

УДК 691.32; 691.328

*А. А. Зиновьев\*, Н. В. Дворянинова*

**ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ТЕХНОЛОГИИ  
КЛАДОЧНЫХ РАСТВОРОВ С ДОБАВКАМИ ИЗ МЕСТНОГО  
ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ**

*Приведены результаты исследований по математическому моделированию основных технологических и эксплуатационных свойств кладочных растворов при совместном введении добавок из местного техногенного сырья (микрокремнезем и омыленный талловый пек). Использование полученных зависимостей позволит проводить оптимизацию составов растворов с исследованными добавками при условии обеспечения требуемых характеристик.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, растворные смеси, кладочные растворы, совместное введение добавок, микрокремнезем, омыленный талловый пек.

В настоящее время приоритетное развитие в строительстве получает жилищ-

ное, в том числе индивидуальное строительство. Основным стеновым материа-

---

\* - автор, с которым следует вести переписку.

лом для ограждающих конструкций жилых зданий являются штучные конструкционно-теплоизоляционные и теплоизоляционные изделия (кирпичи и камни керамические, блоки бетонные с плотной и пористой структурой). По оценке Минрегионразвития России, при подъеме строительного комплекса после кризиса и необходимости ежегодного увеличения жилой площади на  $1 \text{ м}^2$  на каждого гражданина России потребуются увеличение ввода общего количества жилой площади на 20-25 %, что приведет к существенному росту потребности в мелкоштучных стеновых изделиях и клеющих материалах (цементно-песчаных растворах). Потребность в стеновых материалах в 2010 г. достигнет 27-28 млрд. штук условного кирпича, а объемы производства кладочных цементных растворов увеличатся до 17 млн.  $\text{м}^3$  в год [1].

С 2010 г., в рамках законов о техническом регулировании и саморегулировании, а также Технического регламента «О безопасности зданий и сооружений», на объектах капитального строительства необходимо особое внимание к обеспечению безопасности и качества. Применительно к технологии кладочных работ, потребуются стабильное обеспечение проектных характеристик материалов и конструкций, качество проведения строительных процессов при кладке стен из штучных стеновых материалов и надежность объектов строительства в целом [2]. При этом огромная роль в обеспечении качества каменной конструкции отводится кладочным растворам [3].

Ранее в работах [4, 5] было показано, что одним из наиболее эффективных методов управления параметрами качества строительных растворов в процессе приготовления смесей является совместное введение добавок (СВД) из местного техногенного сырья – тонкодисперсного микрокремнезема (МК) ООО «Братский завод ферросплавов» в качестве уплотняюще-упрочняющей добавки и воздухововлекающей добавки из попутных продуктов сульфатной переработки древеси-

ны, получаемых на одном из заводов филиала Группы «Илим» в г. Братске – омыленного таллового пека (ОТП).

Достоверно установлено, что СВД МК и ОТП при их содержании 10...20 % и 0,04 % от массы цемента (в пересчете на сухое вещество) соответственно является инновационным приемом приготовления высокоэффективных кладочных растворов смесей с улучшенными технологическими свойствами (высокая водоудерживающая способность, хорошая пластичность при разравнивании, нерасслаиваемость при транспортировании и др.), позволяющим стабильно и надежно формировать проектные эксплуатационные параметры растворов (требуемая марочная прочность, однородность структуры, высокие высоло- и морозостойкость, низкая теплопроводность и др.) [6].

Для эффективного управления свойствами растворов смесей и растворов при СВД МК и ОТП необходимо установить основные закономерности, описывающие их изменение в зависимости от принятой рецептуры.

С целью изучения влияния цементно-песчаного отношения (Ц/П) и расхода воды затворения (В) на основные свойства растворов смесей и растворов при СВД МК и ОТП была проведена серия экспериментов с применением методов математического планирования. Изучение зависимостей основных физико-механических характеристик цементных кладочных растворов при СВД МК и ОТП от Ц/П и В важно при установлении пределов возможного варьирования показателей их основных технологических и эксплуатационных свойств, таких, как удобоукладываемость смесей в зависимости от основного назначения, средняя плотность и прочность раствора – показателей, от которых зависят прочность и долговечность каменной конструкции в целом.

