

## Оптимизация пропорций смеси пенобетона с использованием плана экспериментов Бокса-Уилсона

Ву Ким Зиен<sup>1</sup>, С.И. Баженова<sup>1</sup>, До Минь Чиен<sup>2</sup>, Хоанг Минь Тхуан<sup>2</sup>,  
Нгуен Ван Зыонг<sup>2</sup>, Нгуен Зоан Тунг Лам<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

<sup>2</sup>Колледж промышленности и строительства Вьетнам

**Аннотация:** В данной статье представлено влияние воды затворения и минеральных добавок на механические свойства пенобетона. Исследование проведено на материалах Вьетнама. Влияние содержания воды и минеральных добавок на механические свойства пенобетона было изучено с использованием методики Вох-Уилсон. Механические свойства пенобетона в возрасте 28 суток определялись по ГОСТ 10180-2012. Полученные результаты представлены в виде поверхностного уравнения регрессии второго уровня, описывающего зависимость прочности пенобетона на сжатие и изгиб от содержания воды и минеральной добавки. Получен оптимальный состав пенобетонных смесей с максимальной прочностью на сжатие и изгиб с использованием сырьевых материалов Вьетнама.

**Ключевые слова:** доменный шлак, пенобетон, прочность, метод Бокса-Уилсона, суперпластификатор, пенообразователь, экспериментальное планирование, уравнения регрессии

### Введение

Пенобетон - это легкий пористый материал с широким спектром возможностей, состоящий из вяжущего, песка, мелкого заполнителя и пены. В отличие от тяжелого бетона, пенобетон обладает многими выдающимися свойствами из-за своей структуры, поэтому его можно широко использовать в строительстве и других областях гражданского строительства как легкий, конструктивный, теплоизоляционный, звукоизоляционный материал [1-3].

Планирование экспериментов важно для прикладных научных исследований. В процессе производства бетона наиболее важными входными переменными являются количество и пропорция основных материалов, поскольку они играют важную роль в производительности и качестве конечного продукта. Как только соотношение сырьевых составляющих оптимизировано, выходные переменные, включая физические свойства и стоимостные затраты, будут улучшены, что непосредственно связано с

качеством готового продукта [4, 5]. Желаемые значения механических свойств бетона зависят от назначения и расположения возводимого элемента конструкции, типа конструкции, направления и величины различных сил, действующих на нее [6, 7]. В то время как другие факторы включают в себя тип используемого материала, условия эксплуатации, окружающую среду и т.п. Но именно количество использованного материала следует определять наиболее точно и с минимальными погрешностями. Поэтому учет всех вышеозвученных качеств и параметров при ведении подбора состава бетонной смеси - одна из самых сложных задач для инженеров-строителей. Расчет бетонной смеси в настоящее время определяется на основе опыта и предположений производителя. Этот метод, отнимающий много времени и неточный, не основан на научных фактах [8, 9].

В данном исследовании пенобетон был выбран в качестве объекта исследования. Пенобетон - это результат смешивания пены, полученной из пенообразователя и воды, с мелкодисперсной смесью вяжущего, воды, добавок и заполнителей. Прочность на сжатие и прочность на изгиб - очень важные физико-механические свойства бетона, а качество бетона и его структура имеют прямую взаимосвязь. Прочность на сжатие можно рассматривать как репрезентативную для всех свойств бетона, таких как проницаемость, прочность и сопротивление истиранию [10, 11].

Идеальный пенобетон должен иметь высокую прочность на сжатие, низкую плотность и невысокую стоимость производства. Метод проектирования Box-Wilson - один из широко используемых методов экспериментального планирования для определения влияния вводимых материалов на полученные результаты. Кроме того, он сочетает в себе статистические методы для оптимизации и определения состава пенобетонных смесей [12, 13].

---

Согласно предыдущим исследованиям, авторы использовали метод планирования эксперимента первого порядка для изучения влияния факторов входа на свойства пенобетона: содержание микрокремнезема SF90, суперпластификатора, отношения вода/цемент+доменный шлак. Однако содержание добавки суперпластификатора незначительно влияет на прочность пенобетона на сжатие и изгиб.

Поэтому в данном исследовании авторы выбрали оптимальный состав пенобетона, определенный в более ранних исследованиях, с использованием квадратно-ортогонального планирования центра. Входными переменными считаются соотношение между: вода/(цемент + доменный шлак), и микрокремнезем/цемент, а выходной переменной является прочность пенобетона на сжатие и изгиб.

