

УДК 519.233.5:691.327.333

ОЦЕНКА ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕНОБЕТОННОЙ СМЕСИ И ПЕНОБЕТОНА

Федоров В.И., Турантаев Г.Г.

*ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», Якутск,
e-mail: valeriyif.ykt@gmail.com*

В статье рассматривается возможность применения уравнения регрессии, полученной в результате анализа данных действующего цеха по производству пенобетонных блоков, для количественной и качественной оценки степени влияния входных факторов на выходные данные. Основу статьи занимают вопросы, связанные с проблемой анализа, в частности критика одностороннего подхода интерпретации факторов. Представлены преимущества и недостатки основных методов планирования эксперимента и факторного анализа. Приводится описание принципа Парето с точки зрения подходов технологического моделирования производственных процессов. Для изготовления образцов пенобетона использованы сырьевые компоненты, соответствующие требованиям нормативно-технической документации. В экспериментальных исследованиях применены стандартные образцы и аттестованные приборы. Оценка технологических и физико-механических показателей пенобетонной смеси и образцов пенобетона проведена с использованием стандартных методов анализа и обработки данных. Получены пять уравнений регрессии, проведена оценка их адекватности. Построен ряд диаграмм Парето, объективно оценивающих степень влияния входных факторов на выходные данные. Установлены причинно-следственные связи, описывающие рассматриваемые в работе уравнения множественной регрессии. Приводится объяснение некоторых процессов, протекающих в процессе созревания пенобетона. Подробно рассмотрена количественная оценка влияния входных факторов на вариативность характеристик пенобетонной смеси и пенобетона.

Ключевые слова: пенобетон, черный ящик, входной фактор, уравнение регрессии, коэффициенты регрессии, коэффициент детерминации, состав, характеристики

EVALUATION OF FACTORS, INFLUENCING THE CHARACTERISTICS OF FOAMED CONCRETE MIXTURE AND FOAMED CONCRETE

Fedorov V.I., Turantaev G.G.

*Federal North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Yakutsk,
e-mail: valeriyif.ykt@gmail.com*

The article discusses the possibility of applying the regression equation obtained as a result of analyzing the data of the existing workshop for the production of foam concrete blocks for a quantitative and qualitative assessment of the degree of influence of input factors on the output data. The article is based on issues related to the problem of analysis, in particular, criticism of the one-sided approach to interpreting factors. The advantages and disadvantages of the main methods of experiment planning and factor analysis are presented. The description of the Pareto principle from the point of view of approaches to technological modeling of production processes is given. For the manufacture of foam concrete samples, raw materials were used that meet the requirements of regulatory and technical documentation. In experimental studies, standard samples and certified devices were used. The assessment of technological and physical and mechanical parameters of the foam concrete mixture and foam concrete samples was carried out using standard methods of analysis and data processing. Five regression equations are obtained, and their adequacy is assessed. A number of Pareto diagrams are built that objectively assess the degree of influence of input factors on the output. Cause-and-effect relationships are established that describe the multiple regression equations considered in the work. An explanation of some of the processes occurring in the process of foam concrete maturation is given. A quantitative assessment of the influence of input factors on the variability of the characteristics of the foam concrete mixture and foam concrete is considered in detail.

Keywords: foam concrete, black box, input factor, regression equation, regression coefficients, determination coefficient, composition, characteristics

Пенобетоном называют разновидность ячеистого бетона, представляющего собой искусственный каменный материал пористой структуры, изготовленный из вяжущего, кремнеземистого компонента, пенообразователя и воды [1]. Отличительной особенностью пенобетона, по сравнению с другими разновидностями легких и особо легких бетонов, является трудность достижения стабильных значений показателей качества. Зачастую это связано с необходи-

мостью управления многочисленным количеством рецептурных и технологических факторов [2]. Наиболее распространенным методом решения данной задачи является применение аппарата математического моделирования с элементами статистического анализа.

Для объективного отображения технологического процесса приготовления пенобетона необходимо, чтобы его математическая модель включала все факторы,

существенно влияющие на выходную величину [3]. Отсутствие в модели хотя бы одного из существенных факторов может повлечь за собой ошибочную интерпретацию явлений, происходящих в технологическом процессе.

