

УДК 691.32

Горбач Павел Сергеевич,

к.т.н., доцент, зав кафедрой «Промышленное и гражданское строительство»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: pgs@angtu.ru

Савенков Андрей Иванович,

к.т.н., доцент кафедры «Промышленное и гражданское строительство»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: savenkov_andrey@mail.ru

Заенец Евгений Андреевич, Кетнер Андрей Владимирович,

магистранты кафедры «Промышленное и гражданское строительство»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»

КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА ПЕНОБЕТОНА

Gorbach P.S., Savenkov A.I., Saenez E.A., Ketner A.V.

COMPUTER PROGRAM FOR OPTIMIZING THE COMPOSITION OF FOAM CONCRETE

Аннотация. В статье рассмотрен метод оптимизации состава пенобетона, основанный на определении оптимального водотвердого отношения для требуемой средней плотности пенобетона. Предлагается концепция точного расчета состава пенобетона легких марок по плотности, основанная на реализации экспериментальных данных и их полной компьютерной обработке. При этом наиболее полно проявляются свойства компонентов пеносмеси и их влияние на качество готового продукта. Концепция реализована с помощью программы Excel пакета Office. В условиях производства, благодаря данной программе, можно быстро отработать составы пенобетонов различных плотностей. Это является хорошим подспорьем для технологов и специалистов предприятий, производящих товарный пенобетон и изделия из него.

Ключевые слова: пенобетон, расчет состава пенобетона, компьютерная программа, компоненты смеси пенобетона, водоцементное отношение.

Abstract. The article considers a method for optimizing the composition of foam concrete based on determining the optimal water-solid ratio for the required average density of foam concrete. The concept of accurate calculation of the composition of light grade foam concrete by density, based on the implementation of experimental data and their complete computer processing, is proposed. At the same time, the properties of the components of the foam mixture and their influence on the quality of the finished product are most fully manifested. The concept is implemented using the Excel program in the Office Suite. In production conditions, thanks to this program, you can quickly work out the compositions of foam concrete of various densities. This is a good help for technologists and specialists of enterprises that produce commercial foam concrete and products made from it.

Keywords: foam concrete, calculation of foam concrete composition, computer program, components of foam concrete mix, water-cement ratio. *Keywords: scale and correction coefficients, foam concrete, microsilica.*

Неавтоклавный пенобетон является эффективным и достаточно востребованным строительным материалом, однако его производство связано с такой проблемой как отсутствие современной методики оптимизации состава, основанной на выявлении необходимой подвижности смеси. Подвижность исходной растворной смеси матрицы, определяемой по диаметру расплыва смеси в вискозиметре Суттарда согласно СН-277-80, является в данном случае функцией многих факторов, таких как водотвердое отношение

(В/Т), процентное содержание пластификатора, качества вяжущего, доли и природы заполнителя, наличия добавок. Но главным образом она зависит от водотвердого отношения [1, 2, 3]. В/Т отношение при росте до определенной величины ведет к улучшению структуры и прочности ячеистых бетонов, но при увеличении подвижности смеси наблюдается явление расслаивания ячеистой массы и большие усадки.

Предлагается концепция точного расчета состава пенобетона легких марок по

плотности, основанная на реализации экспериментальных данных и их полной компьютерной обработке. При этом наиболее полно проявляются свойства компонентов пеносмеси и их влияние на качество готового продукта. Концепция реализована с помощью программы Excel пакета Office. Подход к определению состава пенобетона заключается в научно-обоснованном выборе компонентов исходной смеси с эмпирически выявленными характеристиками при помощи компьютерной программы для определения оптимального состава растворной смеси с целью повышения технологичности и качества пенобетона.

Получение качественных и бездефектных изделий из пенобетона возможно лишь при правильном подборе соотношения сырьевых компонентов, гранулометрического состава заполнителя, технологии подготовки пенобетонной смеси [1, 2]. Так, от количественного соотношения кремнеземистого компонента и вяжущего (З/Ц) зависит средняя плотность и прочность пенобетона, поскольку с увеличением содержания кремнеземистого компонента средняя плотность пенобетона увеличивается, а прочность – уменьшается.

По параметру прочности на сжатие весьма значимым фактором является водотвердое (В/Т) или для легких марок пенобетона - водоцементное отношение - В/Ц. В свою очередь, данное отношение зависит от состава и марки применяемого вяжущего, вида и крупности заполнителя, наличия в смеси пластифицирующих или регулирующих добавок и других элементов. Например, в частном случае, при рассмотрении зависимости прочности пенобетона марки по плотности D500 от водоцементного отношения, можно сделать следующее наблюдение: первоначально при В/Ц в диапазоне от 0,3 до 0,5 прочность растет, что связано с обеспечением необходимой и достаточной подвижности смеси (рис. 1). При В/Ц от 0,45 до 0,55 – достигается оптимальный диапазон параметра В/Ц, но в дальнейшем прочность снижается по причине избыточного разжижения раствора, следовательно, при оптимизации состава необходимо выдерживать В/Ц отношение в таком диапазоне [4, 5].