### Материалы и Методы

**Материалы.** Портландцемент (Ц) СЕМ I 42,5 N используется для всех представленных составов бетонных смесей. Микрокремнезем SF-90 (МК90) используется в сухом виде с содержанием  $\text{SiO}_2$  92,4%. Доменный шлак (ДШ) получают на сталелитейном заводе Хоа Фат, Вьетнам.

**Табл. 1.** Химический состав материалов (Ц, ДШ и МК90)

№ п/п	Химические компоненты (wt. %)	(МК90)	(ДШ)	(Ц)
1	Диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ )	90,76	36,01	22,43
2	Оксид кальция ( $\text{CaO}$ )	0,53	40,46	62,52
3	Оксид железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	2,47	-	3,44
4	Оксид алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	2,24	13,41	5,32
5	Оксид магния ( $\text{MgO}$ )	-	7,71	2,04
6	Триоксид серы ( $\text{SO}_3$ )	-	0,15	-
7	Оксид натрия ( $\text{Na}_2\text{O}$ )	0,57	-	0,15
8	Оксид калия ( $\text{K}_2\text{O}$ )	-	0,29	0,64
9	Потери при возгорании (%)	3,43	1,97	3,46
10	Удельная поверхность ( $\text{см}^2/\text{г}$ )	10125	4565	3670

Химический состав используемых цемента, микрокремнезема и доменного шлака приведен в таблице 1. Использовали пенообразователь EABASSOC (ПЕ), разбавленный водой в соотношении 1 к 25 (по объему), а затем аэрированный до плотности  $45 \div 50 \text{ кг/м}^3$ . Суперпластификатор SR 5000F SilkRoad (SR5000) используется в качестве водоредуцирующей добавки. Вода (В) для смешивания бетона соответствует нормативным требованиям ГОСТ 23732-2011.

**Методы.** В этом исследовании для разработки смеси используется метод проектирования Вох-Wilson. Затем уравнение регрессии второго уровня вычисляется по формуле (1) [14].

$$Y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{j=1}^k b_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ji} x_j x_i + \varepsilon_0 \quad (1)$$

где:  $b_j$  и  $b_{ji}$  - коэффициенты регрессии;  $x_j$  - представляет факторы;  $x_i x_j$  - демонстрирует взаимодействие между факторами;  $\varepsilon_0$  - ошибка измерения.

Механические свойства пенобетона в возрасте 28 суток определяют по ГОСТ 10180-2012.

Влияние микрокремнезема SF90, отношения вода/(цемент+доменный шлак) на прочности пенобетона при сжатие и изгибе было выявлено с помощью метода центрального композиционного планирования с переменным вращением для двух факторов.

### Результаты исследования

Результаты предварительного определения компонентов пенобетона представлены в таблице 2.

**Табл. 2.** Состав и прочность пенобетона на сжатие

№ п/п	Состав пенобетон, кг						<i>В</i>	<i>МК90</i>	$R_{28}^{сж}$ (МПа)
	<i>Ц</i>	<i>ДШ</i>	SR5000	МК90	<i>В</i>	<i>ПО (л)</i>	<i>Ц + ДШ</i>	<i>Ц</i>	
1	450	926	4,5	68	275,2	143,32	0,2	0,15	41,03

Согласно предыдущему исследованию авторов, соотношение суперпластификатор/цемент не очень влияет на механические свойства пенобетона. Таким образом, в этом исследовании авторы изучают влияние соотношения вода/(цемент + доменный шлак) и соотношения микрокремнезем/цемент. Входные факторы, влияющие на механические свойства выбранного пенобетона (таблица 3):

-  $x_1$  – отношение  $\frac{B}{Ц + ДШ}$  от 0,186 до 0,214;

-  $x_2$  – отношение  $\frac{МК90}{Ц}$  от 0,079 до 0,221.

**Табл. 3.** Диапазон переменных влияющих факторов

№ п/п	Факторы		Переменная интервал				
	В качестве переменных	В натуральном виде	-1,414	-1	0	+1	+1,414
1	$x_1$	$\frac{B}{Ц + ДШ}$	0,186	0,19	0,20	0,21	0,214
2	$x_2$	$\frac{МК90}{Ц}$	0,079	0,10	0,15	0,20	0,221

Количество испытаний N определяется по формуле (2):

$$N = 2^k + 2 \times k + m = 2^2 + 2 \times 2 + 5 = 13. \quad (2)$$

где:  $k = (2 - m)$  – количество экспериментов в центре,  $m = 5$  – количество входов после кодирования переменных и проведения экспериментов.

