

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ
MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

УДК 621.454.3

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-263-270>

Поступила в редакцию 29.03.2018

Received 29.03.2018

А. Ф. Ильющенко^{1,2}, В. М. Булойчик³, О. К. Кривонос¹, Е. Е. Петюшик¹

¹Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии, Минск, Беларусь

²Институт порошковой металлургии, Минск, Беларусь

³Военная академия Республики Беларусь, Минск, Беларусь

**ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА
ТВЕРДОФАЗНОГО СМЕШИВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ
ГЕТЕРОГЕННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА**

Аннотация. Рассмотрен один из подходов к моделированию процесса смешивания полидисперсных порошков, включающих три основные фракции различных размеров, форма которых приближается к сферической. Такой подход позволяет снизить материальные издержки на стадии разработки технологических процессов смешивания благодаря уменьшению количества проводимых экспериментов. Для получения наиболее равномерного смешивания при минимальном времени технологического процесса в основу разрабатываемой модели положена целевая функция за определенное число итераций смешивания композиции получения требуемой плотности (максимально возможной) упаковки смешиваемых частиц твердой фазы.

С целью разработки модели процесса смешивания использовался один из эвристических алгоритмов – метод отжига металла. В качестве представительного элемента модели принята элементарная ячейка в виде гексогонально плотно упакованных частиц вокруг одной, введенной в состав композиционного материала (в небольшом количестве, от 5 до 15 %) в качестве модификатора. Модель формализована с условием усреднения размеров частиц в пределах каждой из фракций, а также морфологии их поверхности. Количество итераций переупаковки частиц рассчитывается по вероятности получения минимального объема пустот в составе представительного элемента и равномерности распределения модифицирующего элемента.

Сопоставление значений, полученных в ходе моделирования, с измеренными значениями результатов перемешивания на конкретном смесителе позволят сформировать шкалу соответствия результатов моделирования режимам работы технологического оборудования. Это обеспечит возможность прогнозирования целесообразных режимов смешивания еще на этапе разработки технологического процесса при колебаниях характеристик поставляемого сырья и тем самым создать методологические основы для формирования системы управления качеством изготовления гетерогенного композиционного материала. Модель может быть адаптирована для полидисперсных порошков с содержанием более трех основных фракций.

Ключевые слова: гетерогенный композиционный материал, полидисперсный порошок, плотность упаковки, моделирование, метод отжига металла

Для цитирования. Формализация процесса и разработка алгоритма твердофазного смешивания компонентов гетерогенного композиционного материала / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 3. – С. 263–270. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-263-270>

A. Ph. Ilyushchanka^{1,2}, V. M. Buloichyk³, A. K. Kryvanos¹, Ya. Ya. Piatsiushyk¹

¹State Research and Production Powder Metallurgy Association, Minsk, Belarus

²Powder Metallurgy Institute, Minsk, Belarus

³Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus

**FORMALIZATION OF THE PROCESS AND DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM
FOR SOLID-PHASE MIXING OF COMPONENTS OF A HETEROGENEOUS COMPOSITE MATERIAL**

Abstract. The article considers one of the approaches to modeling the process of mixing of polydisperse powders, which includes three main fractions of different sizes, the shape of which is close to spherical. The work is aimed at reducing material costs at the stage of development of mixing processes by reducing the number of experiments. Aiming to obtain the most uniform mixing with the minimum time of the technological process, the model is based on the target function for a certain number of iterations of mixing of the composition to obtain the required (maximum possible) density of the package of mixed solid particles.

To develop a model of the mixing process, one of the heuristic algorithms – the “metal annealing method” – was used. As a representative element of the model, an elementary cell in the form of several hexagonal densely packed particles around one introduced into the composition of the composite material (in a small amount, from 5 to 15 %) as a modifier was adopted. The model is formalized with the condition of averaging the particle sizes within each fraction, as well as the morphology of their surface. The number of particle repackaging iterations is calculated by the probability of obtaining the minimum amount of voids in the representative element and the uniformity of distribution of the modifying element.

Comparison of the values obtained during the simulation with the measured values of the mixing results on a specific mixer will form a scale of compliance of the simulation results with the operating modes of the process equipment. This will make it possible to predict the appropriate mixing modes at the stage of development of the technological process with the possible system of fluctuations in the characteristics of the supplied raw materials and, thereby, to create a methodological basis for the formation of quality management of manufacturing heterogeneous composite material. The model can be adapted for polydisperse powders with the content of the main fractions of more than three.

