

УДК 666.74:666.3.016

РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА СОСТАВА ШИХТЫ ДЛЯ ДЕКОРАТИВНОЙ КЕРАМИКИ КАРКАСНО-ОКРАШЕННОЙ СТРУКТУРЫ

Д.В. Акст, А.Ю. Столбоушкин

E-mail: daniel_axt@mail.ru

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

Аннотация. Приведена разработанная модель опудренной гранулы, сформированной из двух сырьевых компонентов. В основу модели положено условное разделение на зоны (зона ядра, переходная зона и зона оболочки). Изложен разработанный метод расчета многокомпонентного состава шихты для формирования керамических матричных композитов с заданными физико-механическими и декоративными свойствами. Приведен пример расчета гранулированной шихты из глинистого сырья и марганецсодержащих техногенных отходов для декоративного керамического кирпича каркасно-окрашенной структуры. Расчетным путем установлено оптимальное количество красящей добавки в количестве 7 % от массы шихты. В лабораторных условиях (по расчетным составам) получена декоративная керамика коричневого цвета с использованием красящих техногенных отходов с пониженным содержанием хромофоров марганца.

Ключевые слова: модель опудренной гранулы, расчет состава гранулированной шихты, керамический матричный композит, декоративная керамика, каркасно-окрашенная структура.

THE DEVELOPMENT OF A METHOD FOR CALCULATING THE CHARGE COMPOSITION FOR DECORATIVE CERAMICS WITH A FRAMEWORK-COLORED STRUCTURE

D.V. Akst, A.Yu. Stolboushkin

E-mail: daniel_axt@mail.ru

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. A developed model of a powdered granule formed from two raw materials is presented. The model is based on a conditional segmentation into zones: the core zone, the transition zone and the shell zone. The developed method for calculating the multicomponent charge composition for the formation of ceramic matrix composites with required physical, mechanical and decorative properties is presented. An example of the calculation of a granular charge from clay raw materials and manganese-containing technogenic waste for decorative ceramic brick with framework-colored structure is given. The optimal amount of the coloring additive in the amount of 7 % of the charge weight is calculated. In the laboratory conditions, brown decorative ceramics is obtained from the calculated compositions using technogenic waste with a low content of manganese chromophores.

Keywords: powdered granule model, calculation of a granular charge composition, ceramic matrix composite, decorative ceramics, framework-colored structure.

Введение

Инновационное развитие индустриального комплекса страны и ее отдельных регионов неразрывно связано с эволюцией строительной отрасли [1]. В свою очередь ее устойчивая модернизация неотделима от совершенствования основополагающей науки (строительного материаловедения). Большинство современных исследований в области получения инновацион-

ных изделий и материалов в настоящее время направлено на улучшение их эксплуатационных характеристик за счет изменения вещественного состава, регулирования структуры, использования нетрадиционного сырья и корректирующих добавок [2 – 4]. Одним из таких приоритетных направлений развития отрасли в среднесрочной перспективе является получение новых упорядоченных структур и композиционных материа-

лов с высокими прочностными и декоративными свойствами [5, 6].

В производстве строительной керамики все большую актуальность приобретают научные разработки в области создания керамических матричных композитов. Направленное регулирование и формирование оптимальной структуры керамики позволяет значительно повысить прочность и морозостойкость, а также усилить цветовую окраску декоративных изделий даже при использовании низкосортного сырья и техногенных отходов [7, 8].

Изготовление керамики матричной структуры предполагает использование гранулированных пресс-порошков из двух и более сырьевых составляющих, что, с учетом особенностей внутреннего строения материала и характеристик используемого сырья, значительно усложняет прогнозирование свойств готового изделия. Так, например, в настоящей работе исследования по получению декоративной керамики каркасно-окрашенной структуры показали, что требуемый цвет обожженного черепка во многом обусловлен химико-минералогическим составом вводимого пигмента, поэтому «вычисление» его оптимальной концентрации в шихте играет определяющую роль [9, 10]. Однако на сегодняшний день не существует единой, общепринятой методики проектирования и расчета многокомпонентных шихт для керамических матричных композитов, которая бы учитывала все факторы, влияющие на процесс получения изделия.

Целью настоящей работы является разработка модели формируемой двухкомпонентной гранулы и метода математического расчета состава шихты для получения декоративной керамики каркасно-окрашенной структуры.

Теоретические положения расчета

Так как основным «конструктивным элементом» в технологии керамики с матричной структурой является опудренная гранула, вычисления справедливо начинать с определения количества необходимых для ее изготовления сырьевых компонентов.