Результаты экспериментов представлены в таблицах 4-7.

**Табл. 4.** Составы пенобетона по методу ортогональной централизованной планировки второго порядка

№ П/П	В натуральном виде		В качестве переменных		Составы образцов пенобетона, кг/м <sup>3</sup>					
	$\frac{B}{Ц+ДШ}$	$\frac{МК90}{Ц}$	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	Ц	ДШ	SR5000	МК90	В	ПО (Л)
1	0,19	0,20	+1	+1	450	926	4,5	90	289,0	117,86
2	0,21	0,20	-1	+1	450	926	4,5	90	261,4	145,38
3	0,19	0,10	+1	-1	450	926	4,5	45	289,0	138,79
4	0,21	0,10	-1	-1	450	926	4,5	45	261,4	166,31
5	0,214	0,10	+1,414	0	450	926	4,5	45	294,5	133,29
6	0,186	0,10	-1,414	0	450	926	4,5	45	255,9	171,82
7	0,20	0,221	0	+1,414	450	926	4,5	99	275,2	127,23
8	0,20	0,079	0	-1,414	450	926	4,5	36	275,2	156,95
9	0,20	0,15	0	0	450	926	4,5	68	275,2	142,09
10	0,20	0,15	0	0	450	926	4,5	68	275,2	142,09
11	0,20	0,15	0	0	450	926	4,5	68	275,2	142,09
12	0,20	0,15	0	0	450	926	4,5	68	275,2	142,09
13	0,20	0,15	0	0	450	926	4,5	68	275,2	142,09

**Табл. 5.** Расчет уравнений регрессии для  $R_{изз}^{28}$  (МПа)

№ П/П	В качестве переменных					$\frac{B}{Ц+ДШ}$	$\frac{МК90}{Ц}$	$R_{изз}^{28}$ , МПа		$(Y_{1j} - \hat{Y}_{1j})^2$	$(Y_{01j} - \hat{Y}_{01j})^2$
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> <sup>2</sup>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	x <sub>2</sub> <sup>2</sup>			Y <sub>1j</sub>	$\hat{Y}_{1j}$		
1	+1	+1	1	1	1	0,19	0,20	6,31	6,36	0,00209	-
2	-1	+1	1	-1	1	0,21	0,20	6,28	6,35	0,00485	-
3	+1	-1	1	-1	1	0,19	0,10	5,69	5,60	0,00835	-
4	-1	-1	1	1	1	0,21	0,10	5,78	5,71	0,00456	-
5	+1,414	0	2	0	0	0,214	0,10	6,02	6,03	0,00007	-
6	-1,414	0	2	0	0	0,186	0,10	6,13	6,10	0,00064	-
7	0	+1,414	0	0	2	0,20	0,221	6,54	6,43	0,01113	-
8	0	-1,414	0	0	2	0,20	0,079	5,36	5,45	0,00788	-
9	0	0	0	0	0	0,20	0,15	6,4	6,37	0,00116	0,0012
10	0	0	0	0	0	0,20	0,15	6,41	6,37	0,00194	0,0019
11	0	0	0	0	0	0,20	0,15	6,32	6,37	0,00212	0,0021
12	0	0	0	0	0	0,20	0,15	6,38	6,37	0,00020	0,0002
13	0	0	0	0	0	0,20	0,15	6,32	6,37	0,00212	0,0021
$\sum(Y_{1j} - \hat{Y}_{1j})^2 = 0,0471$							$\sum(Y_{01j} - \hat{Y}_{01j})^2 = 0,0075$				