Keywords: heterogeneous composite material, polydisperse powder, packing density, modeling, method of metal annealing

For citation. Plyushchanka A. Ph., Buloichyk V. M., Kryvanos A. K., Piatsiushyk Ya. Ya. Formalization of the process and development of an algorithm for solid-phase mixing of components of a heterogeneous composite material. *Vestsi Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 3, pp. 263–270 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-263-270>

Введение. Энергонасыщенные гетерогенные композиционные материалы (ГКМ) представляют собой смесь равномерно распределенных полидисперсных частиц твердой фазы размером от 40 до 400 мкм в количестве 75–85 мас.% в виде аммониевой соли хлорной кислоты, алюминиевого порошка или циклического нитрамина в среде полимерного связующего [1]. За счет подбора фракций этих компонентов и их количества обеспечивается наиболее плотная упаковка частиц твердой фазы [2], а за счет определения необходимого числа циклов смешивания – равномерность распределения частиц каждой фракции по всему объему смеси.

В большинстве случаев способы и режимы смешивания компонентов твердой фазы ГКМ определяют эмпирически, с учетом анализа большого числа опытов, предполагающих подбор целесообразной последовательности добавления составных частей в общую композицию, времени ее смешивания, скорости вращения рабочего органа смесителя, температуры и значения вакуума в рабочей камере смесителя и других характеристик технологического процесса. Как известно, такой подход достаточно длителен по времени, так как предполагает периодическую остановку процесса изготовления композиционного материала на определенном этапе для отбора проб и проведения соответствующих измерений. При этом следует учитывать, что полученные в ходе проведенных измерений данные не всегда изменяются соответствующим образом при масштабировании процесса изготовления ГКМ. В свою очередь, изготовление ГКМ в требуемых объемах для проведения измерений из-за высокой стоимости сырьевых материалов и необходимости последующей утилизации экспериментальных образцов является достаточно затратным методом исследования.

Одним из методов, обеспечивающих минимизацию числа опытов, а соответственно, и снижение затрат на получение искомого результата, является моделирование исследуемого процесса в целях последующего подбора необходимых параметров технологии изготовления ГКМ.

В [3] рассмотрены общие подходы к моделированию процесса смешивания твердой фазы ГКМ на основе генетического алгоритма и осуществлена постановка задачи для синтеза алгоритма исследования. Однако дальнейшая формализация рассматриваемого процесса на основе предложенного метода вызвала определенные трудности при формировании необходимого числа «популяций». Поэтому для последующей разработки модели смешивания (завершения формализации и построения алгоритма моделирования) использовался метод отжига металла [4].

Постановка задачи исследования. За основу принят состав ГКМ, изготовленный на основе двухфракционного состава (крупной и мелкой фракций) аммониевой соли хлорной кислоты (NH_4ClO_4), описанный в [2], модифицированный 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадициклогексаном ($\text{CH}_2\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$) [5]. В рассматриваемой задаче смешиванию подлежат частицы трех типов. Объемы смешиваемого материала обозначим V_1 , V_2 и V_3 соответственно. Объем существующих «пустот» между отдельными частицами этих веществ обозначим V_0 . Тогда объем всей смеси ГКМ (V) примет значение

$$V_c = V_0 + V_1 + V_2 + V_3. \quad (1)$$

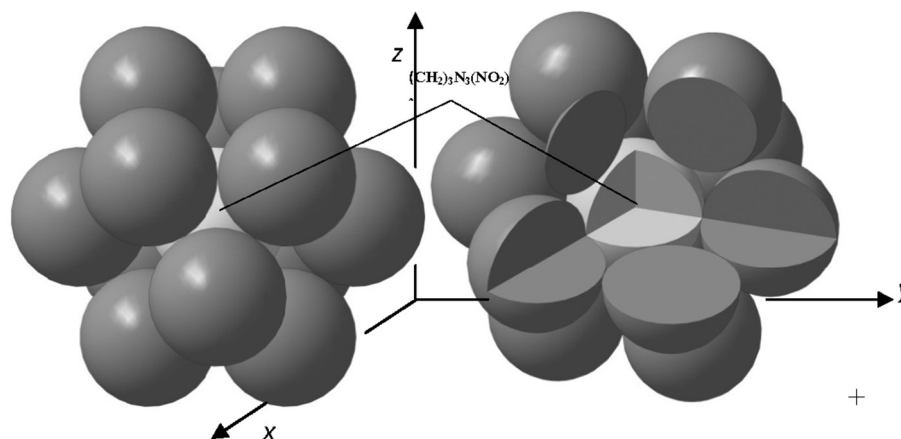


Рис. 1. Элементарная ячейка для 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазациклогексана и крупной фракции аммониевой соли хлорной кислоты

