

Визуализация расчета составов сырьевых смесей для приготовления цементов

Часть 1

М.А. МИХЕЕНКОВ, канд. техн. наук, доцент, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

В статье рассматриваются вопросы совершенствования методики расчета состава смеси для приготовления портландцемента на персональном компьютере с использованием доступных вычислительных систем, имеющих широкое распространение, таких как Microsoft Office Excel, Math CAD и STATISTICA.

Методика расчета состава сырьевой смеси для приготовления портландцемента традиционно выполняется по методу Кинда – Окорокова. С момента создания методики до настоящего времени на ее основе разработана масса специализированных программ, позволяющих автоматизировать расчеты, но при этом сама методика расчета, не претерпела существенных изменений и усовершенствований. На ее основе также выполняются расчеты составов сырьевых смесей для приготовления различных специализированных цементов, например сульфоалюминатных.

С момента разработки данной методики произошел существенный прогресс в развитии автоматизированных средств вычислений. В обиход вошли персональные компьютеры, вытеснив громоздкие ЭВМ. В то же время большинство специализированных программ, разработанных для расчета сырьевых смесей для приготовления портландцемента, в основу которых положена та же методика, - лицензионные, и стоимость их довольно высока.

Автор настоящей статьи задался целью усовершенствовать методику расчета с использованием доступных вычислительных систем, имеющих широкое распространение, таких как Microsoft Office Excel, Math CAD и STATISTICA. Кроме того, была поставлена задача с использованием данных вычислительных систем визуализировать вычислительный процесс, что позволит на стадии промежуточных расчетов оценить возможность пригодности сырьевых компонентов для изготовления цемента, наметить пути для улучшения сырьевой смеси и получить предварительные результаты, которые станут основой для более точных расчетов. Данный методологический подход автор использует при обучении студентов строительного профиля. Эти методологические рекомендации также могут быть полезны инженерно-техническим работникам и аспирантам строительного профиля.

Графический анализ возможности изготовления портландцемента на основе двухкомпонентной сырьевой смеси

Определяем возможность изготовления портландцемента с коэффициентом насыщения $K_n = \frac{CaO - 1,65Al_2O_3 - 0,35Fe_2O_3}{2,8SiO_2} = 0,9$,

силикатным модулем $n = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} = 2,3$ и глиноземным модулем $p = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} = 1,7$ из известняка и глины, химический состав которых приведен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав сырьевых материалов, масс. %

Компонент	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Δm _{прк}
Известняк	52,89	1,38	1,55	0,35	0,46	0,19	43,18
Глина	2,69	73,68	15,02	3,69	1,8	0,31	2,81

В расчетах не используются традиционные выводы формул, в которых принято, что на 1 ч. по массе первого компонента, приходится x частей второго компонента и y частей третьего компонента (в случае трехкомпонентной смеси). Для упрощения расчетов принимается, что сумма по массе всех компонентов сырьевой смеси вне зависимости от их количества равна 1. Обозначив известняковый компонент сырьевой смеси как I, а глинистый - как G, для двухкомпонентной смеси имеем

$$I + G = 1. \quad (1)$$

Для визуализации двухкомпонентной смеси химический состав компонентов сырьевой смеси вводится в виде матриц в систему Math CAD. Расчет содержания CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ в зависимости от состава сырьевой смеси осуществляется по формулам:

$$CaO = Ii_0 + Gg_0; \quad (2)$$

$$SiO_2 = Ii_1 + Gg_1; \quad (3)$$

$$Al_2O_3 = Ii_2 + Gg_2; \quad (4)$$

$$Fe_2O_3 = Ii_3 + Gg_3; \quad (5)$$

Полученные значения оксидов подставляются в формулы для определения K_n , n и p и рассчитываются их значения в зависимости от содержания сырьевого компонента в смеси. На рис. 1 приведена визуализация значений K_n и модулей в зависимости от содержания в сырьевой смеси известняка.