**Табл. 6.** Расчет уравнений регрессии для  $R_{сж}^{28}$  (МПа)

№ п/п	В качестве переменных					$\frac{B}{C + DSH}$	МК90 $\frac{C}{D}$	$R_{сж}^{28}$ , МПа		$(Y_{2j} - \hat{Y}_{2j})^2$	$(Y_{02j} - \hat{Y}_{02j})^2$
	$x_1$	$x_2$	$x_1^2$	$x_1x_2$	$x_2^2$			$Y_{2j}$	$\hat{Y}_{2j}$		
1	+1	+1	1	1	1	0,19	0,20	41,3	41,94	0,40780	-
2	-1	+1	1	-1	1	0,21	0,20	43,8	43,55	0,06215	-
3	+1	-1	1	-1	1	0,19	0,10	36,4	36,85	0,19887	-
4	-1	-1	1	1	1	0,21	0,10	38,3	37,86	0,19532	-
5	+1,414	0	2	0	0	0,214	0,10	39,8	38,95	0,72989	-
6	-1,414	0	2	0	0	0,186	0,10	40,4	40,80	0,16078	-
7	0	+1,414	0	0	2	0,20	0,221	44,4	44,04	0,13255	-
8	0	-1,414	0	0	2	0,20	0,079	36,5	36,41	0,00797	-
9	0	0	0	0	0	0,20	0,15	42,8	42,74	0,00360	0,0036
10	0	0	0	0	0	0,20	0,15	43,1	42,74	0,12960	0,1296
11	0	0	0	0	0	0,20	0,15	42,5	42,74	0,05760	0,0576
12	0	0	0	0	0	0,20	0,15	42,6	42,74	0,01960	0,0196
13	0	0	0	0	0	0,20	0,15	42,7	42,74	0,00160	0,0016
$\sum (Y_{2j} - \hat{Y}_{2j})^2 = 2,1073$						$\sum (Y_{02j} - \hat{Y}_{02j})^2 = 0,2120$					

Коэффициент уравнения регрессии рассчитывается по формуле (3) [14].

Результаты расчета представлены в таблице 7.

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ij} y_j}{\sum_{i=1}^N x_{ij}^2} \forall j = 1 \dots n; \quad b_{ju} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ij}^2 x_{ui} y_j}{\sum_{i=1}^N x_{ij}^2 x_{ui}^2} \forall j, u = 1 \dots n; j \neq u \quad (3)$$

**Табл. 7.** Коэффициенты уравнения регрессии

№ п/п	$b_j$		$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{12}$	$b_{11}$	$b_{22}$
	$Y_1$	$Y_2$						
1	$Y_1$	$R_{из}^{28}$ , МПа	6,366	-0,027	0,349	0,030	-0,150	-0,212
2	$Y_2$	$R_{сж}^{28}$ , МПа	42,740	-0,656	2,696	-0,150	-1,433	-1,258

В результате были получены следующие уравнения регрессии:

$$Y_1 = 6,366 - 0,027x_1 + 0,349x_2 - 0,150x_1^2 - 0,212x_2^2 + 0,030x_1x_2 \quad (4)$$

$$Y_2 = 42,740 - 0,656x_1 + 2,696x_2 - 1,433x_1^2 - 1,258x_2^2 - 0,150x_1x_2 \quad (5)$$

Проверяем коэффициенты уравнения регрессии (4) и (5).

Коэффициент  $t_{bj}$  считается существенным, если  $|t_{bj}| \geq t_Q(f)$  [14].

Согласно [15] на таблице 3.2  $\Rightarrow t_Q(f) = 2,7764$  ( $Q = 0,05, n_1 = m - 1 = 5 - 1 = 4$ ).

Значение  $t_{bj}$  были определены по формуле (6) [14]:

$$t_{bj} = \frac{|b_j|}{S_{bj}} \quad (6)$$

Значение дисперсии коэффициентов регрессии ( $S_{bj}$ ) рассчитывается по формуле (7) [20]:

$$S_{bj} = \sqrt{\frac{S_{II}^2}{\sum_{i=1}^m x_{ji}^2}}, \quad (7)$$

в котором:  $S_{II}$  – оценка дисперсии ошибок наблюдения:

$$S_{II}^2 = \frac{\sum_{j=1}^m (Y_{oj} - \hat{Y}_o)^2}{m - 1} \quad (8)$$

$$\hat{Y}_o = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m Y_{oj} \quad (9)$$

в котором:  $m$  - количество повторных экспериментов в центре,  $m = 5$ ;  
 $\hat{Y}_o$  - средняя ценность  $m$  экспериментов в центре;  $Y_{oj}$  - полученное ценность  $i$ -го эксперимента в центре.

Для уравнения регрессии (4):

$$\sum_{j=1}^5 (Y_{01j} - \hat{Y}_{01})^2 = 0,0139 \Rightarrow S_{III}^2 = \frac{0,0075}{5-1} = 0,00188$$

Значения критерия проверки, коэффициенты уравнения регрессии приведены в таблице 8.