Процесс приготовления и твердения пенобетона сопровождается параллельным протеканием ряда химических и физических процессов. Косвенными показателями этих процессов можно рассмотреть перечень рецептурных факторов. По оценкам многих исследователей, количество факторов, влияющих на свойства пенобетона, может быть достаточно обширным – от пяти до нескольких десятков [1, 4]. Степень влияния этих факторов на выходные данные весьма неоднозначна и зависит от типа исследуемых параметров: средняя плотность, прочность при сжатии, коэффициент теплопроводности, трещиностойкость, морозостойкость и т.д.

В анализе факторов и их оптимизации во многих отраслях промышленности используют так называемый принцип Парето. Принцип является своего рода условным эмпирическим правилом, названным в честь итальянского инженера и экономиста Вильфредо Парето. Сам принцип формулируется следующим образом: «20% усилий дают 80% результата, а остальные 80% усилий – 20% результата» [5]. В данном контексте это можно перефразировать так: «20% факторов влияют на 80% показателей, а остальные 80% факторов – на 20% показателей». Приведенная пропорция с математической точки зрения не является точной закономерностью, а служит некоторым обобщающим мнемоническим правилом. Ранжирование факторов по степени влияния на изменчивость показателей качества пенобетона можно достигнуть с использованием принципа Парето. В работе приводится анализ технологического процесса изготовления пенобетонных блоков автоклавного твердения плотностью D500-600 («D» показывает марку пенобетона по средней плотности, кг/м³). Задачей является получение математической модели без отрыва от действующего производства с использованием отработанной рецептуры.

В исследовательских работах по строительному материаловедению обычно применяют аппарат математического планирования эксперимента, либо другие смежные методы, основанные на принципах математической статистики: априорное ранжирование факторов, дисперсионный анализ, регрессионный анализ, комбинаторный анализ (греческие и латинские квадраты

и др.), методы экспериментального отсеивания факторов с насыщенными матрицами, метод случайного баланса и т.п. [6]. Каждый из перечисленных методов обладает своими преимуществами и недостатками, а также рядом специфических условий, при соблюдении которых можно получить модель, адекватно отражающую значимость каждого фактора. Следует отметить, что большинство рассмотренных методов в той или иной степени пересекаются с принципами планирования эксперимента. Одним из известных недостатков планирования эксперимента является управление крайне ограниченным количеством входных факторов вследствие необходимости проведения большого количества опытов. Количество опытов N при полном факторном эксперименте рассчитывается по формуле

$$N = n^t, \quad (1)$$

где n – уровни варьирования факторов, ед.; t – количество факторов в эксперименте.

Например, при $n = 3$ и $t = 2$ количество опытов равно 9, при $t = 3$ количество опытов достигнет 27, а при $t = 5$ будет равно 243. Таким образом, при планировании эксперимента крайне трудно составить модели, учитывающие более 2–3 факторов. На основании изложенного перед исследователем стоит важная задача – выделить наиболее значимые факторы, так как в противном случае возрастает объем экспериментальной работы и, как следствие, трудоемкость исследовательского процесса. Наиболее целесообразным методом в приведенных ограничениях является регрессионный анализ, в частности элементы множественной регрессии. Назначение множественной регрессии состоит в анализе связи между несколькими независимыми переменными и зависимой переменной при относительно небольшом количестве экспериментов. Экспериментальные данные получены в процессе производства пенобетонных блоков на площадке опытно-экспериментального полигона «Стройкомпозит», г. Якутск.

Цель работы состоит в получении в цеховых (не в лабораторных) условиях достоверных оценок воздействия входных факторов на характеристики пенобетонной смеси и пенобетона при минимальном числе экспериментов.

Материалы и методы исследования

Пенобетонные блоки изготовлены с использованием следующих сырьевых компонентов: в качестве вяжущего – портландцемент класса прочности ЦЕМ I 32,5Б

по ГОСТ 31108-2016 и молотая негашеная известь по ГОСТ 9179-2018; в качестве кремнеземистого компонента – механоактивированный кварцполевошпатовый песок из поймы р. Лена по ГОСТ 8736-2014; в качестве воды затворения – техническая вода по ГОСТ 23732-2011; в качестве поробразователя – Фоатсем. Образцы размером 100x100x100 мм выпилены из пенобетонных блоков после завершения цикла автоклавной обработки. Физико-механические характеристики пенобетонной смеси и образцов пенобетона определены с использованием стандартных методов и аттестованных приборов лаборатории строительных материалов СВФУ им. М.К. Аммосова. Обработка экспериментальных данных выполнена методами математической статистики на платформах программ STATISTICA и MathCAD.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим технологический процесс изготовления пенобетона как стандартную управляемую систему модели «черного ящика». Наиболее подробно модель «черного ящика» изложена в работах [6, 7]. Система как единый функционирующий «организм» выделена из окружающей среды и в то же время связана с внешними возмущениями от воздействия входных факторов. Система связана со средой посредством входных факторов $X = \{x_1, x_2, x_3 \dots x_n\}$, показывающих наблюдаемое влияние среды на систему, посредством возмущающих воздействий, а также выходными данными $Y = \{y_1, y_2 \dots y_n\}$:

$$y_1, y_2 \dots y_n = f(x_1, x_2, x_3 \dots x_n). \quad (2)$$

Функцию (2) можно представить в форме линейного уравнения множественной регрессии вида

$$y_n = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + \dots + b_n \cdot x_n, \quad (3)$$

где b_0 – свободный член; $b_1, b_2, b_3 \dots b_n$ – коэффициенты регрессии.

Оценка свободного члена и коэффициентов регрессии уравнения (3) производится методом наименьших квадратов [7]:

$$b_n = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y, \quad (4)$$

где X – матрица значений входных факторов $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$; X^T – транспонированная матрица значений входных факторов $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$; Y – вектор значений выходных данных $y_1, y_2 \dots y_n$.

С учетом имеющегося научного задела [4, 8], а также на основании работ других исследователей [2, 3] нами приняты пять рецептурных факторов: x_1 – содержание цемента, кг/м³; x_2 – содержание извести, кг/м³; x_3 – содержание шлама, кг/м³ (50% массы шлама состоит из механоактивированного песка, остальная часть из воды); x_4 – содержание воды, кг/м³; x_5 – плотность пены, кг/м³. Рецептурные факторы заданы по расходу необходимого количества материала в кг на 1 м³. Для подбора выходных данных подобран ряд технологических и физико-механических показателей: y_1 – расплыв раствора по Суттарду, см; y_2 – плотность пенобетонной смеси, кг/м³; y_3 – разница температур пенобетона перед резкой и в момент формования, °С; y_4 – плотность пенобетона в сухом состоянии, кг/м³; y_5 – прочность при сжатии, МПа.

Основной задачей экспериментальных работ является фиксирование условий производственного процесса (входных факторов) с использованием принятой рецептуры пенобетона. Отработанный номинальный состав пенобетонных блоков, кг/м³ [4]: D500: портландцемент – 190, известь – 40, песок – 290, вода – 210; D600: портландцемент – 200, известь – 75, песок – 320, вода – 235 (удельная поверхность песка 350–400 м²/кг). По приведенным составам выполнено сорок замесов (два дублирующих замеса по 20 опытов), где зафиксированы 400 значений входных и выходных данных. Полученные результаты после обработки приведены в таблице. Расход материалов (входные факторы $x_1 \dots x_4$) показан на один цикл работы пенобетоносмесителя объемом 2,55 м³.

Данные таблицы обработаны с использованием выражения (4), результаты расчетов показаны в уравнениях

$$\left\{ \begin{aligned} y_1 &= 21,873 + 0,012 \cdot x_1 + 0,093 \cdot x_2 - 0,016 \cdot x_3 + 0,01 \cdot x_4 \quad R^2 = 0,6, \\ y_2 &= 819,02 - 0,26 \cdot x_1 - 3,11 \cdot x_2 + 0,38 \cdot x_3 + 0,41 \cdot x_4 + 0,48 \cdot x_5 \quad R^2 = 0,421, \\ y_3 &= 45,67 + 0,03 \cdot x_1 + 0,47 \cdot x_2 - 0,07 \cdot x_3 - 0,04 \cdot x_4 - 0,28 \cdot x_5 \quad R^2 = 0,766, \\ y_4 &= 251,14 + 0,65 \cdot x_1 - 1,97 \cdot x_2 + 0,49 \cdot x_3 + 0,05 \cdot x_4 - 4,13 \cdot x_5 \quad R^2 = 0,484, \\ y_5 &= -2,723 + 0,001 \cdot x_1 - 0,012 \cdot x_2 + 0,005 \cdot x_3 + 0,003 \cdot x_4 - 0,009 \cdot x_5 \quad R^2 = 0,537. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Состав и свойства пенобетонной смеси и образцов пенобетона