По результатам расчета и визуализации расчетных данных видно, что коэффициент насыщения достигает значения 0,9 при содержании известняка в смеси около 80% и, соответственно, глины 20%. При таком содержании известняка и глины в сырьевой смеси силикатный модуль $n=3,01$, а глиноземный модуль

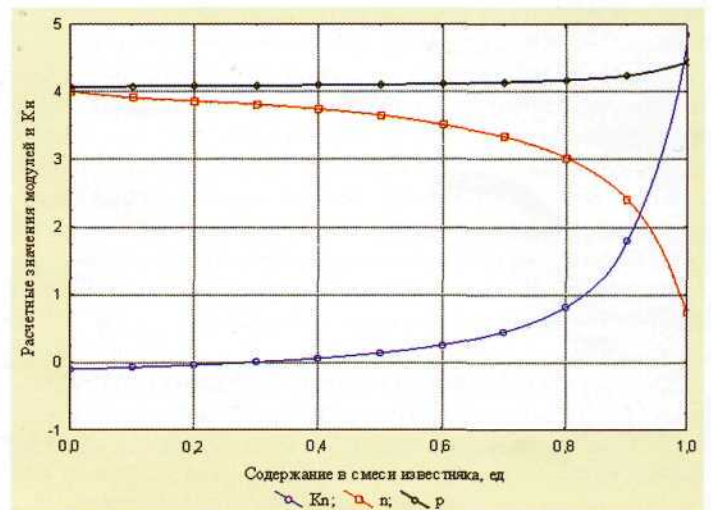


Рис. 1. Влияние содержания известняка в сырьевой смеси на K_n , n и p

$r=4,17$, что превышает значения, заданные в условии. Для одновременного понижения силикатного и глиноземного модулей можно использовать добавку, богатую содержанием Fe_2O_3 . Такой добавкой могут быть, например, пиритные огарки. Поскольку из двухкомпонентной смеси с заданным химическим составом портландцемент с указанными модулями приготовить невозможно, точный расчет содержания компонентов не производится.

Графический анализ возможности изготовления портландцемента на основе трехкомпонентной сырьевой смеси

Определяем возможность изготовления портландцемента с $Kn=0,9$, силикатным модулем $n=2,3$ и глиноземным модулем $r=1,7$ из известняка, глины и пиритных огарков, химический состав которых приведен в табл. 2.

Таблица 2. Химический состав сырьевых материалов, масс. %

Компонент	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	$\Delta m_{прк}$
Известняк	52,89	1,38	1,55	0,35	0,46	0,19	43,18
Глина	2,69	73,68	15,02	3,69	1,8	0,31	2,81
Пиритные огарки	2,88	13,74	1,53	76,95	0,32	3,78	0,8

В данном случае для расчета и визуализации коэффициента насыщения и модулей используются две вычислительные системы - Microsoft Office Excel и STATISTICA, так как система Microsoft Office Excel не поддерживает построение тернарных графиков. Вначале в системе STATISTICA необходимо наметить план варьирования компонентов сырьевой смеси в тернарной системе при всех возможных сочетаниях. Для расчета плана сочетаний компонентов сырьевой смеси используется симплекс-решетчатое планирование при трех факторах с возможностью описания результатов полиномом третьей степени. Для того чтобы в системе STATISTICA наметить план проведения эксперимента, нужно в старт-меню используемых инструментов выбрать «Статистика» - «Производственная статистика и Six Sigma» - «Экспериментальный дизайн (DOE)» и в этом модуле выбрать «Mixture designs and triangular surfaces». В появившемся блоке расчета эксперимента выбрать полиномиальную модель 3-й степени и поставить галочку, выбрав приращение с внутренними точками. После нажатия на «ОК» появится таблица плана проведения эксперимента, приведенная в столбцах А, В и С табл. 3. Таблица плана проведения эксперимента копируется и переносится в рабочие документы системы STATISTICA и Microsoft Office Excel.