**Табл. 8.** Значения критерия проверки, коэффициенты уравнения регрессии (4)

№ п/п	j	0	1	3	4	5	6
1	$b_j$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{12}$	$b_{11}$	$b_{22}$
		6,366	-0,027	0,349	0,030	-0,150	-0,212
2	$ b_j $	6,366	0,027	0,349	0,030	0,150	0,212
3	$Sb_j$	0,019	0,015	0,015	0,022	0,016	0,016
4	$tb_j$	328,301	-1,758	22,738	1,384	-9,097	-12,896

После проверки коэффициентов несущественные коэффициенты отбрасывались. Таким образом, получили уравнение:

$$Y_1 = 6,366 + 0,349x_2 - 0,150x_1^2 - 0,212x_2^2 \quad (10)$$

Для уравнения регрессии (5):

$$\sum_{j=1}^5 (Y_{02j} - \hat{Y}_{02j})^2 = 0,828 \rightarrow S_{211}^2 = \frac{0,2120}{5-1} = 0,0530.$$

**Табл. 9.** Значения критерия проверки, коэффициенты уравнения регрессии (5)

№ п/п	j	0	1	3	4	5	6
1	$b_j$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{12}$	$b_{11}$	$b_{22}$
		42,740	-0,656	2,696	-0,150	-1,433	-1,258
2	$ b_j $	42,740	0,656	2,696	0,150	1,433	1,258
3	$Sb_j$	0,103	0,081	0,081	0,115	0,087	0,087
4	$tb_j$	415,128	-8,060	33,127	-1,303	-16,407	-14,404

После проверки коэффициентов несущественные коэффициенты отбрасывались. Таким образом, получили уравнение:

$$Y_2 = 42,740 - 0,656x_1 + 2,696x_2 - 1,433x_1^2 - 1,258x_2^2 \quad (11)$$

### ***Проверка совместимости модели***

Проверка совместимости модели определяется по формуле  $S_{2d}$  (13) и  $F_{\text{рас}}$  (12) [14]:

$$F_{\text{рас}} = \frac{S_d^2}{S_{\Pi}^2} \quad (12)$$

$$S_d^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (Y_j - \hat{Y}_j)^2}{N - m} \quad (13)$$

в котором:  $S_{\Pi}^2$ - оценка дисперсии ошибок наблюдения;  $S_d^2$ - значение дисперсии;  $m$  - количество коэффициентов регрессии;  $m = 5$ ;  $Y_j$  – значение  $j$ -го эксперимента;  $\hat{Y}_j$  – экспериментальное значение функции, полученное в соответствии с экспериментом  $j$ .

$F_Q$ , ( $v_1, v_2$ ) из таблицы 3.5 (Процентные точки  $F$ -распределения) [15], при значимом уровне  $Q = 0,05$ ; зависит от значений  $v_2 = m - 1 = 4$  и  $v_1 = N - m = 13 - 5 = 8$ . Так что, критическое значение:  $F_Q(8, 4) = 6,0410$ .

Для уравнения регрессии (10):

$$\sum_{j=1}^{13} (Y_{1j} - \hat{Y}_{1j})^2 = 0,0471 \rightarrow S_{1d}^2 = \frac{0,0471}{13-5} = 0,00589 \text{ и } S_{1ll}^2 = 0,00188$$

$$\Rightarrow F_{\text{расс}} = \frac{S_{1d}^2}{S_{1ll}^2} = \frac{0,00589}{0,00188} = 3,131 < F_{0,05}(8, 4) = 6,0410$$

Для уравнения регрессии (11):

$$\sum_{j=1}^{13} (Y_{2j} - \hat{Y}_{2j})^2 = 2,1073 \rightarrow S_{2d}^2 = \frac{2,1073}{13-5} = 0,263 \text{ и } S_{2ll}^2 = 0,0530$$

$$\Rightarrow F_{2\text{расс}} = \frac{S_{2d}^2}{S_{2ll}^2} = \frac{0,2634}{0,0530} = 4,970 < F_{0,05}(8, 4) = 6,0410$$

Поэтому, уравнение (10) и (11) удовлетворяют условию  $F_{\text{расс}} < F_{\text{таб}}$

Используя компьютерную программу Matlab, были получены изображения поверхности выражения целевой функции для уравнений регрессии (9 и 10), которые представлены на рисунке 1 и 2.