В качестве объектов исследований были использованы растворные смеси и растворы при СВД (18 % МК + 0,04 % ОТП от массы цемента). При этом при-

менялся 7 % водный раствор органической добавки ОТП. В качестве варьируемых факторов использовались соотношение «Цемент: (П + МК)» (при условии замещения части песка соответствующей частью МК ( $x_1$ )) и расход воды ( $x_2$ ) для затворения растворов смесей (табл. 1).

В качестве откликов рассматривались следующие качественные показатели растворов смесей: подвижность ( $y_1$ ) и плотность ( $y_2$ ); затвердевших растворов – средняя плотность ( $y_3$ ), пределы прочности при изгибе ( $y_4$ ) и при сжатии ( $y_5$ ).

Показатели основных свойств растворов смесей и растворов определялись по соответствующим методикам ГОСТ 5802-86.

Таблица 1

Уровни и факторы варьирования

Уровни варьирования	Варьируемые факторы	
	Соотношение	$V/T$
	$x_1$	$x_2$
нижний (-1)	1:3	0,15
средний (0)	1:4	0,19
верхний (+1)	1:5	0,23

**Примечание.**  $V/T$  – водотвердое отношение как показатель расхода воды для составов растворов

Двухфакторный математический план и результаты проведенного эксперимента представлены в табл. 2.

С целью получения математических зависимостей рассматриваемых откликов от варьируемых факторов полученные экспериментальные данные были обработаны в программе «STADIA 7.0».

При выборе уравнений регрессии использовался принцип расчетов, начиная от сложных полиномиальных уравнений вида

$$Y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_m \cdot x_m,$$

где  $a_i$  – коэффициенты полинома,  $x_i$  – варьируемые факторы,  $m$  – их количество, включающих линейные, перекрестные и квадратичные члены, при условии оценки значимости их коэффициентов, к более простым – после исключения всех статистически незначимых членов. Данный цикл операций проводился до тех пор, пока не были получены адекватные регрессионные уравнения, все факторы которых являлись значимыми. Статистические характеристики параметров уравнений регрессии приведены в табл. 3.

Оценка статистической значимости коэффициентов регрессии проводилась по t-критерию Стьюдента при доверительной вероятности 0,95. Оценка качества уравнений регрессии – по коэффициентам множественной корреляции и детерминации, статистике Фишера и уровню значимости.

Таблица 2

Двухфакторный математический план и результаты эксперимента

Значения переменных				$V^*/C$	Результаты испытаний:				
Кодированные		Патуральные			растворных смесей		растворов		
Ц	$V/T$	Ц	$V/T$		подвижность, см	плотность, кг/м <sup>3</sup>	средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	предел прочности, МПа	
П+МК		П+МК		при изгибе				при сжатии	
$x_1$	$x_2$	$x_1$	$x_2$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	
-1	+1	1:3	0,23	0,96	11,7 / 7,1	1948 / 3,6	1938 / 1,2	5,1 / 3,5	15,8 / 0,3
+1	+1	1:5		1,36	12,3 / 5,3	1905 / 1,9	1897 / 1,1	2,9 / 4,3	8,5 / 0,8
-1	-1	1:3	0,15	0,61	3,2 / 0,3	2052 / 2,2	2028 / 1,4	7,3 / 2,8	25,8 / 2,2
+1	-1	1:5		0,86	4,2 / 0,6	2008 / 2,5	1997 / 0,8	4,9 / 3,4	17,2 / 6,4
0	0	1:4	0,19	0,98	9,2 / 3,3	1962 / 3,1	1953 / 0,9	4,6 / 5,3	14,6 / 11,4
+1	0	1:5		1,11	9,0 / 3,1	1945 / 2,6	1937 / 1,1	3,9 / 2,5	11,3 / 1,2
-1	0	1:3		0,78	8,2 / 1,4	1993 / 2,5	1972 / 1,3	6,4 / 1,6	20,6 / 10,4
0	+1	1:4	0,23	1,19	12,0 / 4,8	1938 / 2,8	1923 / 0,9	3,7 / 2,7	11,5 / 1,8
0	-1	1:4	0,15	0,76	4,5 / 0,5	2019 / 2,6	2015 / 1,2	6,1 / 1,8	21,1 / 2,1

Примечания.