Расчет коэффициента насыщения и модулей для графического анализа трехкомпонентной сырьевой смеси производится с помощью Microsoft Office Excel. Таблица плана проведения визуализации и результаты расчетов приведены в табл. 3.

При проведении расчетов в электронных таблицах Microsoft Office Excel следует иметь в виду, что для вычисления суммы оксидов в сырьевой смеси следует использовать абсолютные ссылки на ячейки с содержанием оксидов, при этом преобразование относительной ссылки в абсолютную осуществляется путем нажатия клавиши F4 после выделения ячейки. При этом формулы вычисления суммы оксидов в сырьевой смеси выглядят следующим образом:

для CaO (столбец L)
 $=A1*\$E\$2+B1*\$E\$3+C1*\$E\$4;$ (6)

для SiO₂ (столбец M)
 $=A1*\$F\$2+B1*\$F\$3+C1*\$F\$4;$ (7)

для Al₂O₃ (столбец N)
 $=A1*\$G\$2+B1*\$G\$3+C1*\$G\$4;$ (8)

для Fe₂O₃ (столбец O)
 $=A1*\$H\$2+B1*\$H\$3+C1*\$H\$4.$ (9)

Формулы расчета коэффициента насыщения и модулей выглядят так:

для Kn (столбец P)
 $=(L1-1,65*N1-0,35*O1)/(2,8*M1);$ (10)

для n (столбец Q)
 $=M1/(N1+O1);$ (11)

для r (столбец R)
 $=N1/O1.$ (12)

Таблица 4. Таблица анализа величин модуля в зависимости от состава сырьевой смеси

I	G	P	Kn	n	r
0,33	0,33	0,34	-0,00	0,88	0,22
0,66	0,17	0,17	0,56	0,89	0,28
0,00	0,34	0,66	-0,27	0,59	0,12
0,00	0,66	0,34	-0,16	1,37	0,36
0,66	0,34	0,00	0,35	3,41	4,13
1,00	0,00	0,00	12,99	0,73	4,43
0,66	0,00	0,34	1,54	0,20	0,06
0,34	0,00	0,66	-0,02	0,18	0,03
0,17	0,17	0,66	-0,21	0,39	0,07
0,00	1,00	0,00	-0,11	3,94	4,07
0,34	0,66	0,00	0,01	3,78	4,09
0,00	0,00	1,00	-0,69	0,18	0,02
0,17	0,66	0,17	-0,08	1,97	0,67
0,34	0,33	0,33	0,01	0,90	0,22

Таблица 3. План проведения визуализации и результаты расчетов

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	0,33	0,33	0,34		CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	$\Delta m_{прк}$	19,32	29,44	5,99	27,50	-0,00	0,88	0,22
2	0,66	0,17	0,17	I	52,89	1,38	1,55	0,35	0,46	0,19	43,18	35,85	15,77	3,84	13,94	0,56	0,89	0,28
3	0,00	0,34	0,66	G	2,69	73,68	15,02	3,69	1,80	0,31	2,81	2,82	34,12	6,12	52,04	-0,27	0,59	0,12
4	0,00	0,66	0,34	P	2,88	13,74	1,53	76,95	0,32	3,78	0,80	2,75	53,30	10,43	28,60	-0,16	1,37	0,36
5	0,66	0,34	0,00									35,82	25,96	6,13	1,49	0,35	3,41	4,13
6	1,00	0,00	0,00									52,89	1,38	1,55	0,35	12,99	0,73	4,43
7	0,66	0,00	0,34									35,89	5,58	1,54	26,39	1,54	0,20	0,06
8	0,34	0,00	0,66									19,88	9,54	1,54	50,91	-0,02	0,18	0,03
9	0,17	0,17	0,66									11,35	21,83	3,83	51,47	-0,21	0,39	0,07
10	0,00	1,00	0,00									2,69	73,68	15,02	3,69	-0,11	3,94	4,07
11	0,34	0,66	0,00									19,76	49,10	10,44	2,55	0,01	3,78	4,09
12	0,00	0,00	1,00									2,88	13,74	1,53	76,95	-0,69	0,18	0,02
13	0,17	0,66	0,17									11,26	51,20	10,44	15,58	-0,08	1,97	0,67
14	0,34	0,33	0,33									19,82	29,32	5,99	26,73	0,01	0,90	0,22