Для начала расчета вводятся характеристики пенобетона, которыми необходимо задаться как исходными: средняя плотность D, соотношение заполнителя к вяжущему

З/Ц. Заполнителем может приниматься мелкий песок с модулем крупности не более 0,8; отсев дробления горных пород, прошедший сито 0,63; зола-унос ТЭЦ, микрокремнезем и т.д. Каждый из заполнителей специфически влияет на подвижность растворной смеси, выраженную в сантиметрах по вискозиметру Суттарда и которую следует определить. Согласно нормативным документам, состав компонентов задается на один кубометр пенобетона сорбционной влажностью.

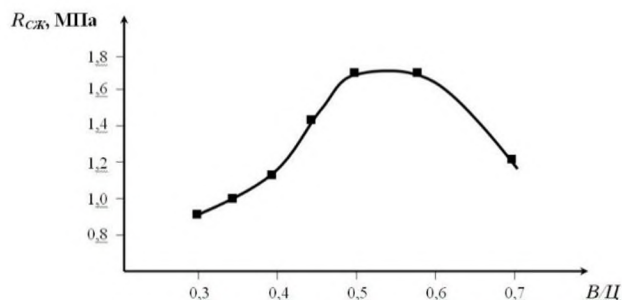


Рисунок 1 – Зависимость прочности ячеистого бетона марки D500 от водоцементного отношения

Согласно таблице 3 из СН-277-80 вводятся подвижность смеси, соответствующая марке по средней плотности. Здесь приведена выдержка из этой таблицы, соответствующая легким пенобетонам, изготовленным на клинкерном цементе (таб. 1). При данном подходе, для точного определения водотвердого отношения, необходимого для расчёта состава, такой показатель как диаметр расплыва растворной смеси матрицы, выраженный в сантиметрах, будет являться целевой функцией.

Таблица 1 – Подвижность растворной смеси по вискозиметру Суттарда

D, кг/м ³	400	500	600	700	800
d _c , см	38	30	24	20	18

Подвижность смеси зависит от нескольких факторов, следовательно, необходимо выявить из них два наиболее значимых и предложить их как две независимые переменные функции подвижности растворной смеси: $d_c = f(X_1; X_2)$.

Для точного определения фактической вязкости смеси, экспериментально определяются значения d_c в зависимости от двух параметров, заданных по трем значениям определенного диапазона: нижней, средней и верхней точке согласно плану Бокса 2x3 [6]. Каждый опыт проводится в трех повторени-

ях, полученные результаты вводятся в программу (рис. 2). По введенным экспериментальным результатам оценивается погрешность и производится аппроксимация по полиномиальному типу в условных координатах с вычислением фактических коэффициентов регрессии. В общем виде уравнение подвижности смеси в условных координатах представляется следующим образом:

$$d_c = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + B_{12} X_1 X_2 + B_{11} X_1^2 + B_{22} X_2^2 \quad (1)$$

При введении данных, полученных экспериментально, одновременно производится их проверка по нахождению в границах доверительного интервала, а также проверяется адекватность аппроксимированной модели по критерию Фишера [7].

Далее вводятся эмпирические данные, полученные экспериментально при помощи вискозиметра Суттарда в лаборатории или непосредственно на стройплощадке по нескольким значениям, которыми являются крайние и средние точки диапазонов входных параметров. Программа выдает в цифровой и графической форме значения целевой функции, необходимые для дальнейшего расчета состава пенобетона (рис. 2, 3). Для плоского изображения виртуальной пространственной модели производится три среза поверхности функции – при минимальном, среднем и максимальном значении параметра.

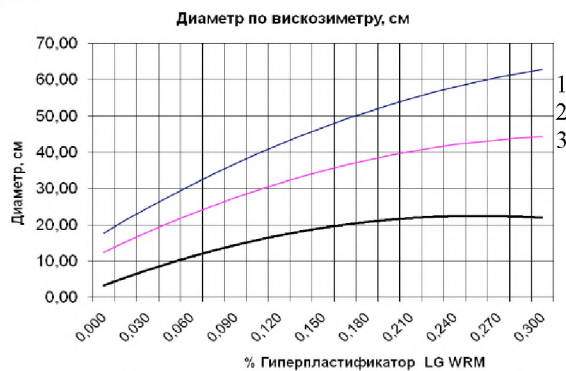


Рисунок 2 – Подвижность раствора матрицы по вискозиметру Суттарда в присутствии гиперпластификатора LG WRM – 505 при содержании в смеси микрокремнезема: кривая 1 – 0 %; кривая 2 – 25 %; кривая 3 – 50 %

Помимо двухмерного изображения, результаты также могут быть представлены в трехмерном виде (рис. 4). Это более наглядно показывает закономерности функции подвижности $d_c = f(X_1; X_2)$. Кроме того, выводит-

ся поле численных значений целевой функции d_c , которая может быть удобной для количественной оценки всех промежуточных результатов расчета подвижности по аппроксимированным данным и соответствующих им условных координат (рис. 5).