- 1) В графе «Результаты испытаний» над чертой приведены средние значения показателей свойств растворных смесей и растворов при СВД, под чертой – коэффициент вариации.
- 2) \* - с учетом расхода водного раствора ОТП.

Таблица 3

Статистические характеристики параметров уравнений регрессии

Завис. перемен.	Вид уравнения регрессии	Y, X <sub>i</sub>	Y <sub>min</sub> X <sub>min</sub>	Y <sub>max</sub> X <sub>max</sub>	Y <sub>ср</sub> X <sub>ср</sub>	V <sub>y</sub>	a <sub>i</sub>	t	a <sub>i</sub> ±Δa	Y <sub>ср</sub> ±Δy	R	R <sup>2</sup>	S <sub>ур</sub>	F	α
S	Y=a <sub>0</sub> +∑a <sub>i</sub> X <sub>i</sub>	Y	3,2	12,3	8,26	42,7	a <sub>0</sub> =8,8	40,5	9,3±8,3	7,4≤Y <sub>ij</sub> ≤9,1	0,997	0,998	0,376 4,55	234	0,0002
		X <sub>1</sub>	1:3	1:5	1:4	-	a <sub>1</sub> =0,4	2,6	0,8±0,04	-					
		X <sub>2</sub>	β <sub>1</sub> =-0,15	β <sub>1</sub> =0,23	β <sub>1</sub> =0,19	-	a <sub>2</sub> =4,02	26,2	4,4±3,6	-					
ρ <sub>см</sub>	Y=a <sub>0</sub> +∑a <sub>i</sub> X <sub>i</sub>	Y	1905	2052	1974	2,36	a <sub>0</sub> =1974	661,5	1981±1967	1954≤Y <sub>ij</sub> ≤1995	0,986	0,972	8,951 0,45	105	0,0002
		X <sub>1</sub>	1:3	1:5	1:4	-	a <sub>1</sub> =22,5	6,2	-14,1±30,9	-					
		X <sub>2</sub>	β <sub>1</sub> =-0,15	β <sub>1</sub> =0,23	β <sub>1</sub> =0,19	-	a <sub>2</sub> =48,0	13,1	-38,6±56,4	-					
ρ	Y=a <sub>0</sub> +∑a <sub>i</sub> X <sub>i</sub> +a <sub>2</sub> X <sub>i</sub> <sup>2</sup>	Y	1897	2028	1962	2,24	a <sub>0</sub> =1954	1058	1958±1950	1955≤Y <sub>ij</sub> ≤1970	0,998	0,997	3,2 0,16	504	0,0001
		X <sub>1</sub>	1:3	1:5	1:4	-	a <sub>1</sub> =-17,8	13,6	-14,8±20,8	-					
		X <sub>2</sub>	β <sub>1</sub> =-0,15	β <sub>1</sub> =0,23	β <sub>1</sub> =0,19	-	a <sub>2</sub> =-47,0	36,0	-44,±50	-					
R <sub>изг</sub>	Y=a <sub>0</sub> +∑a <sub>i</sub> X <sub>i</sub>	Y	2,0	7,3	4,99	28,3	a <sub>0</sub> =4,99	68,4	5,2±4,8	4,5≤Y <sub>ij</sub> ≤5,5	0,991	0,982	0,219 4,38	164	9,9·10 <sup>-5</sup>
		X <sub>1</sub>	1:3	1:5	1:4	-	a <sub>1</sub> =1,18	14,2	-0,98±1,4	-					
		X <sub>2</sub>	β <sub>1</sub> =-0,15	β <sub>1</sub> =0,23	β <sub>1</sub> =0,19	-	a <sub>2</sub> =-1,1	12,3	-0,8±1,3	-					
R <sub>сж</sub>	Y=a <sub>0</sub> +∑a <sub>i</sub> X <sub>i</sub>	Y	8,5	25,8	16,3	34,0	a <sub>0</sub> =16,27	52,1	17,0±15,6	14,1≤Y <sub>ij</sub> ≤18,4	0,989	0,978	0,938 5,76	136	0,0001
		X <sub>1</sub>	1:3	1:5	1:4	-	a <sub>1</sub> =4,2	11,0	-5,1±3,3	-					
		X <sub>2</sub>	β <sub>1</sub> =-0,15	β <sub>1</sub> =0,23	β <sub>1</sub> =0,19	-	a <sub>2</sub> =-4,72	12,3	-5,6±3,8	-					

