

КИМ ЗИЕН ВУ¹, С.И. БАЖЕНОВА¹, ВАН ЛАМ ТАНГ², ХАНЬ ХАНЬ ФАН¹

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

²Ханойский горно-геологический университет, Ханой, Вьетнам

ВЛИЯНИЯ ВХОДНЫХ ФАКТОРОВ НА СВОЙСТВА ПЕНОБЕТОНА

Аннотация. В статье представлено влияние добавок и воды на прочность на сжатие и изгиб пенобетона после 28 суток нормального твердения. Механические свойства пенобетона определяют по ГОСТ 10180-2012. Исходный состав пенобетонной смеси рассчитывали методом абсолютного объема.

В результате получены уравнения регрессии первого порядка. Прочность на сжатие и прочность на изгиб пенобетона зависели от соотношений x_1 (В/(Ц+ДШ)) и x_3 (МК90/Ц), а также от выражения поверхности изображения и целевой функции для уравнений регрессии. Получено оптимальное значение: прочность на сжатие = 42,14 МПа и прочность на изгиб 6,31 МПа.

Ключевые слова: доменный шлак, микрокремнезем, суперпластификатор, пенобетон, прочность на сжатие, прочность на изгиб, оптимально.

KIM DIEN VU¹, S.I. BAZHENOVA¹, VAN LAM TANG², KHANH KHANH PHAN¹

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

²Hanoi University of Mining and Geology, Ha Noi, Vietnam

INFLUENCE OF INPUT FACTORS ON THE FOAM CONCRETE PROPERTIES

Abstract. The article presents the effect of additives and water on the compressive strength and flexural strength of foam concrete after 28 days of normal hardening. The foam concrete mechanical properties are determined according to the GOST 10180-2012. The initial composition of the foam concrete mixture was calculated by the absolute volume method.

As a result, the first-order regression equations are obtained. The compressive strength and flexural strength of foam concrete depended on the ratios x_1 (B/(C+DSh)) and x_3 (MK90/C), as well as on the expression of the image surface and the objective function for the regression equations. The optimal value was obtained: compressive strength = 42.14 MPa and flexural strength of 6.31 MPa.

Keywords: blast furnace slag, silica fume, superplasticizer, foam concrete, compressive strength, flexural strength, optimal.

Введение

В научных исследованиях особое значение имеют численные методы и компьютерные модели, используемые для прогнозирования конкретных свойств [1-3]. Кроме того, в технологии бетона часто используются математические методы для поиска оптимальных компонентов бетона и их дозировки для технологических процессов [4,5].

Планирование экспериментов - это процедура выбора количества и условий экспериментов, необходимых и достаточных для получения действующей математической модели процесса [5-7].

При планировании экспериментов следует учитывать следующее:

- Обратить внимание на минимизацию количества экспериментов.

- Предположить, что некоторые факторы остаются неизменными.
- Изучить несколько важных факторов, влияющих на свойства материалов, для планирования эксперимента.

Исследования [5, 8-10] показали, что при планировании эксперимента необходимо собрать дополнительную информацию о входных переменных исследуемом объекте, используя навыки и знания, полученные в предыдущих исследованиях. Это необходимо для сбора дополнительной информации о входных переменных исследуемом объекте.

Как известно, пенобетон - это сильно аэрированный раствор, обычно содержащий от 30 до 80% пузырьков воздуха по объему. В его состав входят портландцемент, вода, мелкий заполнитель, добавки и пена, полученная механическим способом. Пенобетон обладает высокой технологичностью, что позволяет ему под своим весом растекаться и уплотняться [11,14].

При использовании пенобетона в строительстве есть свои преимущества [3,11,13]: низкая теплопроводность; небольшой вес, в сравнении с тяжелым бетоном; данный тип бетона легко транспортировать, удобного использования и обрабатывать; долговечный, а прочность на сжатие и на изгиб уменьшаются с увеличением плотности.

Кроме того, кремнезем - самый популярный материал, используемый в бетоне для повышения его прочности. Для этого исследования микрокремнезем заменяется в диапазоне 0,1 ÷ 0,2% от веса цемента [15]. По результатам предыдущих исследований, автором был исследован пенобетон плотностью 1700 кг/м³ с использованием микрокремнеземной добавки, суперпластификатора и доменного шлака. Результат – образцы показали, прочность на сжатие в возрасте 28 суток около 40 МПа.

