

УДК 691.327.333

*Вишторский Е. М.**(ЛНАУ, г. Луганск, ЛНР, vishtorsky@gmail.com),**к.т.н. Назарова А. В.**(ИСА и ЖКХ ЛНУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР, Nazarova-Anto@yandex.ua),**Сороканич С. В.**(ЛНАУ, г. Луганск, ЛНР, stas.sorokanich.82@mail.ru)*

### ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЦЕПТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЕНОБЕТОНА НОРМАЛЬНОГО ТВЕРДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ТРЁХФАКТОРНОГО ПЛАНИРОВАННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

*В данной статье приведены математические модели зависимости средней плотности и прочности пенобетона от переменных факторов — водоцементного отношения (В/Ц), количества водоредуцирующей химической добавки и времени перемешивания пенобетонной смеси. С привлечением программных комплексов PlanExp B-D13 и Mathcad удалось выявить наиболее оптимальные рецептурно-технологические параметры изготовления пенобетона, а именно более высокий показатель по прочности на сжатие при его минимальной средней плотности.*

**Ключевые слова:** *пенобетон, водоцементное отношение, водоредуцирующая добавка, прочность, плотность, математическое планирование.*

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** При проектировании неавтоклавных цементных пенобетонов существует необходимость получения пенобетона с наиболее минимальными значениями средней плотности и коэффициента теплопроводности, малой сорбционной влажностью, достаточной морозостойкостью, а также высокой прочностью [1, 2]. Для уменьшения ошибочных или ненадёжных решений проектирования необходимы системный подход и использование современной вычислительной техники для всестороннего анализа и выбора путей оптимизации рецептурных и технологических параметров производства пенобетонов [3].

Для получения оптимальной пористой структуры пенобетона необходимо подобрать такой состав пенобетонной смеси, при котором требуемые проектные характеристики достигаются при меньшем расходе вяжущего, пенообразователя и воды с одновременным обеспечением наибольшей однородности свойств пенобетона [4].

В технологии бетона применяются различные математические методы, которые

условно можно классифицировать на три группы [5]:

1) вероятностно-статистические методы, включающие использование общей теории вероятности, описательной статистики, выборочного метода и проверку статистических гипотез, дисперсного и регрессионного анализа, математической теории экспериментов и др.;

2) методы исследования операций, которые включают линейное, нелинейное и динамическое программирование, теорию игр, теорию массового обслуживания, теорию графов и сетей и т. д.;

3) методы математического анализа, включающие дифференциальное, интегральное и векторное исчисление, дифференциальные уравнения, в том числе уравнения математической физики, используемые для составления и расчёта математических моделей на основе определённых предпосылок о физикохимии исследуемых процессов [6].

При использовании современных вычислительных математических программных комплексов появляется возможность с минимальными затратами материальных и

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

временных ресурсов получить необходимую информацию для построения математических моделей.

**Постановка задачи.** Задачей экспериментальных исследований является поиск оптимальных рецептурно-технологических параметров, влияющих на основные физико-механические характеристики неавтоклавно пенобетона — плотность и прочность.

**Изложение материала и его результаты.** Составы неавтоклавно пенобетона рассчитаны с учётом действующих нормативно-технических документов СН 277–80 [7] и ГОСТ 25485–89 [8]. Приготовление пенобетонной смеси осуществлялось по одностадийной технологии с использованием высокооборотного смесителя.

В качестве рассматриваемых переменных факторов при планировании эксперимента принято:

$X_1$  — водоцементное отношение;

$X_2$  — количество водоредуцирующей добавки «Хемикс Art-2» — % от расхода цемента;

$X_3$  — время перемешивания пенобетонной смеси, мин.

В качестве выходных параметров выбраны:

$Y_1$  — средняя плотность пенобетона,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$Y_2$  — прочность на сжатие при нормальном твердении в 28 суток, МПа.

При разработке математической модели использовалось программно-алгоритмическое средство обработки данных PlanExp B-D13. Графическая интерпретация результатов выполнена в программном комплексе Mathcad.

Факторы и интервалы их варьирования представлены в таблице 1, матрица планирования эксперимента и выходные параметры опытов — в таблице 2, коэффициенты математических моделей — в таблице 3.