№ п/п	Входные факторы					Выходные данные				
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5
1	491	189	1387	298	73	25	750	25,4	520,20	2,03
2	495	190	1386	289	78	26	775	27,2	623,68	3,50
3	495	188	1388	288	74	27	730	16,8	738,22	3,38
4	493	186	1447	237	82	25,5	790	14,2	554,20	2,53
5	500	189	1486	250	86	24	803	14,7	604,64	2,63
6	493	197	1450	245	95	27	871	17,8	594,57	2,22
7	496	186	1451	285	94	25	825	19,6	576,00	2,43
8	504	189	1450	338	76	24	812	17,8	548,70	2,74
9	492	190	1391	298	95	25	799	13	352,02	2,18
10	494	186	1384	362	68	27	905	19,8	638,43	2,55
11	493	189	1388	398	89	29	810	15,8	540,46	2,24
12	493	186	1343	323	70	27	786	28	613,94	2,07
13	489	189	1385	231	73	27	748	29,7	538,84	1,19
14	496	187	1386	230	76	27	769	24,4	591,50	1,92
15	403	188	1389	228	74	24	764	23,7	525,15	2,16
16	495	190	1389	244	73	24	790	23,5	531,44	2,21
17	495	188	1386	238	78	24	720	30	540,31	2,23
18	441	169	1270	219	75	25	744	24	527,11	1,93
19	442	169	1270	223	69	25	900	23,5	507,08	1,94
20	449	170	1268	222	78	25	746	22,6	570,33	1,52

Для оценки адекватности полученных уравнений регрессии применен коэффициент детерминации [7]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, R^2 = 0 \dots 1, \quad (5)$$

где $\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$ – сумма квадратов регрессионных остатков; $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ – общая

дисперсия; y_i, \hat{y}_i – фактические и расчетные значения выходных данных;

Чем ближе коэффициент детерминации к единице, тем лучше и адекватнее модель приближает рассчитанные по уравнениям (5) значения к наблюдаемым экспериментальным данным (таблица). Коэффициенты детерминации уравнений регрессии также приведены в (5). При оценке корреляционной связи между входными и выходными данными необходимо исключать уравнения, у которых $R^2 < 0,5$, соответственно, y_2 и y_4 в дальнейших расчетах не учитываем.

Составленные уравнения множественной регрессии (5) являются линейными моделями, описывающими наклонную

гиперплоскость в факторном пространстве. Исходя из этого, если не принимать ограничения, то, анализируя модель, можно получить недостоверные данные. Поэтому в расчетах учитывается только та локальная область факторов, которая была изучена в ходе проведения экспериментальных работ (таблица), а именно:

$$[x_1^{\min} = 403] \leq x_1 \leq [x_1^{\max} = 504];$$

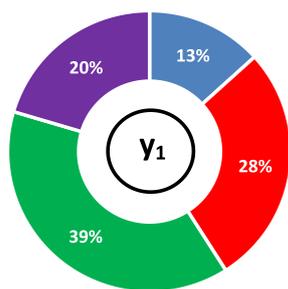
$$[x_2^{\min} = 169] \leq x_2 \leq [x_2^{\max} = 197];$$

$$[x_3^{\min} = 1268] \leq x_3 \leq [x_3^{\max} = 1448];$$

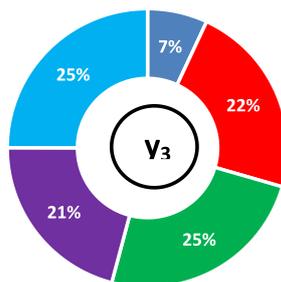
$$[x_4^{\min} = 219] \leq x_4 \leq [x_4^{\max} = 398];$$

$$[x_5^{\min} = 68] \leq x_5 \leq [x_5^{\max} = 95].$$

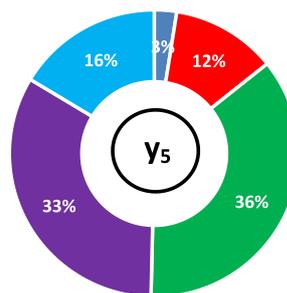
Следующим этапом является анализ уравнений y_1, y_3 и y_5 по принципу Парето. Для этого применили специальный инструмент программы STATISTICA «график Парето». Полученные в результате анализа принципа Парето данные иллюстрированы в виде круговых диаграмм и показаны на рисунке.