Агрегация сырьевых материалов в гранулы является сложным процессом, кинетика которого зависит от множества факторов. Основными факторами являются конструктивные особенности и режимы работы гранулятора; физико-механические и химические характеристики сырьевых материалов; вид, количество и способ введения связующего.

Процесс гранулообразования $\bar{R}$ [11] определяется как отношение среднего диаметра (d_{cp}) формируемых гранул к диаметру (d_q) исходных частиц сырья:

$$\bar{R} = \frac{d_{cp}}{d_q} = \frac{g}{1 - \left[\sum_{i=1}^t \left(1 - \frac{g}{R_i} \right)^3 G_i \right]^{1/3}}, \quad (1)$$

где g – доля поверхностного объема гранулы, не занятая связующим; G_i – доля гранул, имеющих диаметр d_i ; t – количество гранул уникального диаметра.

Поскольку рост гранулы по большей части обеспечивается налипанием сухих частиц исходного материала на смоченное ядро, количество связующего в приповерхностной зоне гранулы должно быть как можно больше. На самом деле в этом процессе участвуют и смоченные частицы меньшего размера по сравнению с накатываемым ядром. Поэтому для упрощения разрабатываемой модели их участием необходимо сознательно пренебречь. Тогда, исходя из уравнения (1), величина g будет находиться в пределах 0,1 – 0,2 и устанавливаться экспериментально для каждого конкретного вида гранулируемого материала.

В общем виде процесс гранулообразования R_i для гранул диаметром d_i можно охарактеризовать следующим выражением:

$$R_i = \frac{d_i}{d_q}. \quad (2)$$

Тогда средний диаметр формируемых гранул d_{cp} будет определяться по формуле:

$$d_{cp} = \frac{gd_q}{1 - \left[\sum_{i=1}^t \left(1 - \frac{gd_q}{d_i} \right)^3 G_i \right]^{1/3}}. \quad (3)$$

Для дальнейших расчетов и определения количества красящего компонента, необходимого для опудривания одной гранулы величиной d_{cp} , были приняты следующие допущения:

- частицы исходного сырья и сформированные из них гранулы имеют только сферическую форму;
- исходный материал поступает в гранулятор только в виде отдельных частиц (без агрегатов и кластеров);
- исходный материал перемешивается равномерно без образования центров переувлажнения в любой точке чаши гранулятора;
- частицы материала полностью используются на построение гранул и не остаются на стенках гранулятора;

– из гранулятора с одинаковой вероятностью выходят гранулы любого размера вплоть до максимального диаметра D , мм;

– значения диаметра, скорости вращения и угла наклона тарелки гранулятора, плотности и размеров капельного потока связующего постоянны на протяжении всего процесса грануляции, их возможными допусками и отклонениями можно пренебречь.

Для нахождения значения d_{cp} целесообразно использовать данные интегрального распределения исходных частиц по размерам (d_i), полученные по результатам гранулометрического анализа сырья. Данные о соотношении количества гранул по размеру рассчитываются по формуле Фулера с учетом рационального фракционного состава гранулята, обеспечивающего плотную упаковку гранул при прессовании изделий [12]:

$$y_i = 100 \sqrt{\frac{d_i}{D}}, \quad (4)$$

где y_i – содержание фракций с размером гранул меньше величины d_i , %.

Полученные расчетные значения гранулометрического состава проверяются, корректируются экспериментально и принимаются к дальнейшему расчету.

Матричная структура композиционного керамического материала представлена двумя основными элементами (ядром и оболочкой), сформированными в процессе обжига гранул из базового сырья и опудривающего слоя по их поверхности. При этом для формирования каркасно-окрашенной структуры декоративной керамики красящие компоненты концентрируются в оболочке, цвет керамического изделия после обжига во многом зависит от ее толщины.

Если предположить, что матричная структура керамического изделия образована идентичными k гранулами диаметром D_1 и объемом V_1 , то толщина 2δ опудривающего слоя, обеспечивающая идеальную упаковку гранул с постоянным координационным числом, составляет 7,7 % от диаметра D ядер:

$$1,2505V_1 = \frac{\pi D_1^3 k}{6}. \quad (5)$$

Практически формирование монофракционных порошков грануляцией окатыванием по движущей поверхности является труднодостижимым в силу целого комплекса причин даже при использовании высокоскоростных лопастных мешалок. Поэтому для упрощенной оптимальной

гранулометрии пресс-порошка, состоящего из крупной, средней и мелкой фракций в соотношении примерно 25:25:50, обеспечивающей плотную упаковку гранул при прессовании [13], толщину 2δ опудривающего слоя принимают в интервале 5 – 10 % от диаметра целой гранулы D_1 .