Таблица 1  
Факторы и интервалы их варьирования

Факторы		$X_1$	$X_2$	$X_3$
Уровни факторов	Нижний уровень (–1)	0,38	0,6	3
	Основной уровень (0)	0,4	0,85	4
	Верхний уровень (+1)	0,42	1,1	5
Интервал варьирования		0,02	0,25	1

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента и выходные параметры опытов

№ опыта	Матрица планирования			Натуральные значения переменных			$Y_1$ — средняя плотность в сух. состоянии, $\text{кг}/\text{м}^3$			$Y_2$ — прочность в 28 сут, МПа		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$
1	–1	–1	–1	0,38	0,6	3	730	741	732	2,5	2,6	2,3
2	+1	–1	–1	0,42	0,6	3	621	630	633	3,2	3,3	3,4
3	–1	+1	–1	0,38	1,1	3	592	588	590	1,5	1,7	2,0
4	–1	–1	+1	0,38	0,6	5	640	635	648	2,3	1,9	2,2
5	–1	0,19	0,19	0,38	0,89	4,19	551	565	542	2,7	2,5	2,2
6	0,19	–1	0,19	0,404	0,6	4,19	590	598	599	1,6	1,5	1,5
7	0,19	0,19	–1	0,404	0,89	3	521	543	532	1,7	2,2	2,2
8	–0,29	+1	+1	0,394	1,1	5	452	443	449	1,4	1,7	1,5
9	+1	–0,29	+1	0,42	0,778	5	411	422	421	1,6	1,3	1,7
10	+1	+1	–0,29	0,42	1,1	3,71	530	542	530	2,7	2,5	3,0

Таблица 3

Коэффициенты уравнений математических моделей

	b0	b1	b2	b3	b11	b12	b13	b22	b23	b33
Y <sub>1</sub>	506,296	-42,986	-53,055	-58,195	25,074	20,535	-10,174	59,375	-1,251	-20,493
Y <sub>2</sub>	1,761	-0,235	0,291	-0,358	0,517	0,099	0,032	0,139	-0,224	-0,162

Проверка значимости коэффициентов математических моделей выполнена по критерию Стьюдента и представлена в таблице 4. Адекватность математических моделей проверена по критерию Фишера.

Значения критерия Фишера для Y<sub>1</sub>: табличное — 4,35; расчётное — 3,12.

Значения критерия Фишера для Y<sub>2</sub>: табличное — 2,87; расчётное — 2,79.

Таблица 4

Критерии Стьюдента и значимость коэффициентов модели

Коэффициенты	Y <sub>1</sub>		Y <sub>2</sub>	
	t-критерий	Значимость*	t-критерий	Значимость*
b0	76,674	1	9,223	1
b1	15,21	1	2,876	1
b2	18,773	1	3,561	1
b3	20,592	1	4,381	1
b11	4,59	1	3,273	1
b12	6,095	1	1,016	0
b13	3,02	1	0,328	0
b22	10,87	1	0,88	0
b23	0,371	0	2,299	1
b33	3,752	1	1,026	0

Значимость\* — 1/0 — значимый/незначимый

В результате расчёта в программном комплексе PlanExp B-D13 получены математические модели зависимости в кодированном виде для средней плотности пенобетона в сухом состоянии и прочности в 28 суток. Алгоритм программы включает основные процедуры — расчёт коэффициентов функции отклика и статистическую обработку математической модели. Все основные вычисления производятся циклично, что позволяет моментально пере-

страивать математическую модель, изменяя входные данные.

Математическая модель зависимости от переменных факторов (X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub>) для средней плотности пенобетона в сухом состоянии:

$$Y_1 = 506,296 - 42,986 \cdot X_1 - 53,055 \cdot X_2 - 58,195 \cdot X_3 + 25,074 \cdot X_1^2 + 59,375 \cdot X_2^2 - 20,493 \cdot X_3^2 + 20,535 \cdot X_1 \cdot X_2 - 10,174 \cdot X_1 \cdot X_3 - 1,251 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (1)$$

Математическая модель зависимости от переменных факторов (X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub>) для прочности пенобетона в 28 суток:

$$Y_2 = 1,761 - 0,235 \cdot X_1 + 0,291 \cdot X_2 - 0,358 \cdot X_3 + 0,517 \cdot X_1^2 + 0,139 \cdot X_2^2 - 0,162 \cdot X_3^2 + 0,099 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,032 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,224 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (2)$$

Поскольку для графической интерпретации функции трёх переменных требуется четырёхмерное пространство, с целью визуального упрощения и удобства работы с математической моделью функцию трёх переменных необходимо преобразовать в функцию двух переменных, поочередно принимая константой один из факторов. На основании полученных математических моделей для средней плотности пенобетона в сухом состоянии и его прочности в 28 суток построены графические интерпретации поверхностей откликов в программном комплексе Mathcad (рис. 1–6). Для построения поверхности каждый из факторов фиксировался на нулевом уровне. Для определения приемлемых значений варьируемых факторов выполнен поиск компромиссных значений с помощью анализа сечений поверхностей откликов.