Кроме того, во Вьетнаме бетон используют для «каркасообразующих» конструкций, таких как балки, полы, колонны с пределом прочности при сжатии от 20 ÷ 40 МПа, плотностью 2500 кг/м³, но и легкий бетон, керамзитобетон, с значительно меньшей плотностью на легких заполнителях, применяемый для конструктивных элементов. На данном этапе работы никто из авторов еще не изучал применение пенобетона для элементов подвергающихся постоянным динамическим воздействия - конструкций пола.

Поэтому изучение пенобетон с прочностью на сжатие от 30 до 40 МПа и плотность < 1800 кг/м³ будет отвечать насущным потребностям строительства во Вьетнаме.

Методы и материалы

Материалы

Портландцемент (Ц) СЕМ I 42,5 N производства завода «But Son» (Вьетнам) с $\rho=3,10 \text{ г/см}^3$. Его химические свойства представлены в таблице 1.

Доменный шлак (ДШ) завода "Hoа Phat" (Вьетнам) с $\rho= 2,29 \text{ г/см}^3$.

Таблица 1 – Химический состав Ц, ДШ и МК90

Химические компоненты (wt. %)	Портландцемент (Ц)	Доменный шлак (ДШ)	Silica fume (SF90)
SiO ₂	22,42	36,02	90,78
Al ₂ O ₃	5,31	13,44	2,22
Fe ₂ O ₃	3,45	-	2,46
SO ₃	-	0,15	-
K ₂ O	0,64	0,29	-
Na ₂ O	0,15	-	0,57
MgO	2,03	7,66	-
CaO	62,56	40,47	0,54
TiO ₂	-	0,5	-
потери при прокаливании (%)	3,44	1,47	3,43
Удельная поверхность, см ² /г	3665	4560	10120

В качестве связующего использовался микрокремнезем SF-90 (МК90), производство Вьетнам. Результаты анализа химического состава как Ц, МК90, так и ДШ представлены в

таблице 1, а гранулометрический состав частиц всех сыпучих материалов показаны на рисунке 1.

В качестве пластифицирующей добавки использовался суперпластификатор SR 5000F SilkRoad (SR5000), производство Корея. Его плотность при температуре $25 \pm 5^\circ\text{C}$ составила $1,1 \text{ г/см}^3$. Оптимальная дозировка суперпластификатора составляет 1,5% от массы портландцемента, что позволяет снизить расход воды в бетонных смесях на 30%.

Пенообразователь EABASSOC производится на заводе EABSSOC в Великобритании. Вспенивающие добавки имеют следующие характеристики: удельный вес $1,02 \text{ г/см}^3$, дозировка 0,3 - 0,6 л/м³.

Вода затворения (W), соответствующая требованиям ГОСТ 23732-2011 и TCVN 4506: 2012 [16,17].