Таким образом, рассчитав средний диаметр получаемых гранул по формуле (3), можно приближенно установить средние размеры их ядер и оболочки.

При определении количества красящего компонента минимального и достаточного для требуемой окраски изделия представим следующую модель опудренной гранулы (см. рисунок). Все тело гранулы разделим на n концентрических слоев. При этом на ее модели условно можно выделить три зоны: *I* – зона ядра; *II* – переходная зона; *III* – зона оболочки.

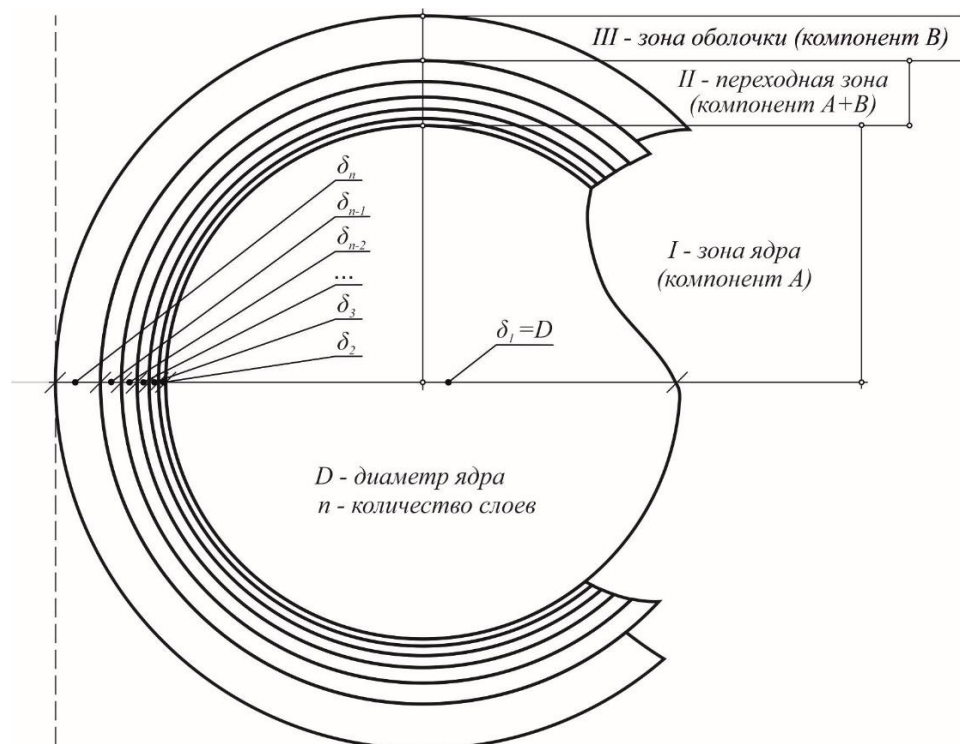
Зона *I* представляет собой ядро (тело) гранулы и состоит из одного слоя ($i = 1$), зона *I* целиком представлена частицами базового сырья (компонент *A*), скрепленными связующим. Зона *II* образована двумя видами частиц: базового (компонент *A*) и красящего (компонент *B*) сырья. Она состоит из множества слоев ($i = n - 2$; здесь n – общее количество слоев). Соотношение между компонентами *A* и *B* во второй зоне не постоянно и интегрально изменяется по мере удаления от центра ядра. С увеличением радиуса и порядкового номера i -ого слоя возрастают количество красящего компонента *B* и толщина слоя δ_i . Зона *III* замыкает окрашивающую оболочку вокруг ядра и формирует поверхность гранулы. При этом она так же, как и зона *I*, состоит из одного слоя ($i = n$) и полностью представлена частицами красящего сырья (компонент *B*).

Для примера рассмотрим случай формирования гранулы при $n = 5$. Согласно разработанной модели, регламентирующей распределение компонентов *A* и *B* по зонам (см. рисунок), было принято их постоянное соотношение в процентах для каждого слоя (табл. 1).

Первый слой ($i = 1$) фактически является ядром гранулы то $\delta_1 = D$. Тогда нумерация слоев окрашивающей оболочки будет изменяться от 2 до 5, а их толщина описываться следующим уравнением:

$$\delta_i = a\delta_{i-1}. \quad (6)$$

При этом эмпирический коэффициент a зависит от характера гранулируемого материала, параметров формируемых гранул и определяется экспериментально.