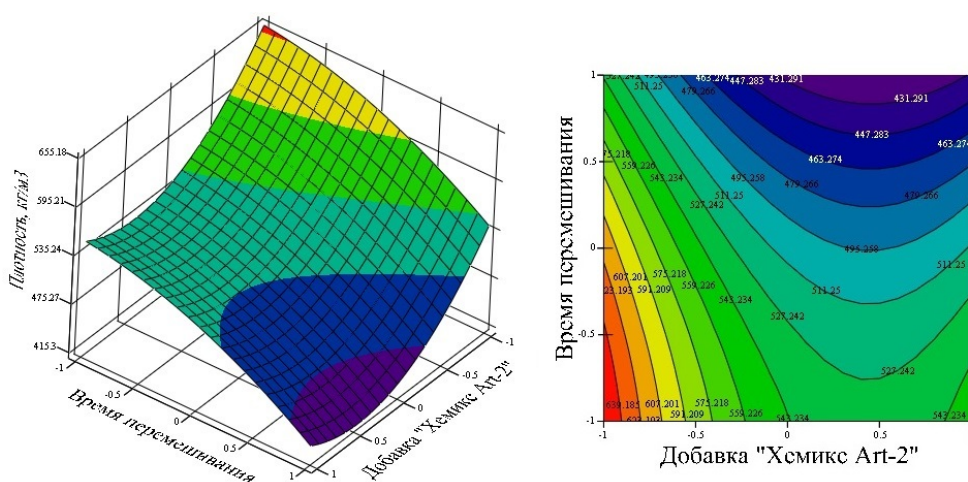


Рисунок 1 Поверхность отклика при нулевом уровне В/Ц,  $Y_1 = f(X_2, X_3)$

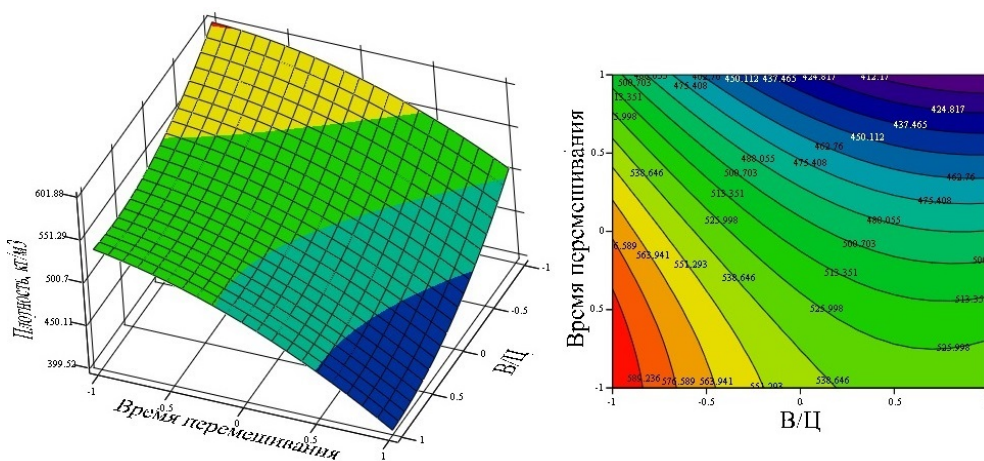


Рисунок 2 Поверхность отклика при нулевом уровне количества введённой добавки «Хемикс Арт-2»,  $Y_1 = f(X_1, X_3)$