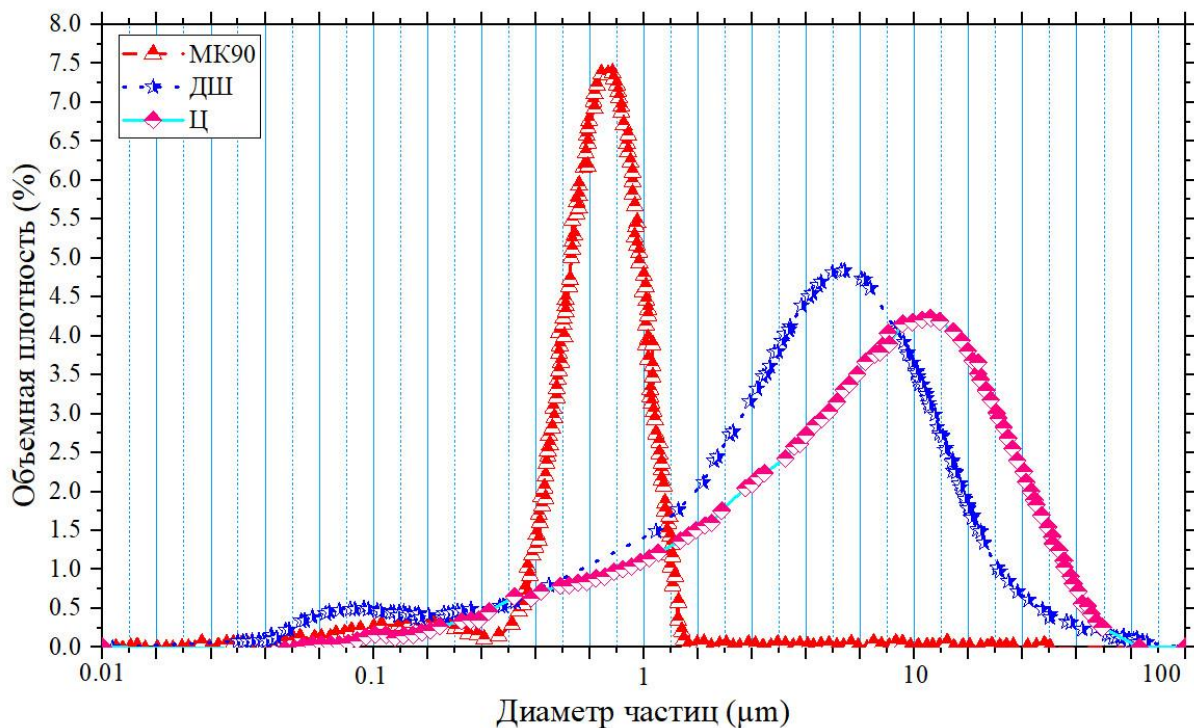


Рисунок 1 – Гранулометрический состав Ц, ДШ и МК90

Методы

Прочность на сжатие и изгиб пенобетона в возрасте 28 дней определяли по ГОСТ 10180-2012 [18].

В данной работе будет проведен анализ химического и зернистого состава Ц, ДШ и МК90 методом лазерной гранулометрии на приборе ВТ-9300Z (Китай). С другой стороны, применяется метод расчета состава бетонной смеси методом абсолютного объема Австралийского стандарта [19].

Влияние микрокремнезема SF90, отношения воды/цементно-доменного шлака, суперпластификатор на целевые функции описывается следующим уравнением (1).

$$Y_1 = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{31} x_3 x_1 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (1)$$

Результаты

В данном исследовании количество цемента было зафиксировано $\text{OPC} = 450 \text{ кг/м}^3$ [2]. На основе анализа научной литературы [2,3,5,6,11,12] и результатов экспериментальных исследований.

Соотношение выбранных компонентов материала следующее:

$$\begin{aligned}
 & B \\
 & - x_1 - \text{отношение } \frac{Ц + ДШ}{SR5000} \text{ от } 0,2 \text{ до } 0,22; \\
 & - x_2 - \text{отношение } \frac{Ц}{MK90} \text{ от } 0,01 \text{ до } 0,02. \\
 & - x_3 - \text{отношение } Ц \text{ от } 0,05 \text{ до } 0,15.
 \end{aligned}$$

Количество испытаний N определяется по формуле (2):

$$N = 2^3 = 8 \quad (2)$$

Таблица 2 - Ортогональный план эксперимента

№ п/п	В виде переменных			В натуральном виде		
	x_1	x_2	x_3	$\frac{B}{Ц + ДШ}$	$\frac{SR5000}{Ц}$	$\frac{MK90}{Ц}$
1	+1	+1	+1	0,22	0,02	0,15
2	-1	+1	+1	0,20	0,02	0,15
3	+1	-1	+1	0,22	0,01	0,15
4	-1	-1	+1	0,20	0,01	0,15
5	+1	+1	-1	0,22	0,02	0,05
6	-1	+1	-1	0,20	0,02	0,05
7	+1	-1	-1	0,22	0,01	0,05
8	-1	-1	-1	0,20	0,01	0,05

Таблица 3 - Кодовые и реальные значения переменных факторов эксперимента

Коды	В виде переменных		
	x_1	x_2	x_3
-1	0,20	0,01	0,05
0	0,21	0,15	0,10
+1	0,22	0,02	0,15

Состав и механические свойства пенобетона в возрасте 28 суток представлены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4 - Составы и прочность на изгиб образцов пенобетона в возрасте 28 суток

п/п	Компоненты пенобетона						Прочность на изгиб R_{fs}^{28} , МПа						S_{li}^2
	Ц	ДШ	SR5000	MK90	В	ПО (л)	$R_{из1}$	$R_{из2}$	$R_{из3}$	$Y_{li}^{cp} = R_{изi}^{cp}$	\bar{R}_i	$(Y_{li}^{cp} - \bar{Y}_{li})^2$	
1	450	926	9,0	68	302,7	111,71	6,01	5,94	5,96	5,97	5,802	0,02834	0,00130
2	450	926	9,0	68	275,2	139,23	6,21	6,25	6,17	6,21	6,307	0,00934	0,00160
3	450	926	4,5	68	302,7	115,80	5,95	5,88	5,92	5,92	5,802	0,01323	0,00123
4	450	926	4,5	68	275,2	143,32	6,09	6,15	6,12	6,12	6,307	0,03484	0,00090
5	450	926	9,0	23	302,7	132,64	5,17	5,12	5,48	5,26	5,255	0,00000	0,03803
6	450	926	9,0	23	275,2	160,16	6,07	5,98	6,05	6,03	5,760	0,07471	0,00223
7	450	926	4,5	23	302,7	136,73	4,78	5,08	5,05	4,97	5,255	0,08123	0,02730
8	450	926	4,5	23	275,2	164,25	5,71	5,77	5,83	5,77	5,760	0,00010	0,00360
Max $S^2 = 0,03803$					$\sum (Y_{li}^{cp} - \bar{Y}_{li})^2 = 0,24179$				$\sum S_{li}^2 = 0,07620$				