Модель гранулы из смеси компонентов ядра *A* и окрашивающей оболочки *B*, состоящей из *n* концентрических слоев

В основу зависимости (6) было положено следующее условие: минимальная толщина *i*-ого слоя на границе с ядром гранулы не должна быть меньше диаметра самой крупной частицы исходного материала, который этот слой формирует. Толщина каждого последующего слоя оболочки будет возрастать по сравнению с предыдущим в связи с изменением в его составе процентного соотношения между компонентами *A* и *B*.

С учетом толщины ядра (*D*) и окрашивающего слоя (δ), вычисленных по формуле (5), далее рассчитываются толщины всех входящих в гранулу слоев:

$$\delta = \sum_{i=2}^n \delta_i = 0,0385D_1; \quad (7)$$

$$D = D_1 - \delta = D_1 - 0,0385D_1 = 0,9615D_1. \quad (8)$$

Для принятой модели из пяти слоев уравнение примет вид:

$$0,0385D_1 = \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 + \delta_5 = \delta_2 + a\delta_2 + a^2\delta_2 + a^3\delta_2, \quad (9)$$

а объем *i*-ого слоя будет определяться выражением

$$V_i = \frac{4}{3}\pi \left[\left(\sum_{j=1}^i \delta_j \right)^3 - \left(\sum_{j=1}^{i-1} \delta_j \right)^3 \right]. \quad (10)$$

В работе [14] в рамках модели твердых сфер предложена формула для определения плотности (Φ_m) заполнения пространства заданного объема полидисперсными частицами сферической формы с радиусами $r_0 = r_{\max}, r_1, \dots, r_m$:

$$\Phi_m = \Phi_0 \left(1 + \sum_{k=1}^m \frac{r_k^3}{r_0^3} \frac{n_k}{n_0} \right) = \frac{1}{V_i} \sum_{k=0}^m V_k n_k, \quad (11)$$

где Φ_0 – плотность укладки сфер максимального радиуса; n_k – количество сфер *k*-ого радиуса; V_k – объем сферы *k*-ого радиуса, мм³; V_i – объем заполняемого сферами пространства, мм³.

В качестве объема пространства, заполняемого твердыми сферами, принимается объем *i*-ого слоя гранулы, определяемый по формуле (10). Считая, что укладка частиц в объеме происходит неупорядоченно (аморфно), плотность их распределения Φ_m , как показывают натурные и численные эксперименты [15, 16], не превышает 0,64.

Т а б л и ц а 1

Содержание компонентов по слоям гранулы					
Компонент	Содержание, %, компонента в слое				
	1	2	3	4	5
Базовое сырье (<i>A</i>)	100	75	50	25	0
Красящая добавка (<i>B</i>)	0	25	50	75	100

С учетом средневзвешенных значений диаметров элементарных частиц сырьевых компонентов ядра A и оболочки B , полученных по результатам гранулометрического анализа сырья, для двухкомпонентной системы (см. рисунок), уравнение укладки сферических частиц A и B внутри i -ого слоя гранулы примет вид:

$$\Phi_m = \frac{V_A n_A^i + V_B n_B^i}{V_i}, \quad (12)$$

где V_A и V_B – объем сферических частиц A и B , мм³; n_A^i и n_B^i – количество сферических частиц A и B в i -ом слое гранулы.

Используя принятое ранее процентное распределение сырьевых компонентов по слоям гранулы (табл. 1), для представленной на рисунке модели количество частиц A и B можно найти, подставив уже известные значения и решив следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \Phi_m V_i = V_A n_A + V_B n_B; \\ V_A n_A = z_A^i \Phi_m V_i; \\ V_B n_B = z_B^i \Phi_m V_i, \end{cases} \quad (13)$$

где z_A^i и z_B^i – содержание частиц A и B в i -ом слое гранулы.

Общий объем частиц компонентов, содержащихся в грануле, определяется по формулам:

$$V_A^{\text{общ}} = V_A \sum_{i=1}^{m-1} n_i; \quad (14)$$

$$V_B^{\text{общ}} = V_B \sum_{i=2}^m n_i, \quad (15)$$

где m – количество слоев, на которое разделена гранула.