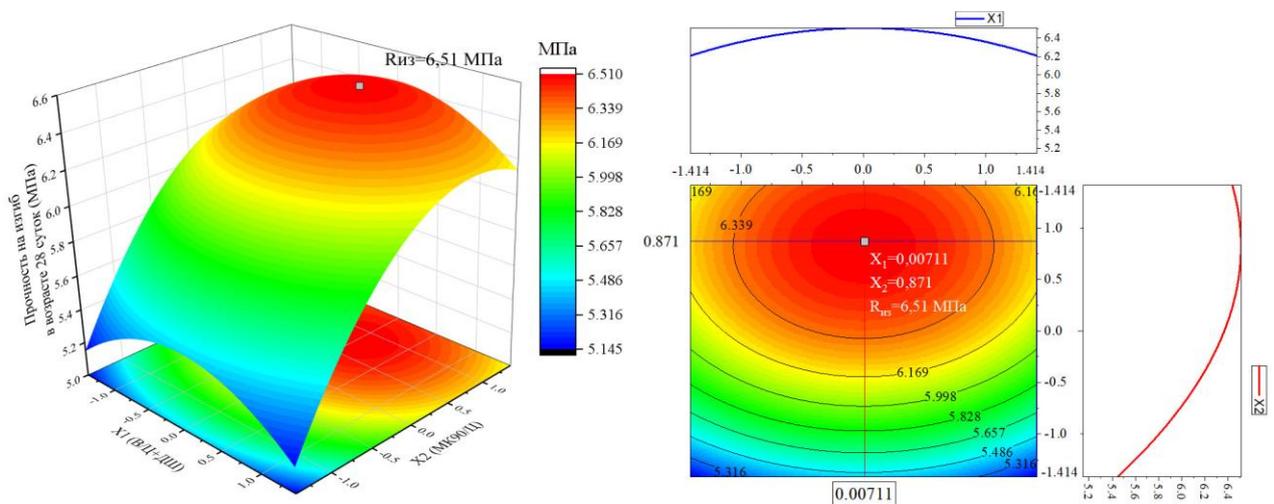
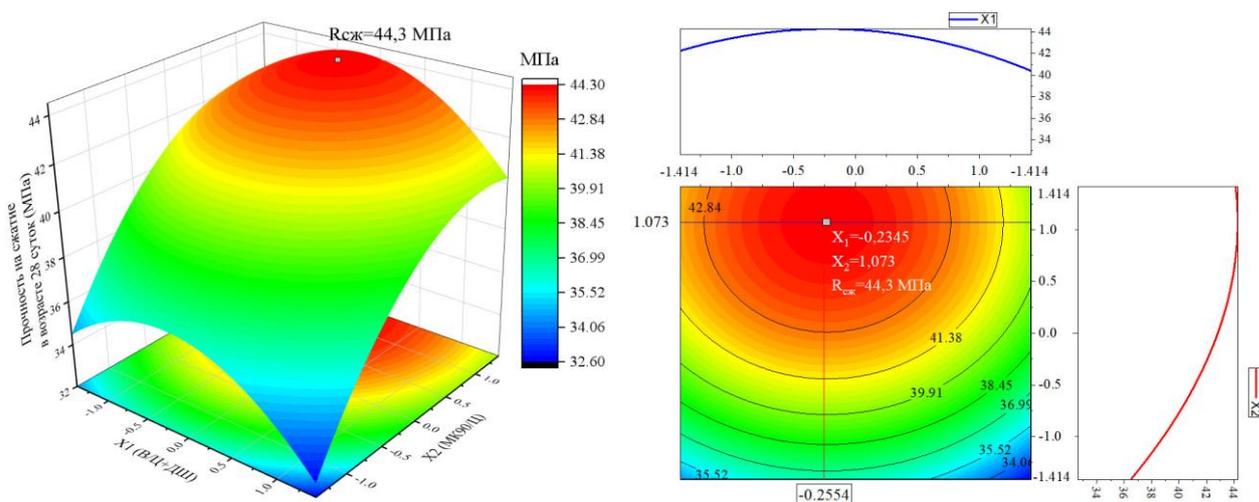


Рис. 1. Поверхность уравнения регрессии (9)



**Рис. 2.** Поверхность уравнения регрессии (10)

Необходимо определить оптимальное значение уравнения регрессии уровня 2 и оптимальный состав.