Таблица 5 - Составы и прочность на сжатие образцов пенобетона в возрасте 28 суток

п/п	Компоненты пенобетона						Прочность на сжатие $R_{сж}^{28}$, МПа						S_{21}^2
	Ц	ДШ	SR5000	МК90	В	ПО (л)	$R_{сж1}$	$R_{сж2}$	$R_{сж3}$	$Y_{2i}^{cp} = R_{uji}^{cp}$	\bar{R}_i	$(Y_{2i}^{cp} - \bar{Y}_{2i})^2$	
1	450	926	9,0	68	302,7	111,71	39,5	38,7	38,1	38,77	37,646	1,25627	0,49333
2	450	926	9,0	68	275,2	139,23	42,6	42,8	41,4	42,27	42,121	0,02127	0,57333
3	450	926	4,5	68	302,7	115,80	37,5	36,2	38,7	37,47	37,646	0,03210	1,56333
4	450	926	4,5	68	275,2	143,32	40,2	42,3	40,6	41,03	42,121	1,18266	1,24333
5	450	926	9,0	23	302,7	132,64	33,8	33,1	34,7	33,87	33,421	0,19877	0,64333
6	450	926	9,0	23	275,2	160,16	39,1	40,8	39,6	39,83	37,896	3,75391	0,76333
7	450	926	4,5	23	302,7	136,73	31,2	31,1	33,8	32,03	33,421	1,92516	2,34333
8	450	926	4,5	23	275,2	164,25	36,2	36,7	37,8	36,90	37,896	0,99168	0,67000
Max $S^2 = 2,34333$					$\sum (Y_{2i}^{cp} - \bar{Y}_{2i})^2 = 9,36181$				$\sum S_{2i}^2 = 8,29333$				

Процесс экспериментов проводится согласно таблице 2, 3. Результаты экспериментов представлены в таблицах 4 и 5. Из таблиц 4 и 5 получаем коэффициенты уравнений регрессии $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_{12}, \beta_{23}, \beta_{31}, \beta_{123}$. Значения коэффициентов уравнения регрессии определяются по критерию Стьюдента. Уравнение регрессии первого порядка определялось по результатам стандартного численного теста Фишера. Коэффициент уравнения регрессии представлен в таблице 6.

Коэффициенты уравнения регрессии рассчитываются по формулам [20]

$$\beta_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} y_j}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2} \quad \forall j=1..n; \beta_{ju} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2 x_{ui} y_j}{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2 x_{ui}^2} \quad \forall j,u=1..n; j \neq u$$

Таблица 6 - Коэффициенты уравнений регрессии

β_i Y_i	β_0	β_1	β_2	β_3	β_{12}	β_{23}	β_{31}	β_{123}
Y_1 $R_{из}^{28}$, МПа	5,781	-0,253	0,087	0,273	-0,002	-0,051	0,142	-0,008
Y_2 $R_{сж}^{28}$, МПа	37,771	-2,238	0,913	2,113	-0,129	-0,279	0,471	0,146

Из таблицы 6 можно записать уравнение регрессии, описывающее зависимость входных факторов от прочности на сжатие и изгиб пенобетона в возрасте 28 суток.

$$Y_1 = 5,781 - 0,253x_1 + 0,087x_2 + 0,273x_3 - 0,002x_1x_2 - 0,051x_2x_3 + 0,142x_3x_1 - 0,008x_1x_2x_3 \quad (3)$$

$$Y_2 = 37,771 - 2,238x_1 + 0,913x_2 + 2,113x_3 - 0,129x_1x_2 - 0,279x_2x_3 + 0,471x_3x_1 - 0,141x_1x_2x_3 \quad (4)$$

Проверка воспроизводимости экспериментов

Метод проверки повторяемости по критериям Кохрана, Формула рассчитывала рассчитанное значение по критериям Кохрана.

$$G_{pacc} = \frac{\max S^2}{\sum S_i^2}$$

По литературным данным [21] критические значения для критерия Кохрана $G_{cr} = 0,5157$.

