред. В.В. Налимов. – М.: Металлургия, 1982. – 752 с.
16. Шрам Г. Основы практической реологии и реометрии. – М.: КолосС, 2003. – 312 с.
17. Voznesensky V., Lyashenko T., Lapina O., Karapuzov E., Transformation of viscosity function in mixture space of polymer containing composition // Abstracts 8<sup>th</sup> Int.Conf. on Mechanics and Technology of Composite Materials. – Sofia, Bulgarian Academy of Sciences, 1997. – P. 76–77.
18. Урьев Н.Б., Иванов Я.П. Структурообразование и реология неорганических дисперсных систем и материалов. – София: БАН, 1991. – 210 с.
19. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. Проблема построения комплексов математических моделей различной генерации для оптимизации высококачественных материалов в компьютерном материаловедении // Рациональный эксперимент в материаловедении: Мат-лы междунар. сем. МОК’39. – Одесса, Астропринт, 2000. – С. 5–7.
20. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. ЭС-модели «КОНСТАНТ» квазифундаментальных моделей в компьютерном строительном материаловедении // Науковий вісник будівництва. – Харків, ХДТУБА, 2007. – Вип. 42. – С. 39–45.