По найденным значениям общего объема частиц базового сырья или красителя вычисляется общая масса компонента, необходимого для формирования ядра и окрашивающей оболочки одной гранулы:

$$m_{\text{комп}} = \frac{V^{\text{общ}}}{1/\rho}, \quad (16)$$

где $1/\rho$ – удельный объем частиц базового сырья или красителя, полученный по данным лазерной гранулометрии, мкм³/г.

Используя вышеизложенный алгоритм, можно рассчитать количество красящей добавки, необходимой как на опудривание одной гранулы среднего размера, так и на получение целого изделия:

$$m_{\Sigma \text{комп}} = m_{\text{комп}} \frac{V_{\text{изд}}}{\frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_1}{2} \right)^3}, \quad (17)$$

где $V_{\text{изд}}$ – объем засыпаемого гранулами пространства для формовки изделия-сырца, м³.

Повышение точности вычислений возможно путем увеличения количества слоев во второй (переходной) зоне (см. рисунок). Кроме того, более детальный учет размеров гранул и частиц также позволит уйти от использования средневзвешенных значений и повысить достоверность расчетных данных. Однако, как показал итоговый анализ вычислений, увеличение слоев до количества более 8 – 10 значительно усложняет процедуру расчета и не приводит к существенному изменению результатов по сравнению с величиной i , равной 5 – 7.

Пример расчета

Рассмотрим предложенную методику для случая окрашивания глинистого сырья техническими марганецсодержащими отходами. Согласно разработанной модели из пяти слоев (см. рисунок) в качестве базового сырья для формирования ядер (компонент A) к расчету была принята глина Ленинск-Кузнецкого месторождения (Кемеровская обл. – Кузбасс), а в роли красящего сырья для формирования оболочки (компонент B) – пыль газоочистки от производства ферросиликомарганца. Подробное описание исходных материалов, включая данные гранулометрических исследований, приведено в работе [9]. Средневзвешенный размер исходных частиц сырьевых компонентов A и B , а также их удельный объем соответственно равны $d_q^A = 15,3$ мкм; $d_q^B = 16,2$ мкм; $1/\rho^A = 2,2 \cdot 10^{11}$ мкм³/г; $1/\rho^B = 2,5 \cdot 10^{11}$ мкм³/г.

Эмпирический коэффициент a для используемого сырья и формируемых гранул был принят 1,276. Тогда, задаваясь минимальной толщиной слоя $n = 2$, равной диаметру самой крупной частицы (компонент B), входящей в этот слой, по формуле (6) определяем толщину 2 – 5 слоев:

$$\delta_2 = d_q^B = 16,2 \text{ мкм};$$

$$\delta_3 = a\delta_2 = 1,276 \cdot 16,2 = 20,67 \text{ мкм};$$

$$\delta_4 = a\delta_3 = a^2\delta_2 = 1,276 \cdot 20,67 = 26,38 \text{ мкм};$$

$$\delta_5 = a\delta_4 = a^3\delta_2 = 1,276 \cdot 26,38 = 33,65 \text{ мкм}.$$

Рассчитав толщину всех слоев, составляющих оболочку гранулы, по формулам (9) и (8) вычисляем соответственно ее суммарную толщину и диаметр ядра:

$$\begin{aligned}\delta &= \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 + \delta_5 = 16,2 + 20,67 + \\ &+ 26,38 + 33,65 = 96,9 \text{ мкм}; \\ D &= D_1 - \delta = 2500 - 96,9 = 2403,1 \text{ мкм}.\end{aligned}$$

Определенная толщина 2δ (193,8 мкм) красящей оболочки составляет 7,8 % от диаметра (2500 мкм) целой гранулы, что согласуется с принятым ранее интервалом 5 – 10 %, обеспечивающим плотную упаковку гранул при прессовании.

Зная средневзвешенный диаметр компонентов A ($d_{\text{ч}}^A = 15,3$ мкм) и B ($d_{\text{ч}}^B = 16,2$ мкм), определяем их объем

$$\begin{aligned}V_A &= \frac{4}{3}\pi r_A^3 = \frac{4}{3}\pi \cdot 7,65^3 = 1874,4 \text{ мкм}^3; \\ V_B &= \frac{4}{3}\pi r_B^3 = \frac{4}{3}\pi \cdot 8,1^3 = 2225,0 \text{ мкм}^3.\end{aligned}$$