Fig. 1. Elementary cell for 1,3,5-trinitro-1,3,5-triazacyclohexane and large fraction of ammonium salt of chloric acid

В последующих рассуждениях будем рассматривать не всю смесь, а усредненную элементарную ячейку ГКМ в составе n_1 , n_2 и n_3 количества частиц каждого типа. Проведенные в [2, 3] расчеты показали, что элементарной ячейкой для принятого за основу состава ГКМ является ячейка, имеющая гексагонально плотную упаковку и включающая: одну частицу 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазациклогексана, расположенную в центре принятой элементарной ячейки; 12 частиц крупной фракции аммониевой соли хлорной кислоты, плотно примыкающих к частице 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазациклогексана.

На рис. 1 представлен вид рассматриваемой элементарной ячейки.

В данном примере количество частиц каждого типа принято $n_1 = 1$ и $n_2 = 12$ соответственно. При этом между примерно одинаковыми $13 = n_1 + n_2$ шарами будут иметь место 13 октаэдрических и 26 тетраэдрических пустот, совокупность объемов которых определяет плотность упаковки ϕ . Эти пустоты заполняются частицами мелкой фракции аммониевой соли хлорной кислоты в количестве n_3 . В реальном представлении n_3 изменяется в диапазоне от 100 до 400.

Обозначим: r_{10} – средний радиус частицы 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазациклогексана; r_{20} – средний радиус частицы крупной фракции аммониевой соли хлорной кислоты; r_{30} – средний радиус частицы мелкой фракции аммониевой соли хлорной кислоты.

Вся ячейка может быть описана сферой, поверхность которой проходит по касательной наружных точек крупных частиц с радиусом r_c и объемом v_c .

В первом приближении $r_c \approx r_{10} + 2r_{20}$.

С учетом плотности упаковки объем такой элементарной ячейки имеет значение

$$v_c = \frac{4}{3} \pi r_c^3 \phi. \quad (2)$$

Формализация процесса смешивания твердой фазы ГКМ. Процесс формирования смеси представим как случайный процесс заполнения элементарной ячейки частицами трех типов и будем его воспроизводить с помощью алгоритма отжига металла [6].

Примем, что объем отдельно взятой частицы первого типа со средним радиусом r_{10} составит v_1 , объем частицы второго типа со средним радиусом r_{20} – v_2 и объем частицы третьего типа со средним радиусом r_{30} – v_3 .

В этом случае общее число M_1 частиц 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазациклогексана в исходном материале примет значение

$$M_1 = \frac{V_1}{v_1} = V_1 \frac{3}{4\pi r_{10}^3}. \quad (3)$$

Аналогично в исходном материале число частиц M_2 и M_3 (аммониевой соли хлорной кислоты крупной и мелкой фракции соответственно) примут значения

$$M_2 = \frac{V_2}{v_2} = V_2 \frac{3}{4\pi r_{20}^3} \text{ и } M_3 = \frac{V_3}{v_3} = V_3 \frac{3}{4\pi r_{30}^3}. \quad (4)$$

Суммарное число частиц всех трех типов запишется как

$$M_c = M_1 + M_2 + M_3. \quad (5)$$

Считая равномерным распределение частиц в исходном материале, оценим вероятность того, что в начале этого процесса в ячейку попадет частица 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадициклогексана:

$$p_1 = \frac{M_1}{M_c}. \quad (6)$$

Для вероятности попадания в элементарную ячейку частиц крупной и мелкой фракций аммониевой соли хлорной кислоты можно записать соответственно

$$p_2 = \frac{M_2}{M_c}, \quad p_3 = \frac{M_3}{M_c}. \quad (7)$$

Из условия нормировки вероятность формирования пустот в пределах выбранной элементарной ячейки примет значение

$$p_0 = 1 - p_1 - p_2 - p_3. \quad (8)$$

Циклическая пошаговая ($i = 1, 2, \dots$) процедура получения наиболее плотной упаковки частиц заключается в формировании такой средней по всей смеси ячейки, в которой ее объем принимает наименьшее значение, а число частиц каждого типа должно быть n_1, n_2 и n_3 . Искомую ячейку, представляющую окончательное решение поставленной задачи, будем характеризовать вектором, который имеет координаты $X^{\text{opt}} = X[n_1, n_2, n_3, v_c^{\text{min}}]$.