Для целевой функции прочности на изгиб.

Из формулы (4) имеем $G_{pacc} = 0,49913 < G_{cr} = 0,5157$

Для целевой функции прочности на сжатие: $G_{pacc} = 0,28256 < G_{cr} = 0,5157$

Следовательно, гипотеза однородности удовлетворяет условию $F_{pacc} < F_{tab}$,

Проверить коэффициенты уравнения регрессии

Коэффициент t_{bj} считается существенным, если $t_{bj} \geq t_{\alpha}(f)$,

Согласно [21] $t_{\alpha}(f) = 2,1199$.

Формула определяла t_{bj} :

$$t_{bj} = \frac{|b_j|}{S_{ve}}$$

$$S_{ve} = \sqrt{\frac{S_{ll}^2}{N}},$$

Значения t_{bj} для проверки значимости коэффициентов уравнения регрессии (3) и (4) показаны в таблицах 7 и 8.

Таблица 7- Коэффициент t_{bj} для целевой функции прочности на изгиб

j	0	1	2	3	4	5	6	7
β_j	β_0	β_1	β_2	β_3	β_{12}	β_{23}	β_{31}	β_{123}
	5,781	-0,253	0,087	0,273	-0,002	-0,051	0,142	-0,008
$ \beta_j $	5,781	0,253	0,087	0,273	0,002	0,051	0,142	0,008
t_{bj}	59,232	-2,587	0,888	2,801	-0,017	-0,521	1,452	-0,077

Таблица 8- Коэффициент t_{bj} для целевой функции прочности на сжатие

j	0	1	2	3	4	5	6	7
β_j	β_0	β_1	β_2	β_3	β_{12}	β_{23}	β_{31}	β_{123}
	37,771	-2,238	0,913	2,113	-0,129	-0,279	0,471	0,146
$ \beta_j $	37,771	2,238	0,913	2,113	0,129	0,279	0,471	0,146
t_{bj}	37,097	-2,198	0,896	2,075	-0,127	-0,274	0,462	0,143

После проверки коэффициентов мы получили уравнение;

$$Y_1 = 5,781 - 0,253x_1 + 0,273x_3 \quad (5)$$

$$Y_2 = 39,771 - 2,238x_1 + 2,113x_3 \quad (6)$$

Проверить справедливость уравнений (5) и (6)

Проверить справедливость уравнений удовлетворяют условию;

$$F_{fc} < F_{tab}$$

где согласно документу [21] $F_{tab} = 3,69$.

$$F_{fc} = \frac{S_{av}^2}{S_{ll}^2}$$

$$S_{av}^2 = \frac{\sum (Y_i^{cp} - \bar{Y}_i)^2}{N - m}$$

Следовательно;

$$\Rightarrow F_{fc8} = \frac{S_{av}^2}{S_{ll}^2} = 0,63462 \Rightarrow F_{fc8} = 0,63462 < F_{tab} = 3,69$$

$$\Rightarrow F_{fc9} = \frac{S_{av}^2}{S_{ll}^2} = 0,22577 \Rightarrow F_{fc9} = 0,22577 < F_{tab} = 3,69$$

Таким образом, уравнения (5) и (6) удовлетворяют $F_{fc} < F_{tab}$

Изолинии регрессионных моделей для прочности при изгибе и сжатии приведены на рисунках 2 и 3.