**Условные обозначения.** S, ρ<sub>см</sub> – показатели технологических свойств растворных смесей, соответственно, подвижность, см и плотность, кг/м<sup>3</sup>; ρ, R<sub>изг</sub>, R<sub>сж</sub> – показатели эксплуатационных свойств растворов, соответственно, средняя плотность, кг/м<sup>3</sup>, пределы прочности при изгибе и сжатии, МПа; n – объем выборки; X<sub>min</sub>, X<sub>max</sub> – диапазоны изменения факторов; Y<sub>ср</sub>, X<sub>ср</sub> – средние арифметические значения Y и X<sub>i</sub>; V<sub>y</sub> – коэффициент вариации значений Y, %; a<sub>i</sub> – коэффициенты регрессии; t – фактические значения t-критерия Стьюдента для коэффициентов a<sub>i</sub>; a<sub>i</sub>±Δa – доверительные интервалы коэффициентов регрессии при доверительной вероятности P=0,95; Y<sub>ср</sub>±Δy – доверительные интервалы зависимой переменной при доверительной вероятности P=0,95; R – множественный коэффициент корреляции; R<sup>2</sup> – коэффициент детерминации; S<sub>ур</sub> – стандартная ошибка уравнения регрессии (над чертой – ее абсолютная величина, под чертой – то же, % относительно среднего значения зависимой переменной); F – фактическая величина F-критерия Фишера; α – фактический уровень значимости.

В результате математической обработки получены следующие регрессионные модели исследуемых свойств объекта, адекватные экспериментальным данным по указанным выше показателям:

– подвижность растворной смеси:  $Y=8,8+0,4x_1+4,02x_2-0,82x_2^2$ ;

– плотность растворной смеси:  $Y=1974-22,5x_1-48x_2$ ;

– средняя плотность раствора:  $Y=1954-17,83x_1-47x_2+12,33x_2^2$ ;

– предел прочности раствора при изгибе:  $Y=4,99-1,18x_1-1,1x_2$ ;

– предел прочности раствора при сжатии:  $Y=16,27-4,2x_1-4,72x_2$ .

Анализ полученных в результате расчетов статистических характеристик па-

раметров уравнений регрессии показал, что

1) коэффициенты уравнений значимы на 5 % уровне (α<0,05) по превышению фактических значений t-критерия Стьюдента над табличным (t<sub>табл</sub>=2,31 при доверительной вероятности P=0,95 и n=9 [7]);

2) значения верхних и нижних границ доверительных интервалов параметров регрессий a<sub>i</sub> с вероятностью P=0,95 не принимают нулевых значений, что доказывает их статистическую значимость и надежность, за исключением влияния фактора X<sub>1</sub> (состав раствора) в пределах варьирования на подвижность смесей (нижняя граница доверительного интервала близка к нулю);