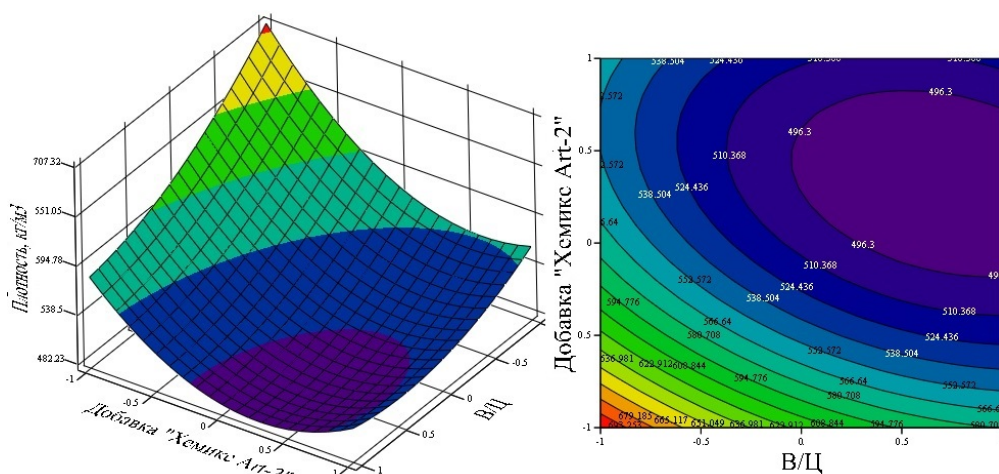


Рисунок 3 Поверхность отклика при нулевом уровне времени перемешивания пенобетонной смеси,  $Y_1 = f(X_1, X_2)$

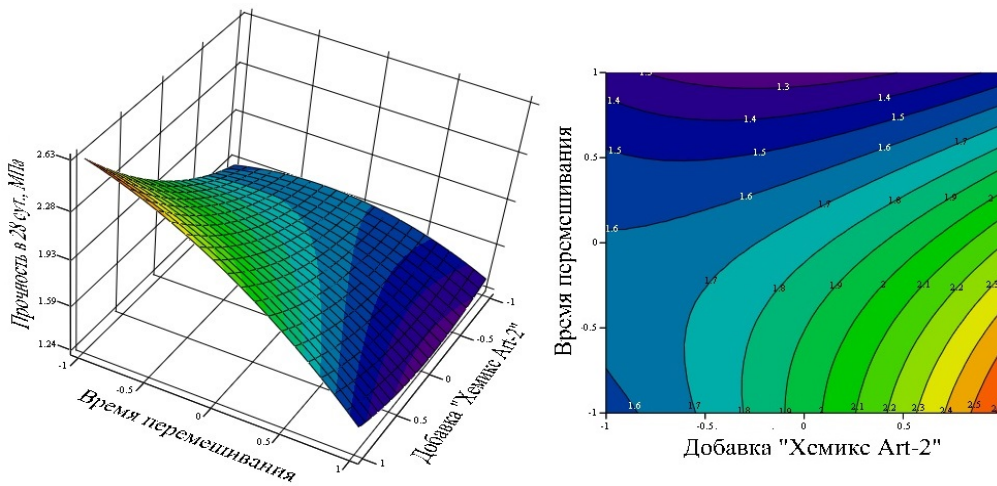


Рисунок 4 Поверхность отклика при нулевом уровне В/Ц,  $Y_2 = f(X_2, X_3)$

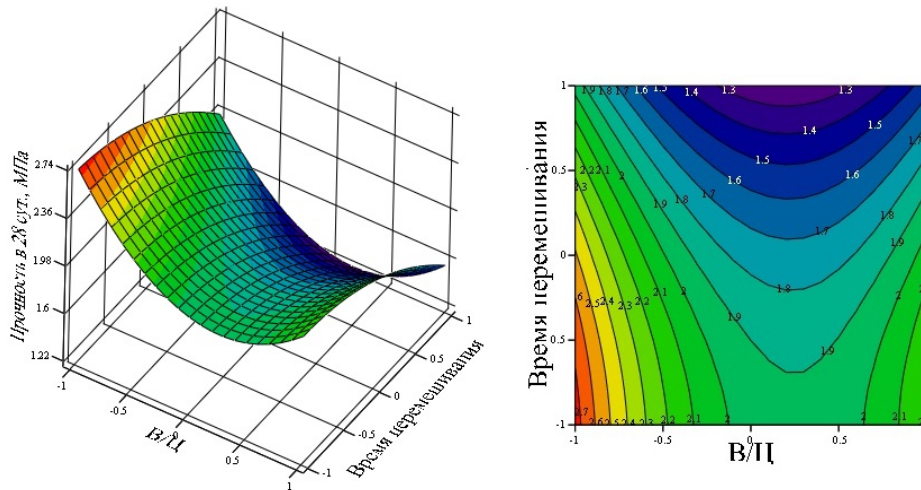


Рисунок 5 Поверхность отклика при нулевом уровне количества введённой добавки «Хемикс Art-2»,  $Y_2 = f(X_1, X_3)$