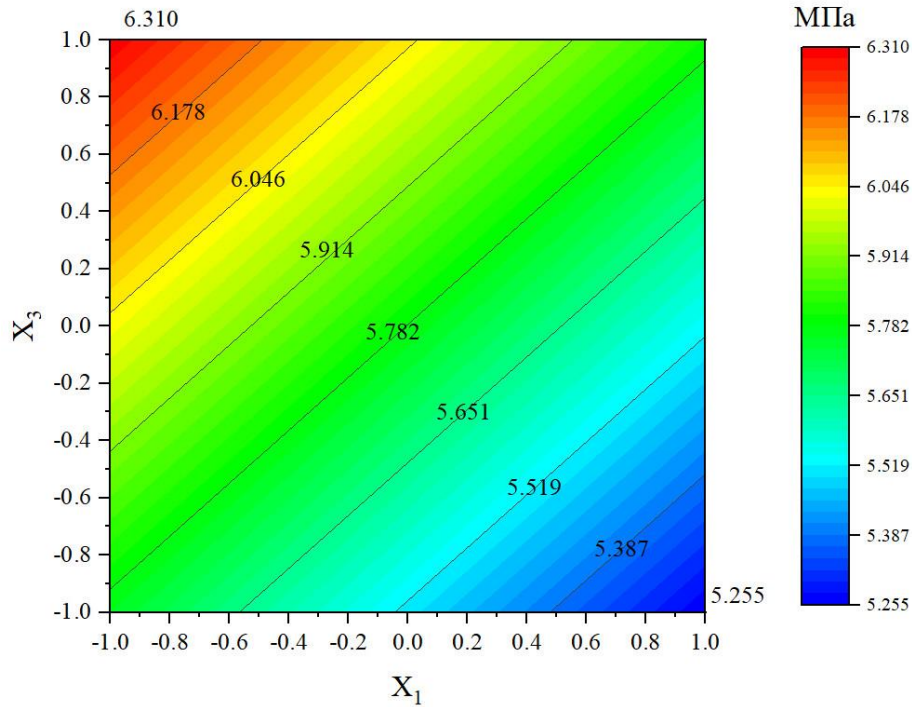


Рисунок 2 - Влияние X_1 и X_3 на прочность при изгибе

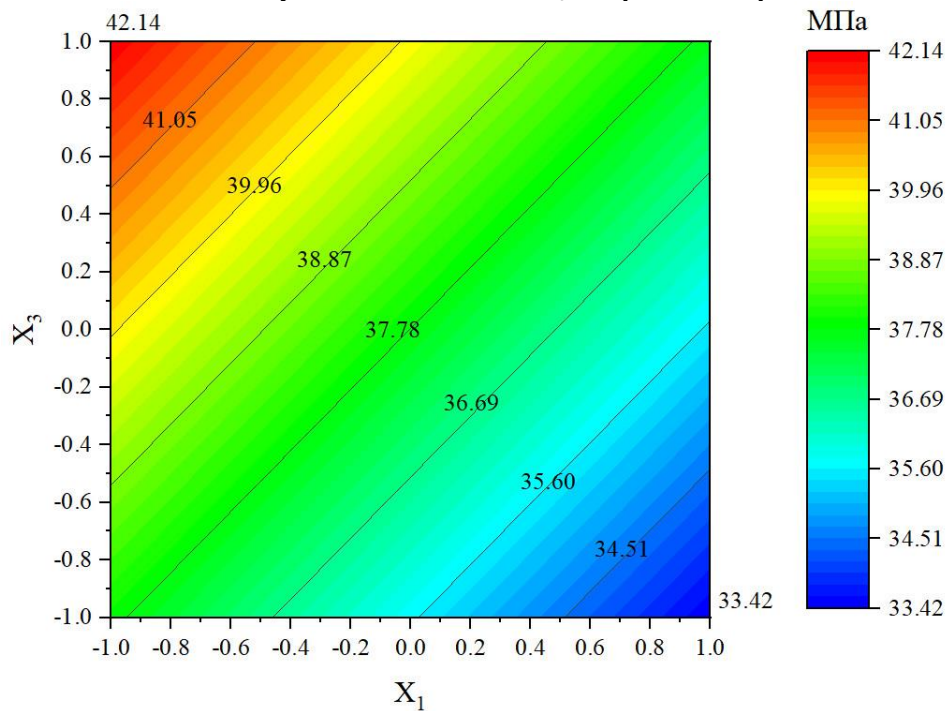


Рисунок 3 - Влияние X_1 и X_3 на прочность при сжатии

Выводы

По результатам исследований сделаны следующие заключения:

1. Статическая обработка результатов, выполняемая математическими методами для планирования экспериментов по оптимизации состава проектируемого пенобетона, с определенной вероятностью и количеством повторных испытаний. Затем образцы пенобетона сравнивают с результатами, полученными различными методами.

2. Полученные уравнения регрессии первого порядка (5) и (6) описывают зависимость прочности на сжатие и изгиб пенобетона через 28 дней в зависимости от переменных x_1 и x_3 .

3. Из рисунков 2 и 3 установлено, что, когда уменьшение (x_1) и увеличение (x_3) приводит к увеличению прочности на сжатие и прочности на изгиб образца пенобетона, влиянием (x_2) можно пренебречь из-за не сильно влияет.