Первый случай:

При  $x_1 = 0,00711$ ,  $x_2 = 0,871$  и  $R_{из} = 6,51$  МПа

Замена:  $x_1 = 0,00711$ ,  $x_2 = 0,871$  в уравнение (9)  $\Rightarrow R_{сж} = 44,13$  МПа

Второй случай:

При  $x_1 = -0,2345$ ,  $x_2 = 1,073$  и  $R_{сж} = 44,3$  МПа

Замена:  $x_1 = -0,2345$ ,  $x_2 = 1,073$  в уравнение (10)  $\Rightarrow R_{из} = 6,50$  МПа

Таким образом, наиболее оптимальное значение:  $x_1 = -0,2345$ ,  $x_3 = 1,073$

$$\Rightarrow \frac{B}{Ц + ДШ} = \left(\frac{B}{Ц}\right)_0 + 0,01 * x_1^{опт} = 0,20 - 0,01 * 0,2345 = 0,1976;$$

$$\left(\frac{МК90}{Ц}\right) = \left(\frac{МК90}{Ц}\right)_0 + 0,05 * x_2^{опт} = 0,1 + 0,05 * 1,073 = 0,1536$$

Следовательно, оптимальный состав полученного пенобетона представлен в таблице

10.

Табл. 10. Оптимальный состав пенобетонной смеси

№ п/п	Соотношение материалов		Состав пенобетонной смеси, кг/м <sup>3</sup>					
	$\frac{B}{C + ДШ}$	$\frac{МК90}{C}$	Ц	ДШ	SR5000	МК90	В	ПО (Л)
1	0,1976	0,1536	450	926	4,5	69	271,9	144,64

### Выводы

На основании анализа данных, полученных в ходе эксперимента, можно сделать следующие выводы:

1. При использовании алгоритма экспериментального планирования, найдено уравнение регрессии 2 уравнения, описывающее взаимосвязь между целевыми функциями: прочность на сжатие, прочность на изгиб с такими факторами, как: количество использованной воды, содержание минеральных добавок. ( $0,186 < x_1 < 0,214$ ;  $0,079 < x_2 < 0,221$ , рисунок 1, 2).

2. Полученные уравнения регрессии второго порядка (10) и (11) описывают зависимость прочности на сжатие и изгиб пенобетона в возрасте 28 дней нормального твердения  $x_1 = -0,2345$  и  $x_2 = 1,073$ .

3. С помощью компьютерных программ были получены изображения поверхностей уравнений (9) и (10), как показано на рисунках 1, 2.

4. Оптимальный состав пенобетонной смеси с максимальной прочностью на сжатие и изгиб представлен в таблице 10.

5. Результаты этого исследования основаны на результатах предыдущих исследований данных авторов, направленных на полный процесс оптимизации состава пенобетона на базе сырьевых материалов Вьетнама. Кроме того, полученные результаты являются предпосылкой для изучения авторами таких свойств пенобетона, как: теплоизоляционные свойства, водопоглощение, проницаемость, модуль упругости, структурная пористость и т.д.

## Литература

1. Pan, Z., Hiromi, F., Wee, T. Preparation of high-performance foamed concrete from cement, sand and mineral admixtures. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*. 2007. 22(2). Pp. 295–298. DOI:10.1007/s11595-005-2295-4.
2. Kim, D.V., Bazhenova, S., Van, L.T., Cong, L.N. Sustainable use of industrial-waste as fine-aggregate of Foam Concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 869. Pp. 10. DOI:10.1088/1757-899X/869/3/032022.
3. Баженов Ю М. Технология бетона. АСВ 2011. 524с.
4. Кравцов. А.В., Цыбакин. С.В., Кузнецова. Е.Ф., Евсеева. Т.М. Математическое моделирование литого мелкозернистого бетона с техногенными отходами медеплавильного производства. *Вестник МГСУ*. 2017. (10). С. 1132–1144. DOI:10.22227/1997-0935.2017.10.1132-1144.
5. Zheng, J., Shao, G., Shen, X. Synergistic interactions of chemical additives on the strength development of silicate cement by a box-behnken model optimization. *Journal of Applied Polymer Science*. 2014. 131(22). Pp. 1–10. DOI:10.1002/app.41071.
6. Nambiar, E.K.K., Ramamurthy, K. Models for strength prediction of foam concrete. *Materials and Structures*. 2008. 41(2). Pp. 247–254. DOI:10.1617/s11527-007-9234-0.
7. Amran, Y.H.M., Farzadnia, N., Ali, A.A.A. Properties and applications of foamed concrete; A review. *Construction and Building Materials* 101 (2015). PP. 990–1005. dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112
8. Даужанов, Н.Т., Крылов, Б.А., Аруова, Л.Б. Технология строительных процессов. Механизмы и оборудование. *Вестник МГСУ*. 2014. С. 79–86.
9. Горшков, П.В. Влияние водоцементного отношения на воздухововлечение при производстве неавтоклавного пенобетона с