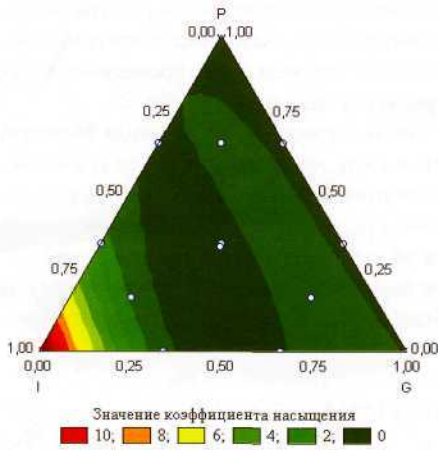


Рис. 2. Изолинии равных значений K_n

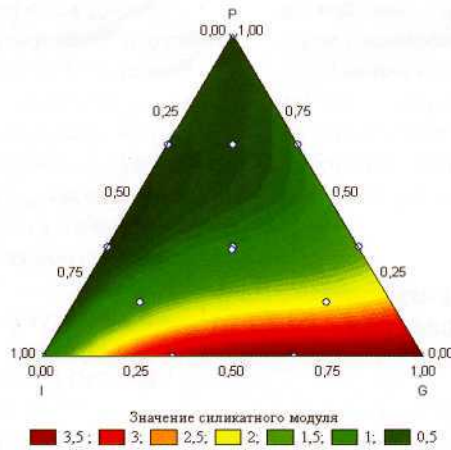


Рис. 3. Изолинии равных значений силикатного модуля n

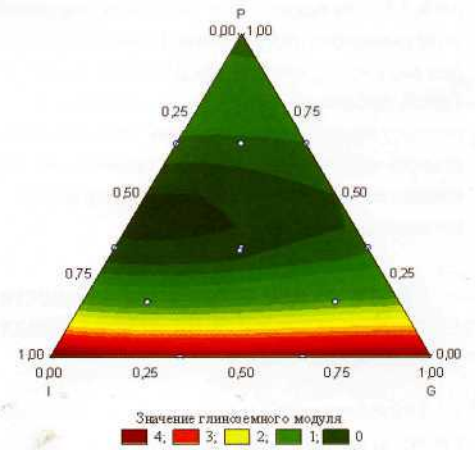


Рис. 4. Изолинии равных значений глиноземного модуля p

Полученные расчетные значения коэффициента насыщения и модулей подставляются в систему STATISTICA и производится построение тернарных графиков для рассчитанных величин. Анализ величин модулей в зависимости от количества компонентов в сырьевой смеси в системе STATISTICA приведен в табл. 4.

Для построения тернарных графиков в системе STATISTICA следует выйти в блок анализа сырьевой смеси по схеме «Статистика» – «Производственная статистика и Six Sigma» – «Экспериментальный дизайн (DOE)» – «Mixture designs and triangular surfaces» – «Анализировать расчет» – «Variables» и в появившейся таблице выбрать в качестве зависимых переменных K_n , n и p , а в качестве независимых – I , G и P . В появившемся блоке анализа сначала надо выбрать переменную для анализа (например K_n) и поставить галочку на полную кубическую модель. После выбора модели для описания функции отклика следует выбрать блок «Быстрый анализ», а в нем выбрать модуль «Вычерчивание контура», который вычерчивает тернарные графики изолиний равных значений для K_n , n и p . На рис. 2, 3, 4 представлены тернарные графики изолиний равных значений для K_n , n и p .