Для вычисления количества частиц базового и красящего сырья по слоям формируемой гранулы по уравнению (10) предварительно рассчитаем объем каждого из слоев:

$$\begin{aligned}V_1 &= \frac{4}{3}\pi r_1^3 = \frac{4}{3}\pi \cdot 2403,1^3 = \\ &= 7262630146,1 \text{ мкм}^3 = 7,26 \text{ мм}^3; \\ V_2 &= \frac{4}{3}\pi \left[\left(\sum_{j=1}^2 \delta_j \right)^3 - \left(\sum_{j=1}^{2-1} \delta_j \right)^3 \right] = \\ &= \frac{4}{3}\pi [2419,3^3 - 2403,1^3] = \\ &= 147870918,5 \text{ мкм}^3 = 0,15 \text{ мм}^3 \\ V_3 &= \frac{4}{3}\pi \left[\left(\sum_{j=1}^3 \delta_j \right)^3 - \left(\sum_{j=1}^{3-1} \delta_j \right)^3 \right] = \\ &= \frac{4}{3}\pi [2440,0^3 - 2419,3^3] = \\ &= 191568871,6 \text{ мкм}^3 = 0,19 \text{ мм}^3;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_4 &= \frac{4}{3}\pi \left[\left(\sum_{j=1}^4 \delta_j \right)^3 - \left(\sum_{j=1}^{4-1} \delta_j \right)^3 \right] = \\ &= \frac{4}{3}\pi [2466,4^3 - 2440,0^3] = \\ &= 249247251,5 \text{ мкм}^3 = 0,25 \text{ мм}^3; \\ V_5 &= \frac{4}{3}\pi \left[\left(\sum_{j=1}^5 \delta_j \right)^3 - \left(\sum_{j=1}^{5-1} \delta_j \right)^3 \right] = \\ &= \frac{4}{3}\pi [2500,0^3 - 2466,4^3] = \\ &= 325766199,6 \text{ мкм}^3 = 0,33 \text{ мм}^3.\end{aligned}$$

Далее, используя данные о процентном содержании компонентов A и B по слоям гранулы (табл. 1) и плотность их распределения $\Phi_m = 0,64$, через уравнения, входящие в систему (13), устанавливаем точное количество частиц для каждого из слоев. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Количество частиц A и B в первом слое (ядре) гранулы

$$\begin{aligned}n_A^1 &= \frac{z_A^1 \Phi_m V_1}{V_A} = \frac{1 \cdot 0,64 \cdot 7262630146,1}{1874,4} = \\ &= 2479826 \text{ частиц}; \\ n_B^1 &= \frac{z_B^1 \Phi_m V_1}{V_B} = \frac{0 \cdot 0,64 \cdot 7262630146,1}{2225,0} = 0 \text{ частиц}.\end{aligned}$$

Количество частиц A и B во втором слое гранулы

$$\begin{aligned}n_A^2 &= \frac{z_A^2 \Phi_m V_2}{V_A} = \frac{0,75 \cdot 0,64 \cdot 147870918,5}{1874,4} = \\ &= 37868 \text{ частиц}; \\ n_B^2 &= \frac{z_B^2 \Phi_m V_2}{V_B} = \frac{0,25 \cdot 0,64 \cdot 147870918,5}{2225,0} = \\ &= 10634 \text{ частиц}.\end{aligned}$$

Т а б л и ц а 2

Распределение частиц по слоям гранулы					
Компонента	Количество частиц в слое				
	1	2	3	4	5
Базовое сырье (A)	2479826	37868	32706	21276	0
Красящая добавка (B)	0	10634	27552	53771	93705

Количество частиц A и B в третьем слое гранулы:

$$n_A^3 = \frac{z_A^3 \Phi_m V_3}{V_A} = \frac{0,5 \cdot 0,64 \cdot 191568817,6}{1874,4} = 32706 \text{ частиц};$$

$$n_B^3 = \frac{z_B^3 \Phi_m V_3}{V_B} = \frac{0,5 \cdot 0,64 \cdot 191568817,6}{2225,0} = 27552 \text{ частиц}.$$

Количество частиц A и B в четвертом слое гранулы:

$$n_A^4 = \frac{z_A^4 \Phi_m V_4}{V_A} = \frac{0,25 \cdot 0,64 \cdot 249247251,5}{1874,4} = 21276 \text{ частиц};$$

$$n_B^4 = \frac{z_B^4 \Phi_m V_4}{V_B} = \frac{0,75 \cdot 0,64 \cdot 249247251,5}{2225,0} = 53771 \text{ частиц}.$$