использованием турбулентно кавитационной технологии. Вестник МГСУ. 2012. С. 154–158.

10. Даужанов, Н.Т., Крылов, Б.А. Малоэнергоемкая технология термообработки изделий из пенобетона на полигонах с помощью солнечной энергии. Вестник МГСУ. 2014. С. 149–157.
11. Soleimanzadeh, S., Othuman Mydin, M.A. Influence of high temperatures on flexural strength of foamed concrete containing fly ash and polypropylene fiber. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2013. 26(2). Pp. 117–126. DOI:10.5829/idosi.ije.2013.26.02b.02.
12. Abouhussien, A.A., Hassan, A.A.A. Optimizing the durability and service life of self-consolidating concrete containing metakaolin using statistical analysis. *Construction and Building Materials*. 2015. 76. Pp. 297–306. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.12.010.
13. Bektas, F., Bektas, B.A. Analyzing mix parameters in ASR concrete using response surface methodology. *Construction and Building Materials*. 2014. 66. Pp. 299–305. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.05.055.
14. Tri, B.M. *Probability statistics and experimental planning*. Publishing scientific and technical, 2018. 256p.
15. Большев, Л.Н., Смирнов, Н.В. *Таблицы математической статистики*. Москва. 1983. 416с.

### References

1. Pan, Z., Hiromi, F., Wee, T. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*. 2007. 22(2). Pp. 295–298. DOI: 10.1007/s11595-005-2295-4.
2. Kim, D.V., Bazhenova, S., Van, L.T., Cong, L.N. Sustainable use of industrial-waste as fine aggregate of Foam Concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 869. Pp. 10. DOI:10.1088/1757-899X/869/3/032022.

3. Bazhenov Yu M. *Texnologiya betona [Concrete technology]*. ASV 2011. 524p.
4. Kravczov. A.V., Cybakin. S.V., Kuzneczova. E.F., Evseeva. T.M. *Vestnik MGSU*. 2017. (10). Pp.1132–1144. DOI:10.22227/1997-0935.2017.10.1132-1144.
5. Zheng, J., Shao, G., Shen, X. *Journal of Applied Polymer Science*. 2014. 131(22). Pp. 1–10. DOI:10.1002/app.41071.
6. Nambiar, E.K.K., Ramamurthy, K. *Materials and Structures*. 2008. 41(2). Pp. 247–254. DOI: 10.1617/s11527-007-9234-0.
7. Amran, Y.H.M., Farzadnia, N., Ali, A.A.A. *Construction and Building Materials* 101 (2015) 990–1005. dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112
8. Dauzhanov, N.T., Kry`lov, B.A., Aruova, L.B. *Vestnik MGSU*. 2014. P.79–86.
9. Gorshkov, P.V. *Vestnik MGSU*. 2012. pp.154–158.
10. Dauzhanov, N.T., Kry`lov, B.A. *Vestnik MGSU*. 2014. pp.149–157.
11. Soleimanzadeh, S., Othuman Mydin, M.A. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2013. 26(2). Pp. 117–126. DOI:10.5829/idosi.ije.2013.26.02b.02.
12. Abouhussien, A.A., Hassan, A.A.A. *Construction and Building Materials*. 2015. 76. Pp. 297–306. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.12.010.
13. Bektas, F., Bektas, B.A. *Construction and Building Materials*. 2014. 66. Pp. 299–305. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.05.055.
14. Tri, B.M. *Probability statistics and experimental planning*. Publishing scientific and technical, 2018. 256p.
15. Bol`shev, L.N., Smirnov, N.V. *Tablicy matematicheskoy statistiki [Mathematical statistics tables]*. Moskva. 1983. 416p.