4. Следующий, авторы продолжают изучение влияния коэффициентов $x_1 \left(\frac{B}{C + \frac{D}{\sqrt{H}}} \right)$ и $x_3 \left(\frac{C}{H} \right)$ на механические свойства пенобетона методом центрального композитного проектирования для двух входных факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Williams H.P. Model Building in Mathematical Programming. 2013. 411 p.
2. Trong C.N., Xuan B.L. Уменьшение разницы температур в массивном бетоне за счет утепления поверхности // Журнал гражданского строительства. 2019. №4(88). С. 70–79. DOI: 10.18720/MCE.88.7.
3. Лам Т.В., Бу Д., Зиен В., Булгаков Б.И., Король Е.А. Свойства и теплоизоляционные эффективности легких бетонов // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 8. С. 173–191. DOI: 10.18720/MCE.84.17. (rus)
4. Wang B., Xia X., Zhang J. Многоцелевая модель оптимизации для анализа затрат жизненного цикла и планирования модернизации зданий // Энергия и здания. 2014. № 77. С. 227–235. DOI:10.1016/j.enbuild.2014.03.025.
5. Aniskin N., Nguyen T. Факторы влияния на температурное поле в массивном бетоне. E3S Сеть конференций. 2019. 05021(97). С. 9. DOI://doi.org/10.1051/e3sconf/20199705021.
6. Dvorkin L., Bezusyak A., Lushnikova N., Ribakov Y. Using mathematical modeling for design of self compacting high strength concrete with metakaolin admixture. Construction and Building Materials. 2012. No. 37. Pp. 851–864. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.04.019.
7. Sergeyevich A.A. Математическая теория экспериментального проектирования и планирования эксперимента в коммуникационных технологиях // Технологии информационного общества. 2012. №8. С. 3-5.
8. Song L., AbouRizk S M. Виртуальная модель цеха для экспериментального планирования проектов изготовления металлоконструкций // Журнал вычислительной техники в гражданском строительстве. 2006. №20(5). С. 308–316. DOI:10.1061/(asce)0887-3801(2006)20:5(308).
9. Pavlovna A.T. Методология планирования экспериментов. Сборник лабораторных работ для студентов специальности. 2006. 35 с.
10. Chuc N.T., Bui A.K. Evaluation of the impact of parameter inputs of concrete mix on the. Structural integrity and life. 2019. 19(1). Pp. 8–12.
11. Steshenko A.B., Kudyakov A.I. Цементный пенобетон с алюмосиликатной микросферой для монолитного домостроения // Инженерно-строительный журнал. 2018. №8(84). С. 86–96. DOI:10.18720/MCE.84.9.
12. Rybakov V A., Kozinets K G., Vatin N I., Velichkin V Z., Korsun V I. Технология изготовления легких железобетонных конструкций с использованием листов пенобетона и цемента // Инженерно-строительный журнал. 2018. №6(82). С. 103–111. DOI:10.18720/MCE.82.10.
13. Gökçe H.S., Hatungimana D., Ramyar K. Effect of fly ash and silica fume on hardened properties of foam concrete. Construction and Building Materials. 2019. 11 p. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.036.
14. Dien V.K., Ly N.C., Lam T.V., Bazhenova S.I. Пенобетон с различным содержанием органо-минеральных добавок // Journal of Physics: Серия конференций. 2020. Vol. 1425. P. 10 DOI:10.1088/1742-6596/1425/1/012199.
15. Бу К.З., Баженова С.И., Тан В.Л. Влияние минеральных добавок, летучей золы, доменного шлака на механические свойства пенобетона. Строительство и реконструкция. 2020. №2 (88). С. 25–34. URL: DOI. 10.33979/2073-7416-2020-88-2-25-34.
16. Вода для бетона и раствора. Технические условия. Стандартный Вьетнам. TCVN - 4506:2012. 2012. 7 с.
17. Вода для бетона и раствора. Технические условия. Стандартный русский. ГОСТ-23732-2011. 2012. 21 с.
18. Concrete Methods for determining the strength of the control samples. Standard Russian. GOST-10180-2012. 2013. 36 p.
19. Методы испытания бетона. Австралийский стандарт. AS 1012.21994. 17С.
20. Баженов Ю.М. Технология бетона. АСВ 2011. 524 с.
21. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. Москва 1983. 416 с.