3) расчетные коэффициенты детерминации ( $R^2 > 0,95$ ) указывают на высокую точность аппроксимации: уравнения объясняют более 98 % вариаций зависимых переменных;

4) стандартные ошибки оценки зависимых по уравнениям по большинству показателей свойств не превышают 5 %;

5) фактические величины  $F$ -критериев по уравнениям значительно превышают табличные значения ( $F_{\text{табл}}=5,14$  при  $\alpha=0,05, f_1=2, f_2=6$ , и  $F_{\text{табл}}=5,41$  при  $\alpha=0,05, f_1=3, f_2=5$  [7] для двухфакторных линейного и квадратического уравнений соответственно). Таким образом, доказываются достоверность влияния изучаемых факторов на полученные результаты;

6) величины коэффициентов множественной корреляции ( $R > 0,95$ ) указывают на тесные линейные связи между зависимыми и независимыми переменными всех уравнений, то есть полученные зависимости являются линейными.

Анализ уравнений регрессии и их графического отображения показал, что варьирование фактора  $X_1$  (состав раствора) в пределах 1:3...1:5 при постоянном расходе воды на трех уровнях ( $B=\text{const}$  при  $B/T=0,15, =0,19, =0,23$ ) оказывает следующее влияние на основные свойства объекта исследования:

1) отмечена тенденция к увеличению удобоукладываемости смесей на 7...20 % по мере снижения показателя расхода воды, что доказывает пластифицирующее действие СВД на растворные смеси. Эффект пластификации более очевиден на менее подвижных смесях при  $B/T=0,15$ , при этом возможно получение смесей указанных составов с подвижностью около 4,0 см (по глубине погружения стандартного конуса – ОК), что обуславливает их использование для невибрированной бутовой кладки. По мере увеличения  $B/T$  пластифицирующее действие СВД МК и ОТП несколько снижается, тем не менее, на составах с  $B/T=0,19, =0,23$  возможно получение смесей наиболее востребованной удобоукладываемости с ОК=8...12 см для каменной кладки из

различных стеновых материалов – пустотелый и полнотелый кирпич, камни керамические и бетонные (ГОСТ 28013-98\*). Пластифицирующее действие СВД МК и ОТП на цементных растворах обусловлено раздвижкой зерен цемента ультратонкими зёрнами микрокремнезема, введенного в смесь при замещении соответствующей части песка, при усиливающем этот эффект влиянии дополнительно вовлеченного воздуха, равномерно распределенного по объему цементного теста (роль «шарикоподшипников»).

При это следует подчеркнуть, что указанный выше эффект пластификации при СВД МК и ОТП достоверно точно может быть описан лишь в пределах варьирования входного параметра от  $X_{\min}$  до  $X_{\max}$  – на составах 1:3...1:5. За пределами варьирования параметра как в большую, так и в меньшую сторону, зависимости могут быть другими. В отличие от физических моделей, результаты статистической модели не могут быть экстраполированы за пределы варьирования параметра. Для их расширения необходимы дополнительные исследования с целью сбора данных и составления новой модели;

2) отмечено снижение средней плотности растворных смесей (около 2 %) при всех показателях расхода воды. По показателю средней плотности наибольшие значения (в среднем  $2022 \text{ кг/м}^3$ ) наблюдаются у смесей с меньшим содержанием воды ( $B/T=0,15$ ), наименьшие (в среднем  $1926 \text{ кг/м}^3$ ) – с большим содержанием воды ( $B/T=0,23$ ). Аналогичная тенденция наблюдается на показателях средней плотности растворов: при изменении состава растворов по мере увеличения доли (П + МК) при  $B=\text{const}$  их средняя плотность снижается незначительно (до 2 %). Последнее обусловлено, главным образом, снижением доли цемента, как самого тяжелого компонента раствора, замещением части песка наиболее легким МК и увеличением объема вовлеченного воздуха при одновременно уплотняющем действии МК при СВД. По абсолютным показателям в пределах варьирования со-