Количество частиц A и B в пятом слое гранулы:

$$n_A^5 = \frac{z_A^5 \Phi_m V_5}{V_A} = \frac{0 \cdot 0,64 \cdot 325766199,6}{1874,4} = 0 \text{ частиц};$$

$$n_B^5 = \frac{z_B^5 \Phi_m V_5}{V_B} = \frac{1 \cdot 0,64 \cdot 325766199,6}{2225,0} = 93705 \text{ частиц}.$$

Общие объемы частиц базового и красящего компонентов, содержащихся в одной целой грануле определяются по формулам (14) и (15):

$$V_A^{\text{общ}} = V_A \sum_{i=1}^{5-1} n_i = 1874,4 \cdot 2571676 = 4820242916,3 \text{ мкм}^3 = 4,82 \text{ мм}^3;$$

$$V_B^{\text{общ}} = V_B \sum_{i=2}^5 n_i = 2225,0 \cdot 185661 = 413090417,1 \text{ мкм}^3 = 0,41 \text{ мм}^3.$$

Тогда, используя данные об удельных объемах частиц, общая масса компонентов для формирования ядра и окрашивающей оболочки одной гранулы по формуле (16) определится так:

$$m_A = \frac{V_A^{\text{общ}}}{1/\rho^A} = \frac{4820242916,3}{2,2 \cdot 10^{11}} = 0,0219 \text{ г};$$

$$m_B = \frac{V_B^{\text{общ}}}{1/\rho^B} = \frac{413090417,1}{2,5 \cdot 10^{11}} = 0,0017 \text{ г}.$$

Предположим, что плотность засыпки гранул в пресс-форму для формирования сырцового из-

делия составляет не менее 85 % от заполняемого объема, тогда по формуле (17) можно рассчитать общую массу компонентов, необходимых для изготовления целого изделия. Например, на получение одного полнотелого кирпича формата 1НФ (250 × 120 × 65 мм) должно быть соответственно использовано следующее количество базового (A) и красящего (B) компонентов:

$$m_{\Sigma A}^{\text{полн}} = m_A \frac{0,85 V_{\text{изд}}}{\frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_1}{2} \right)^3} = 0,0219 \cdot \frac{0,85 \cdot 1,95 \cdot 10^{15}}{\frac{4}{3} \pi \left(\frac{2500}{2} \right)^3} = 0,0219 \cdot 202701 = 4441,2 \text{ г};$$

$$m_{\Sigma B}^{\text{полн}} = m_B \frac{0,85 V_{\text{изд}}}{\frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_1}{2} \right)^3} = 0,0017 \cdot \frac{0,85 \cdot 1,95 \cdot 10^{15}}{\frac{4}{3} \pi \left(\frac{2500}{2} \right)^3} = 0,0017 \cdot 202701 = 334,9 \text{ г}.$$

В свою очередь, для формирования одного пустотелого кирпича нормального формата с семнадцатью сквозными цилиндрическими отверстиями необходимо:

$$m_{\Sigma A}^{\text{пуст}} = m_A \frac{0,85 V_{\text{изд}}}{\frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_1}{2} \right)^3} = 0,0219 \cdot \frac{0,85 \cdot 1,603 \cdot 10^{15}}{\frac{4}{3} \pi \left(\frac{2500}{2} \right)^3} = 0,219 \cdot 166633 = 3651,0 \text{ г};$$

$$m_{\Sigma B}^{\text{пуст}} = m_B \frac{0,85 V_{\text{изд}}}{\frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_1}{2} \right)^3} = 0,0017 \cdot \frac{0,85 \cdot 1,603 \cdot 10^{15}}{\frac{4}{3} \pi \left(\frac{2500}{2} \right)^3} = 0,0017 \cdot 166633 = 275,3 \text{ г}.$$

После округления расчетных данных принимаем количество глины (A) и красящего марганецсодержащего компонента (B) соответственно для полнотелого кирпича: $A = 4,44$ кг и $B = 335$ г, для пустотелого кирпича: $A = 3,65$ кг и $B = 275$ г.

Выводы

С использованием разработанного метода расчета на примере двухкомпонентной шихты установлено, что на формирование одной гранулы средневзвешенного размера 2,5 мм необходимо 0,0219 г глинистого сырья и 0,0017 г марганецсодержащих техногенных отходов. Оптимальное количество марганцевой пыли газоочистки для получения декоративного керамического кирпича каркасно-окрашенной структуры из глины Ленинск-Кузнецкой месторождения составляет 7 % от массы шихты. Без учета связующего установлен расход этих сырьевых компонентов для изготовления декоративного керамического кирпича формата 1НФ (250 × 120 × 65 мм) с учетом плотной упаковки гранулиро-

ванного пресс-порошка. Для полнотелого кирпича необходимо 4,44 кг глины и 335 г марганцевых отходов, для пустотелого кирпича с семнадцатью сквозными цилиндрическими отверстиями соответственно 3,65 кг и 275 г.