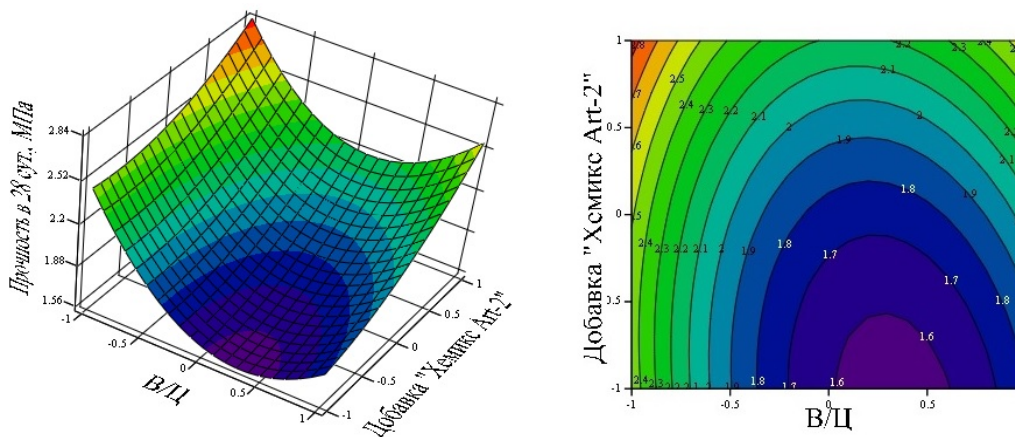


Рисунок 6 Поверхность отклика при нулевом уровне времени перемешивания пенобетонной смеси,  $Y_2 = f(X_1, X_2)$

При выполнении анализа сечений поверхностей откликов минимальная средняя плотность неавтоклавного пенобетона достигается при:

- В/Ц = 0,42;
- количестве введённой водоредуцирующей добавки «Хемикс Art-2» 0,9 % от массы цемента;
- времени перемешивания пенобетонной смеси 4,5...5 мин.

Наибольшее значение прочности неавтоклавного пенобетона достигается при:

- В/Ц = 0,38;
- количестве введённой водоредуцирующей добавки «Хемикс Art-2» 1,1 % от массы цемента;
- времени перемешивания пенобетонной смеси 5 мин.

При решении компромиссной задачи требовалось найти значения факторов, обеспечивающих максимально возможную прочность на сжатие при значениях средней плотности на допустимом уровне. В таблице 5 приведены результаты оптимизации переменных факторов (в числителе в кодированном виде, в знаменателе — в натуральном выражении).

В качестве основного критерия оптимизации принят показатель прочности на сжатие при нормальном твердении в 28 суток, а в качестве дополнительного — показатель плотности.

### Библиографический список

1. Шахова, Л. Д. Повышение эффективности производства неавтоклавных пенобетонов с заданными свойствами [Текст] : дисс.... докт. техн. наук : 05.23.05 / Шахова Л. Д. ; Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. — Белгород, 2007. — 417 с.
2. Ружинский, С. И. Всё о пенобетоне [Текст] / С. И. Ружинский, А. А. Портник, А. В. Савиных. — СПб. : ООО «Стройбетон», 2006. — 636 с.
3. Кривальцевич, Т. В. Исследование физико-механических свойств пенобетона с использованием математического планирования эксперимента [Текст] / Т. В. Кривальцевич, Е. В. Гурова // Техника и технологии строительства. — 2017. — № 2 (10). — С. 54–59.
4. Стещенко, А. Б. Оптимизация технологических приёмов приготовления пенобетонной смеси [Текст] / А. Б. Стещенко, А. И. Кудяков // Актуальные проблемы современности. — 2016. — № 2. — С. 197–293.
5. Ординарцева, Н. П. Планирование эксперимента в измерениях [Текст] / Н. П. Ординарцева // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2013. — № 3. — С. 72–76.