REFERENCES

1. Williams H.P. Model Building in Mathematical Programming. 2013. 411 p.
2. Trong C.N., Xuan B.L. Reducing temperature difference in mass concrete by surface insulation. // Magazine of Civil Engineering. 2019. No. 4(88). Pp. 70–79. DOI: 10.18720/MCE.88.7.
3. Tang V.L., Dinh T.V., Vu K.D., Bulgakov B.I., Korol' Y.A. Properties and thermal insulation performance of light-weight concrete // Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 8. Pp. 173–191. DOI: 10.18720/MCE.84.17. (rus)
4. Wang B., Xia X., Zhang J. A multi-objective optimization model for the life-cycle cost analysis and retrofitting planning of buildings // Energy and Buildings. 2014. No. 77. Pp. 227–235. DOI:10.1016/j.enbuild.2014.03.025.
5. Aniskin N., Nguyen T. Influence factors on the temperature field in a mass concrete. E3S Web of Conferences. 2019. 05021(97). Pp. 9. DOI://doi.org/10.1051/e3sconf/20199705021.
6. Dvorkin L., Bezusyak A., Lushnikova N., Ribakov Y. Using mathematical modeling for design of self compacting high strength concrete with metakaolin admixture. Construction and Building Materials. 2012. No. 37. Pp. 851–864. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.04.019.
7. Sergeyevich A.A. The mathematical theory of experimental design and planning an experiment in communication technology // Information Society Technologies. 2012. No. 8. Pp. 3–5.
8. Song L., AbouRizk S M. Virtual shop model for experimental planning of steel fabrication projects // Journal of Computing in Civil Engineering. 2006. No. 20(5). Pp. 308–316. DOI:10.1061/(asce)0887-3801(2006)20:5(308).
9. Pavlovna A.T. Experiment Planning Methodology. Collection of laboratory works for students of the specialty. 2006. 35 p.
10. Chuc N.T., Bui A.K. Evaluation of the impact of parameter inputs of concrete mix on the. Structural integrity and life. 2019. 19(1). Pp. 8–12.
11. Steshenko A.B., Kudyakov A.I. Cement based foam concrete with aluminosilicate microspheres for monolithic construction. Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 8(84). Pp. 86–96. DOI:10.18720/MCE.84.9. (rus)
12. Rybakov V.A., Kozinets K.G., Vatin N.I., Velichkin V.Z., Korsun V.I. Lightweight steel concrete structures technology with foam fiber-cement sheets. Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 6(82). Pp. 103–111. DOI:10.18720/MCE.82.10. (rus)
13. Gökçe H.S., Hatungimana D., Ramyar K. Effect of fly ash and silica fume on hardened properties of foam concrete. Construction and Building Materials. 2019. 11 p. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.036.
14. Dien V.K., Ly N.C., Lam T.V., Bazhenova S.I. Foamed concrete containing various amounts of organic-mineral additives. Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1425. Pp. 10. DOI:10.1088/1742-6596/1425/1/012199.
15. Vu K D., Bazhenova S I., Tang V.L. The effect of mineral additives, fly ash, blast furnace slag on the mechanical properties of foam concrete. Construction and Reconstruction. 2020. No. 2 (88). Pp. 25–34. URL: DOI. 10.33979/2073-7416-2020-88-2-25-34. (rus)
16. Water for concrete and mortar - Technical specification. Standard Vietnam. TCVN - 4506:2012. 2012. 7 p.
17. Water for concrete and mortar. Technical conditions. Standard Russian. GOST-23732-2011. 2012. 21 p. (rus)
18. Concrete Methods for determining the strength of the control samples. Standard Russian. GOST-10180-2012. 2013. 36p. (rus)
19. Methods of testing concrete. Australian Standard. AS 1012.21994. 17p.
20. Bazhenov YU M. Concrete technology. ACB 2011. 524p. (rus)
21. Bol'shev L.N., Smirnov N.V. Math Statistics Tables. Moscow 1983. 416 p. (rus)

Информация об авторах:

Ву Ким Зиен

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия, аспирант кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов.

E-mail: kimdienxdtb@gmail.com

Баженова Софья Ильдаровна

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов.

E-mail: BazhenovaSI@mgsu.ru

Танг Ван Лам

Ханойский горно-геологический университет, Ха Ной, Вьетнам, кандидат технических наук, доцент факультета гражданского строительства.

E-mail: lamvantang@gmail.com

Фан Хань Хань

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия, аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства.

E-mail: Pkhanhkhanh@gmail.com

Information about authors:

Vu Kim Dien

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, postgraduate student, department of technologies of cohesive materials and concretes.

E-mail: kimdienxdtb@gmail.com

Bazhenova Sofya I.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, candidate, associate professor of department of technologies of cohesive materials and concretes.

E-mail: BazhenovaSI@mgsu.ru

Tang Van Lam

Hanoi University of Mining and Geology, Ha Noi, Vietnam, Ph.D., associated professor of civil engineering faculty.

E-mail: lamvantang@gmail.com

Phan Khanh Khanh

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, postgraduate student, department of hydraulics and hydrotechnical engineering.

E-mail: Pkhanhkhanh@gmail.com