Визуальный анализ тернарных графиков коэффициента насыщения и заданных в расчете модулей показывает, что изолинии для $K_n=0,9$, $n=2,3$, $p=1,7$ пересекаются ориентировочно в области с координатами $I=0,66$, $G=0,166$ и $P=0,166$, следовательно, данную сырьевую смесь можно использовать для приготовления цементного клинкера с заданными в условии задачи параметрами. Ориентируясь по тернарным графикам, можно подобрать состав, отвечающий условиям данной задачи, но лучше произвести точный расчет сырьевой смеси.

Точный расчет состава трехкомпонентной сырьевой смеси для приготовления портландцемента

При расчете трехкомпонентной сырьевой смеси, дополнительно обозначив пиритные огарки как P , записывается условие суммы для трехкомпонентной сырьевой смеси как

$$I+G+P=1. \quad (13)$$

Точный расчет состава трехкомпонентной смеси производится в системе Math CAD, в которой содержание оксидов в компонентах сырьевой смеси задается в виде транспонированных матриц. Доступ к элементам матриц в данной системе обеспечивается нижним индексированием, при этом индексация элементов матрицы начинается с 0. Если обозначить соответствующие оксиды индексами, обеспечивающими доступ к данному

элементу матрицы, тогда содержание CaO в каждой сырьевой смеси будет обозначено как i_0, g_0, p_0 , например, Fe_2O_3 , как i_3, g_3, p_3 . Содержание каждого оксида, вводимого в сырьевую смесь, будет равно:

$$CaO = Ii_0 + Gg_0 + Pp_0; \quad (14)$$

$$SiO_2 = Ii_1 + Gg_1 + Pp_1; \quad (15)$$

$$Al_2O_3 = Ii_2 + Gg_2 + Pp_2; \quad (16)$$

$$Fe_2O_3 = Ii_3 + Gg_3 + Pp_3; \quad (17)$$

Подставив приведенные выше значения содержания оксидов в формулу для вычисления коэффициента насыщения

$$K_n = \frac{CaO - 1,65Al_2O_3 - 0,35Fe_2O_3}{2,8SiO_2}, \text{ получим}$$

$$Ii_0 + Gg_0 + Pp_0 - 1,65Ii_2 - 1,65Gg_2 - 1,65Pp_2 - 0,35Ii_3 - 0,35Gg_3 - 0,35Pp_3 - 2,8K_nIi_1 - 2,8K_nGg_1 - 2,8K_nPp_1 = 0 \quad (18)$$

Обозначив за $A1, B1$ и $C1$ выражения

$$A1 = i_0 - 1,62i_2 - 0,35i_3 - 2,8K_ni_1, \quad (19)$$

$$B1 = g_0 - 1,62g_2 - 0,35g_3 - 2,8K_ng_1, \quad (20)$$

$$C1 = p_0 - 1,62p_2 - 0,35p_3 - 2,8K_np_1, \quad (21)$$

запишем

$$A1I + B1G + C1P = 0. \quad (22)$$

Аналогичным образом, подставив значения оксидов в формулу для определения кремнеземистого модуля $n = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$,

получим

$$Ii_1 + Gg_1 + Pp_1 - nIi_2 - nGg_2 - nPp_2 - nIi_3 - nGg_3 - nPp_3 = 0. \quad (23)$$

Обозначив за $A2, B2$ и $C2$ выражения

$$A2 = i_1 - ni_2 - ni_3, \quad (24)$$

$$B2 = g_1 - ng_2 - ng_3, \quad (25)$$

$$C2 = p_1 - np_2 - np_3, \quad (26)$$

получим второе уравнение в системе для нахождения компонентов сырьевой смеси

$$A2I + B2G + C2P = 0. \quad (27)$$

Третьим уравнением в системе будет условие, что сумма компонентов сырьевой смеси равна 1. Окончательно система уравнений для нахождения количества компонентов трехкомпонентной сырьевой смеси будет иметь вид:

$$A1I + B1G + C1P = 0;$$

$$A2I + B2G + C2P = 0; \quad (28)$$

$$I+G+P=1.$$

Для решения подобной системы линейных уравнений в системе MathCAD встроена функция «Find». Для нахождения корней системы линейных уравнений с помощью этих функций необходимо всем компонентам сырьевой смеси присвоить некото-

```

i := ( 52.89 1.38 1.55 0.35 0.46 0.19 43.18 )T
g := ( 2.69 73.68 15.02 3.69 1.8 0.31 2.81 )T
p := ( 2.88 13.74 1.53 76.95 0.32 3.78 0.8 )T
Kn := 0.9  n := 2.3
A1 := i0 - 1.65 · i2 - 0.35 · i3 - 2.8 · Kn · i1
B1 := g0 - 1.65 · g2 - 0.35 · g3 - 2.8 · Kn · g1
C1 := p0 - 1.65 · p2 - 0.35 · p3 - 2.8 · Kn · p1
A2 := i1 - n · i2 - n · i3
B2 := g1 - n · g2 - n · g3
C2 := p1 - n · p2 - n · p3
I := 1  G := 1  P := 1
Given
A1 · I + B1 · G + C1 · P = 0
A2 · I + B2 · G + C2 · P = 0
I + G + P = 1
R := find(I, G, P)
R = ( 0.807  I := R0 · 100  I = 80.71
      0.175  G := R1 · 100  G = 17.52
      0.018  P := R2 · 100  P = 1.77
    )
    
```

Рис. 5. Листинг расчета состава трехкомпонентной сырьевой смеси

```

i := ( 52.89 1.38 1.55 0.35 0.46 0.19 43.18 )T
g := ( 2.69 73.68 15.02 3.69 1.8 0.31 2.81 )T
p := ( 2.88 13.74 1.53 76.95 0.32 3.78 0.8 )T
s := ( 48 36 8.05 0.6 3 1.4 2.95 )T
Kn := 0.9  n := 2.3  p1 := 1.6
A1 := i0 - 1.65 · i2 - 0.35 · i3 - 2.8 · Kn · i1
B1 := g0 - 1.65 · g2 - 0.35 · g3 - 2.8 · Kn · g1
C1 := p0 - 1.65 · p2 - 0.35 · p3 - 2.8 · Kn · p1
D1 := s0 - 1.65 · s2 - 0.35 · s3 - 2.8 · Kn · s1
A2 := i1 - n · i2 - n · i3  A3 := i2 - p1 · i3
B2 := g1 - n · g2 - n · g3  B3 := g2 - p1 · g3
C2 := p1 - n · p2 - n · p3  C3 := p2 - p1 · p3
D2 := s1 - n · s2 - n · s3  D3 := s2 - p1 · s3
I := 1  G := 1  P := 1  S := 1
Given
A1 · I + B1 · G + C1 · P + D1 · S = 0
A2 · I + B2 · G + C2 · P + D2 · S = 0
A3 · I + B3 · G + C3 · P + D3 · S = 0
I + G + P + S = 1
R := find(I, G, P, S)
R = ( 0.644  I := R0 · 100  I = 64.39
      0.062  G := R1 · 100  G = 6.21
      6.232 · 10-3  P := R2 · 100  P = 0.62
      0.288  S := R3 · 100  S = 28.78
    )
    
```

Рис. 6. Листинг расчета состава четырехкомпонентной сырьевой смеси

рое начальное значение I=1, G=1 и P=1. Присвоение начальных значений компонентам сырьевой смеси никак не повлияет на результат вычислений, так как решение такой системы единственно. После этого вводится ключевое слово «Given» и задаются условия задачи, определенные системой 28. Следует обратить внимание, что при задании условий задачи после ключевого слова «Given» пишется не знак равенства, а логический оператор «=», который означает «должно быть равно», и вводит в сканели «Boolean» (логических) операторов. После написания условий для решения системы линейных уравнений следует ввести встроенную функцию «Find» и в качестве переменных ввести символы, обозначающие компоненты сырьевой смеси. Листинг точного расчета состава трехкомпонентной сырьевой смеси приведен на рис. 5.