а) расплыв раствора по Суттарду



б) разница температур пенобетона перед резкой и в момент формования



в) прочность при сжатии

Удельный вес влияния входных факторов на выходные данные: синий – содержание цемента (x_1), красный – содержание извести (x_2), зеленый – содержание шлама (x_3), фиолетовый – содержание воды (x_4), голубой – плотность пены (x_5)

Анализ диаграмм показывает, что наибольшее влияние на степень изменчивости всех трех выходных данных оказывает фактор x_3 – содержание шлама. Для расплыва раствора по Суттарду на втором месте по силе влияния оказалось содержание извести $x_2 = 28\%$. Расплыв по своей природе показывает реологию растворной составляющей, поэтому наличие в нем шлама и извести повышает его растекаемость. Это связано с тем, что шлам отчасти состоит из воды, а известь после гашения придает смеси пластичность. Однако стоит отметить и роль воды затворения $x_4 = 20\%$, который занимает третью строчку по силе влияния на y_1 . Следует отметить, что факторы x_3 и x_4 производят некоторый синергетический эффект, который повышает суммарное содержание водной составляющей, тем самым увеличивая пластичность растворной смеси. Для перепада температур y_3 , так же как и у y_1 , наибольший вклад вносит x_3 и только потом $x_5 = 25\%$ и $x_2 = 22\%$. Такое ранжирование отчасти противоречит общепринятым принципам, то есть с увеличением количества извести, температура пенобетонного массива должна пропорционально увеличиваться (за счет взаимодействия CaO с H₂O). Возможно, это связано с особенностями морфологии воздушных пузырьков пенобетона, так как структура всех ячеистых бетонов напрямую зависит от характеристик порообразователя, в данном случае – плотности пены x_5 . Изменчивость y_5 показала довольно-таки прогнозируемый результат, характеризующий для большинства бетонов на основе вяжущих гидратационного твердения. На прочность при сжатии y_5 наибольшее влияние оказывают $x_3 = 36\%$ и $x_4 = 33\%$, так как

их повышенное содержание увеличивает водовяжущее отношение и, как следствие, ухудшение прочностных показателей. Установлено, что на прочность при сжатии существенное влияние оказывает плотность пены $x_5 = 16\%$, чем содержание цемента или извести по отдельности. Это доказывает известную гипотезу, что для пенобетона главную роль в структурообразовании занимают тип и характеристики пены, а не расход вяжущего (в рассмотренных плотностях). Доминирующая роль фактора x_2 на изменчивость всех выходных данных объясняется тем, что он занимает порядка 55% всех вместе взятых исходных компонентов пенобетона (по массе). Таким образом, от колебания фактора x_3 наблюдается сильная вариативность рассматриваемых выходных данных y_1 , y_3 и y_5 .

Заключение

Переносить полученные результаты на другие типы ячеистых бетонов следует с достаточной осторожностью, наиболее подходящими являются пенобетоны автоклавного твердения с похожим диапазоном распределения плотностей. Тем не менее выявленные зависимости не противоречат известным зависимостям, а некоторые данные подтверждают ранее не рассматриваемые среди исследователей подходы и идеи. Следует отметить, что математические модели, полученные на основе уравнений регрессии, в большинстве случаев применяются только для описания поверхности отклика, а с использованием уравнения множественной регрессии в tandem с принципом Парето можно более подробно анализировать исследуемые процессы и явления. Исследование планируется про-

должить в области анализа нелинейных уравнений регрессии при моделировании технологических процессов изготовления ячеистых бетонов с более широким охватом средней плотности.

Список литературы

1. Шахова Л.Д. Технология пенобетона. М.: Изд-во АСВ, 2010. 248 с.
2. Стешенко А.Б., Кудряков А.И. Оптимизация технологических приемов приготовления пенобетонной смеси // Актуальные проблемы современности. 2016. № 2 (12). С. 197–203.
3. Попов А.Л., Строкова В.В. Фибропенобетон автоклавного твердения с использованием композиционного вяжущего // Строительные материалы. 2019. № 5. С. 38–44.
4. Местников А.Е., Семенов С.С., Федоров В.И. Производство и применение пенобетона автоклавного твердения в условиях Якутии // Фундаментальные исследования. 2015. № 12–3. С. 490–494.
5. Пахомов А.П. Применять или не применять принцип Парето на практике? // Вестник РУДН. Серия: Экономика. 2010. № 1. С. 5–12.
6. Вознесенский В.А. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ. К.: Высш. шк. головн. изд-во, 1989. 328 с.
7. Баженов Ю.М., Гарькина И.А., Данилов А.М., Королев Е.В. Системный анализ в строительном материаловедении. М.: МГСУ, 2012. 432 с.
8. Местников А.Е., Федоров В.И. Математическое планирование в проектировании состава легкого бетона // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 11. С. 82–87.