става раствора при  $B/T=0,15$  средняя плотность равна  $2013 \text{ кг/м}^3$ , при  $B/T=0,23$  –  $1919 \text{ кг/м}^3$ , что доказывает возможность варьирования показателя средней плотности растворов при СВД МК и ОТП в достаточно широком пределе за счет изменения расхода воды затворения;

3) прочностные показатели растворов как при изгибе, так и при сжатии, на всем диапазоне варьирования состава при  $B=\text{const}$ , при всех зафиксированных показателях расхода воды, снижаются в среднем на 40 %, что обусловлено также снижением содержания цементного вяжущего в растворах. По абсолютным показателям прочность растворов при изгибе может изменяться в среднем от 6,1 МПа при  $B/T=0,15$  до 3,9 МПа при  $B/T=0,23$ , при сжатии – соответственно, от 21,0 МПа до 11,6 МПа, что доказывает возможность варьирования прочностных показателей растворов путем изменения содержания (П + МК) при  $B=\text{const}$  в достаточно широких пределах: на более «жирных» составах возможно увеличение прочностных показателей, на более «тощих» – снижение. Последнее предполагает получение кладочных растворов при СВД МК и ОТП широкого марочного ряда М10...М200, в зависимости от проектных требований, за счет варьирования соотношения Ц: (П + МК).

Анализ графического отображения уравнений регрессии при варьировании фактора  $X_2$  (расход воды затворения) в пределах его показателя  $B/T=0,15-0,23$  на постоянных составах растворов на трех уровнях (Ц: (П + МК)=const при 1:3, 1:4, 1:5) показал, что его влияние на основные свойства объекта исследования при СВД МК и ОТП соответствует основным законам строительного материаловедения: средние плотности растворных смесей, затвердевших растворов и их прочностные показатели снижаются пропорционально количеству воды затворения, подвижность же, наоборот, увеличивается, причем на более тощем составе 1:5 выше, чем на 1:3, по причине пластифицирующего эффекта при СВД. Последнее пред-

полагает возможность варьирования указанных свойств растворов при разработке их составов, особенно подвижности, в зависимости от назначения кладочного раствора, в достаточно широких пределах – от 1...3 см до 13...14 см по ГОСТ 28013-98\*.

Использование полученных зависимостей позволит проводить оптимизацию составов растворов с исследованными добавками МК и ОТП при условии обеспечения требуемых характеристик.

### Литература

1. Кудяков, А.И. Морозостойкие кладочные растворы пониженной плотностью с добавками микрокремнезема и омыленного таллового пека / А.И. Кудяков, А.А. Зиновьев, Н.В. Дворянинова // Вестник ТГАСУ. – 2008. – №4. – С. 99-105.
2. Кудяков, А.И. Российские реалии технического и саморегулирования в строительном комплексе // Реальный сектор. - 2009. – №12. - С. 15-19.
3. Комохов, П.Г. Структурная механика разрушения кирпичной кладки / П.Г. Комохов, Ю.А. Беленцов // Строительные материалы. – 2004. - №11. – С. 46-47.
4. Дворянинова, Н.В. Модификация структуры и свойств цементных смесей и растворов с органоминеральной добавкой / Н.В. Дворянинова // Труды Братского государственного университета: Серия Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. Т.2. – Братск: БрГУ, 2006. – С. 337-343
5. Зиновьев, А.А. Местное техногенное сырье как добавка к цементным растворам / А.А. Зиновьев, Н.В. Дворянинова // Строительные материалы. - 2006. - №10 – С. 49-51
6. Дворянинова, Н.В. Кладочные растворы повышенной высоло- и морозостойкости с добавками микрокремнезема и омыленного таллового пека: дис... канд. техн. наук: 05.23.05: защищена 27.06.2008 / Дворянинова Надежда Викторовна. – Братск, 2008. – 222 с.

7. Тихомиров, В.Б. Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в легкой и текстильной

промышленности) / В.Б. Тихомиров. – М.: «Легкая индустрия», 1974. – 262 с.