Таблица 5  
Оптимальные значения факторов

Фактор	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
Исследование прочности на сжатие	$\frac{-1}{0,38}$	$\frac{+1}{1,1}$	$\frac{+1}{5}$
Исследование средней плотности	$\frac{+1}{0,42}$	$\frac{0}{0,9}$	$\frac{+0,75...+1}{4,5...5}$
Рекомендуемые значения факторов	$\frac{-1}{0,38}$	$\frac{+1}{1,1}$	$\frac{+0,75}{4,5}$

**Выводы.** Математический трёхфакторный планированный эксперимент с использованием современных вычислительных комплексов позволяет реализовать все возможные комбинации факторов на всех выбранных уровнях исследования с проведением наименьшего количества опытов в минимальные временные сроки.

По результатам проведённого математического трёхфакторного планированного эксперимента установлено, что оптимальные рецептурно-технологические параметры неавтоклавного цементного пенобетона достигаются при:

- 1) водоцементном отношении, равном 0,38;
- 2) количестве введённой водоредуцирующей добавки «Хемикс Art-2» 1,1 % от массы цемента;
- 3) времени перемешивания пенобетонной смеси 4,5 мин.

6. Баженов, Ю. М. Технология бетона [Текст] : учебник / Ю. М. Баженов. — [5-е изд.]. — М. : Издательство АСВ, 2011. — 525 с.

7. СН-277–80. Инструкция по изготовлению изделий из ячеистого бетона [Текст] / Госстрой России. — М. : ГУП ЦПП, 2001. — 47 с.

8. ГОСТ 25485–89. Бетоны ячеистые. Технические условия [Текст]. — М. : ИПК Издательство стандартов. — 2003. — 14 с.

© Вишторский Е. М.

© Назарова А. В.

© Сороканич С. В.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ПГСиА  
ИСА и ЖКХ ЛНУ им. В. Даля Дроздом Г. Я.,  
к.т.н., доц. каф. АЗиС ЛНАУ Скотаренко В. В.*

*Статья поступила в редакцию 04.06.19.*

**Вишторський Є. М.** (ЛНАУ, м. Луганськ, ЛНР), **к.т.н. Назарова А. В.** (ІБА та ЖКГ ЛНУ ім. В. Даля, м. Луганськ, ЛНР), **Сороканич С. В.** (ЛНАУ, м. Луганськ, ЛНР)

#### **ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЦЕПТУРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПІНОБЕТОНА НОРМАЛЬНОГО ТВЕРДІННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МАТЕМАТИЧНОГО ТРЬОХФАКТОРНОГО ПЛАНОВАНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ**

*В даній статті наведено математичні моделі залежності середньої щільності та міцності пінобетону від змінних факторів — водоцементного відношення (В/Ц), кількості водоредуруючої хімічної добавки та часу змішування пінобетонної суміші. Із залученням програмних комплексів PlanExp B-D13 та Mathcad вдалося виявити найбільш оптимальні рецептурно-технологічні параметри виготовлення пінобетону, а саме більш високий показник за міцністю на стиск при його мінімальній середній щільності.*

**Ключові слова:** пінобетон, водоцементне відношення, водоредуюча добавка, міцність, щільність, математичне планування.

**Vishtorsky E. M.** (LNAU, Lugansk, LPR, vishtorsky@gmail.com),

**PhD in Engineering Nazarova A. V.** (IBA and HCS LNU named after V. Dahl, Lugansk, LPR, Nazarova-Anto@yandex.ua), **Sorokanich S. V.** (LNAU, Lugansk, LPR, stas.sorokanich.82@mail.ru)

#### **OPTIMIZATION OF PRESCRIPTION-TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE FOAM CONCRETE OF NORMAL HARDENING WITH THE USE OF MATHEMATICAL THREE-FACTOR PLANNED EXPERIMENT**

*This article presents mathematical models of the dependence of the average density and strength of foam concrete on variable factors — water-cement ratio (W/C), the amount of water-reducing chemical additives and the mixing time of the foam concrete mix. Using a software packages PlanExp B-D13 and Mathcad, it was possible to identify the most optimal formulation and technological parameters for the production of foam concrete, namely a higher rate of compressive strength with its minimum average density.*

**Key words:** foam concrete, water-cement ratio, water reducing additive, strength, density, mathematical planning.