Разработанный математический метод расчета состава шихты позволяет с достаточной точностью вычислять количество сырьевых материалов, необходимых для получения керамики матричной структуры с требуемыми декоративными и физико-механическими свойствами.

Полученные составы гранулированных шихт были апробированы в лаборатории строительных материалов Сибирского государственного индустриального университета и дали хорошие результаты по окраске. Керамические образцы имели коричневый цвет. В дальнейшем планируется проведение опытно-промышленных испытаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пухаренко Ю.В., Староверов В.Д., Герасименко А.А. Повышение безопасности и качества строительных материалов на основе оценки опыта и деловой репутации предприятия // Строительные материалы. 2019. № 5. С. 3 – 8.
2. Яценко Н.Д., Зубехин А.П. Научные основы инновационных технологий керамического кирпича и управление его свойствами в зависимости от химико-минералогического состава сырья // Строительные материалы. 2014. № 4. С. 28 – 31.
3. Чумаченко Н.Г., Коренькова Е.А. Промышленные отходы – перспективное сырье для производства строительных материалов // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 3. С. 20 – 24.
4. Рассказов В.Ф., Ашмарин Г.Д., Ливада А.Н. Производство строительных материалов с использованием техногенных отходов // Стекло и керамика. 2009. № 1. С. 5 – 9.
5. Чернышов Е.М. К проблеме развития исследований и разработок в области материаловедения и высоких строительных технологий: основные акценты. – В кн.: Достижения и проблемы материаловедения и модернизации строительной индустрии. Материалы XV Акад. чтен. РААСН – Межд. науч.-техн. конф. Т. 1. – Казань: КазГАСУ, 2010. С. 8, 9.
6. Федоркин С.И., Макарова Е.С., Братковский Р.В. Утилизация дисперсных отходов производства в строительные материалы матричной структуры. – В кн.: Строительство и техногенная безопасность. Сб. науч. тр. Вып. 32. – Симферополь: НАПКС, 2010. С. 70 – 74.
7. Верещагин В.И., Шильцина А.Д., Селиванов Ю.В. Моделирование структуры и оценка прочности строительной керамики из грубозернистых масс // Строительные материалы. 2007. № 6. С. 65 – 68.
8. Столбоушкин А.Ю., Акст Д.В., Фомина О.А., Сыромясов В.А. Изменение интенсивности окраски декоративных керамических материалов матричной структуры // Труды НГАСУ. 2017. Т. 20. № 2 (65). С. 92 – 102.
9. Столбоушкин А.Ю., Фомина О.А., Акст Д.В. и др. Получение декоративной стеновой керамики из глинистого сырья и отходов добычи марганцевых руд // Строительные материалы. 2016. № 12. С. 38 – 44.
10. Акст Д.В., Столбоушкин А.Ю. Каркасно-окрашенная структура декоративного керамического кирпича с марганецсодержащими отходами. – В кн.: Качество. Технологии. Инновации. Мат-лы Всероссийской научно-практ. конф с междунар. участием. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2019. С. 109 – 114.
11. Butensky M., Human D. Rotary drum granulation: an experimental study of the factors affecting granule size // Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals. 1971. Vol. 10. No. 2. P. 212 – 219.
12. Наумов М.М., Нохратян К.А. Справочник по производству строительной керамики. Т. 3. Стеновая и кровельная керамика. – М.: Госстройиздат, 1962. – 699 с.
13. Юшкевич М.О., Роговой М.И. Технология керамики. – М.: Книга по Требованию, 2012. – 348 с.
14. Королев Л.В., Лупанов А.П., Придатко Ю.М. Плотная упаковка полидисперсных частиц в композитных строительных материалах // Современные проблемы науки и образования. 2007. № 6. С. 109 – 114.
15. Aste T., Saadstfar M., Sakellariou A., Senden T. Investigating the geometrical structure of disordered sphere packaging // Physica A. 2004. Vol. 339. P. 16 – 23.
16. Torquato S., Stillinger F.H. Multiplicity of generation, selection, and classification procedure for jammed hard particle // Physical Review Letters. 2000. Vol. 84. P. 2064 – 2067.

© 2020 г. Д.В. Акст, А.Ю. Столбоушкин
Поступила в редакцию 7 сентября 2020 г.