В соответствии с точным расчетом трехкомпонентная сырьевая смесь для приготовления портландцемента с заданными в условиях характеристиками должна содержать 80,71% известняка, 17,52% глины и 1,77% пиритных огарков.

Следует отметить, что при расчете трехкомпонентной шихты, как правило, задаются Kn и один из модулей, а при расчете четырехкомпонентной смеси - Kn и оба модуля.

Точный расчет состава четырехкомпонентной сырьевой смеси для приготовления портландцемента

Рассчитываем состав четырехкомпонентной сырьевой смеси цементного клинкера с Kn=0,9, n=2,3, p=1,6, используя в качестве четвертого сырьевого компонента доменный гранулированный шлак, химический состав которого приведен в табл. 5.

При расчете четырехкомпонентной смеси в первые два уравнения вводится содержание оксидов в четвертом компоненте смеси, и в систему расчета вводится третье уравнение, определяемое по формуле расчета глиноземного модуля

$$p = \frac{A1_2O_3}{Fe_2O_3}, \text{ в которую подставлены значения оксидов } i_2 + Gg_2 + Pp_2 + Ss_2 - pi_3 - pGg_3 - pPp_3 - pSs_3 = 0 \quad (29)$$

Таблица 5. Химический состав сырьевых материалов, масс. %

Компонент	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Δm _{прк}
Известняк	52,89	1,38	1,55	0,35	0,46	0,19	43,18
Глина	2,69	73,68	15,02	3,69	1,8	0,31	2,81
Пиритный огарок	2,88	13,74	1,53	76,95	0,32	3,78	0,8
Шлак доменный гранулированный	48,0	36,0	8,05	0,6	3,0	1,4	2,94

Обозначив за A3, B3 и C3 выражения

$$A3 = i_2 - pi_3, \quad (30)$$

$$B3 = g_2 - pg_3, \quad (31)$$

$$C3 = p_2 - pp_3, \quad (32)$$

$$D3 = s_2 - ps_3, \quad (33)$$

получаем третье уравнение в системе

$$A3I + B3G + C3P + D3S = 0. \quad (34)$$

Четвертым уравнением, как и во всех предыдущих случаях, является условие равенства суммы всех компонентов смеси единице.

Листинг расчета четырехкомпонентной сырьевой смеси для приготовления портландцемента приведен на рис. 6.

В соответствии с точным расчетом четырехкомпонентная сырьевая смесь для приготовления портландцемента с заданным химическим составом должна содержать 64,39% известняка, 6,21% глины, 0,62% пиритных огарков и 28,78% гранулированного шлака.

Библиографический список

1. Бутт Ю.М. Технология цемента и других вяжущих веществ [Текст] / Ю.М. Бутт – М., Стройиздат, 1964. – 352 с.

11-14 МАЯ 2011 КРАСНОЯРСК

Официальная поддержка:

XIX СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ОТДЕЛОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ. МАЛОЭТАЖНОЕ ДОМОСТРОЕНИЕ. ЖКХ И ЭКОЛОГИЯ.

- строительные и отделочные материалы, технологии и оборудование для их производства;
- окна, двери, оборудование и комплектующие для их производства;
- проекти, технологии и материалы для многоэтажного домостроения;
- кровельные и теплоизоляционные материалы, системы тепло-, газо-, звукоизоляции;
- товары для дома и интерьера;
- городская инфраструктура, технологии, машины и оборудование коммунального хозяйства.

Информационная поддержка:

сibfair государственный информационно-сервисный центр Красноярского края

МВДЦ «Сибирь», ул. Авиаторов, 19
тел./факс: (381) 22-88-405, 22-88-611 (круглосуточно)
www.krasfair.ru