Из двух параметров, назначенных переменными – X_2 задается, исходя из условий производства, другой параметр, X_1 – находится из уравнения:

$$X_1 = \frac{1}{2B} (-B_1 - B_{12} X_2) \pm \sqrt{(-B_1 - B_{12} X_2)^2 - 4B_{11}(B_{22} X_2 + B_2 X_2 - d_c)} \quad (2)$$

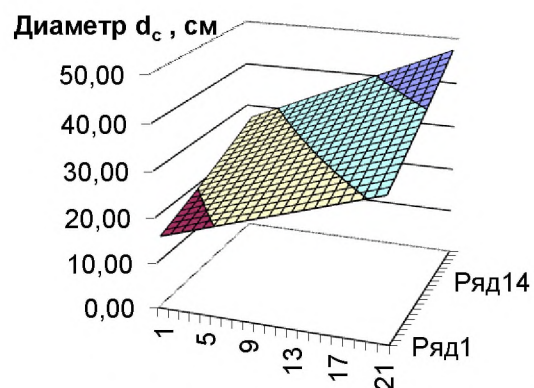


Рисунок 3 – Пространственный график подвижности раствора матрицы по вискозиметру Суттарда

Из вычисленных корней уравнения (2) учитываются только действительные. Согласно найденной величине X_1 вычисляется соответствующее ему значение водотвердого отношения в растворе. Оно находится при переходе от условных координат к действительным линейным интерполированием действительных значений переменного фактора X_2 в заданном диапазоне, согласно их соответствию [6].

Определив водотвердое отношение, вычисляется необходимое количество затворителя, вяжущего и заполнителя в расчете на кубометр пенобетонной смеси.

Масса вяжущего вещества в килограммах на кубометр пенобетонной смеси $\Pi = \frac{D}{1,2 + \frac{3}{\Pi}}$, (3)

где D – средняя плотность пенобетона, кг/м³; $\frac{3}{\Pi}$ – отношение заполнителя к вяжущему, заданное изначально.

Таблица 2 – Составы пенобетона

Заданная плотность ячеистой смеси, кг/м ³	500	600	700	800	900
1	2	3	4	5	6
Кoeff., учитыв. гидратную воду	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Водотвердое отношение В/Т	0,44	0,4	0,44	0,40	0,35
Диаметр расплыва по Суттарду, см	30	26	22	18	14
К-во воды на м ³	198	216	277	288	284
Расход пенообразователя, л/м ³	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5
Масса сухих компонентов на м ³	450	540	630	720	810
Отношение кремнезем/вяжущее m=З/Ц	0	0,5	0,75	0,75	0,75
К-во цемента на м ³ , кг	450	365	360	411	463
К-во заполнителя на м ³ , кг	0	183	270	308	347
Расход пластификатора, кг/м ³	1,15	1,20	1,25	1,25	1,20

Масса заполнителя на кубометр пенобетонной смеси, килограмм: $Z = \frac{3}{\text{Ц}} \text{Ц}$ (4)

Количество затворителя от найденного водотвердого отношения, литров: $V = \frac{B}{T} T$ (5)

Необходимо определить состав пены. Требуемый объем пены, литров:

$$V_{\text{п}} = 1000 - \frac{\text{Ц}}{\rho_{\text{п}}} - \frac{3}{\rho_3} - B \quad (6)$$

В данном объеме содержится раствор пенообразующего препарата заданной кратности $K_{\text{п}}$.

Объем воды в пене, литров: $V_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}}}{K_{\text{п}}}$ (7)

Содержание пенообразователя в растворе составляет (2÷2,5)% по жидкой фазе и от этой концентрации определяется необходимое его количество.

В результате расчета выдается вычисленный состав пенобетона с учетом всех данных, введенных первоначально и полученных по аппроксимированным результатам (табл. 2).

В условиях производства, благодаря данной программе, можно быстро отработать составы пенобетонов различных плотностей. Это является хорошим подспорьем для технологов и специалистов предприятий, производящих товарный пенобетон и изделия из него.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савенков А.И., Горбач П.С., Щербин А.С. Неавтоклавный пенобетон. Факторы качества. Монография. – Ангарск: Издательство Ангарской государственной технической академии, 2013 – 96 с.
2. Шахова, Л.Д. Технологии пенобетонов. Теория и практика. – М.: АСВ, 2010 – 290 с.
3. Савенков А.И., Баранова А.А. Прочность и подвижность пеноцементной матрицы в присутствии пенообразователей // Материалы I международной научно-практической конференции «Теория и практика внедрения новых технологий и материалов в производстве и строительстве». Москва. 2012. с. 83–88.
4. Иваницкий В.В., Сапелин Н.А.,

- Бортников А.В. Теоретические и практические аспекты оптимизации структуры пористых бетонов // Строительные материалы. – 2002. – № 3. – С. 32–33.

5. Королев А.С., Волошин Е.А., Трофимов Б.Я. Оптимизация состава и структуры конструкционно-теплоизоляционного ячеистого бетона // Строительные материалы. – 2004. – № 3. – С. 30–32.

6. Рекомендации по применению методов математического планирования эксперимента в технологии бетона. – М.: НИИЖБ, 1982.

7. Венецкий И.Г., Венецкая В.И. Основные математико-статистические понятия и формулы. – М.: Статистика, 1979. – 447 с.