На первом шаге итерационной процедуры объем ячейки примет значение

$$v_c^1 = v_c = \frac{4}{3} \pi r_{\text{я}}^3 \phi^1. \quad (9)$$

Это выражение будет характерно для элементарной ячейки, формируемой имеющими сферическую форму частицами с одинаковыми линейными размерами. В то же время частицы аммониевой соли хлорной кислоты и 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадициклогексана чаще всего имеют форму, близкую к сферической, с показателем фактора формы $K_{\phi} \geq 0,9$ и некоторыми расхождениями в линейных размерах, определяемыми разницей между размерами ячеек используемых сит. Морфология поверхности частиц крупной фракции аммониевой соли хлорной кислоты и 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадициклогексана с измеренными их линейными размерами представлена на рис. 2.

В дальнейшем с учетом значения фактора формы $K_{\phi} \geq 0,9$ этим показателем можно пренебречь. Из рис. 2 следует, что наиболее приемлемым описанием отдельных частиц будет представление их в виде шаров со случайным радиусом:

$$\begin{aligned} r_1 &= r_{10} + \Delta r_1 (\xi_1 - 0,5); \\ r_2 &= r_{20} + \Delta r_2 (\xi_2 - 0,5); \\ r_3 &= r_{30} + \Delta r_3 (\xi_3 - 0,5), \end{aligned} \quad (10)$$

где $\Delta r_1, \Delta r_2, \Delta r_3$ – максимальное отклонение радиусов частиц соответствующего типа от их средних значений r_{10}, r_{20}, r_{30} ; ξ_1, ξ_2, ξ_3 – случайные величины с равномерным в интервале $[0; 1]$ законом распределения.

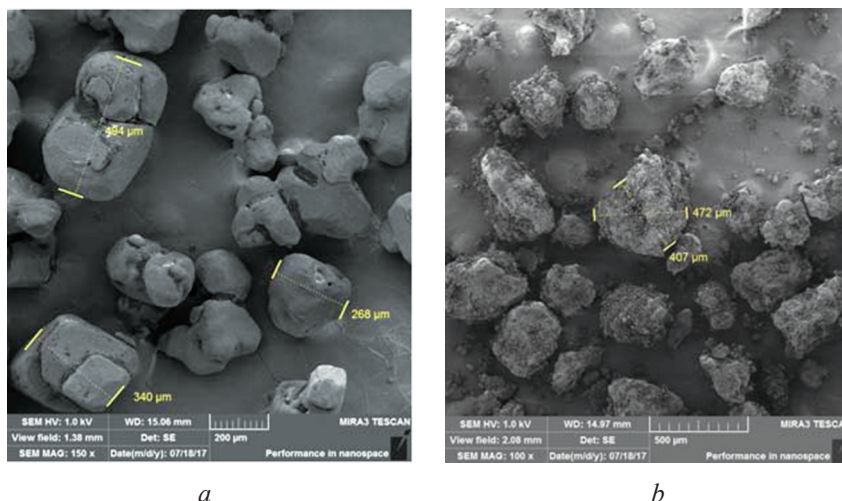


Рис. 2. Морфология крупной фракции аммониевой соли хлорной кислоты (а) и 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазациклогексана (b)

Fig. 2. Morphology of coarse fraction of ammonium salt of perchloric acid (a), and 1,3,5-trinitro-1,3,5-triazacyclohexane (b)

Разработка алгоритма построения частного решения. Процедуру формирования содержимого элементарной ячейки представим следующими действиями.

С помощью датчика случайных чисел выбираем число ζ , равномерно распределенное на интервале $[0;1]$.

Если $\zeta \in [0, p_1]$, то принимаем решение о попадании в элементарную ячейку частицы первого типа.

Если $\zeta \in [p_1, p_2]$, то принимаем решение о попадании в элементарную ячейку частицы второго типа.

Если $\zeta \in [p_2, p_3]$, то принимаем решение о попадании в элементарную ячейку частицы третьего типа.

Если $\zeta \in [p_3, 1]$, то принимаем решение о непопадании в элементарную ячейку ни одной частицы (то есть о наличии пустоты в данном цикле процедуры).

Приведенные вычисления повторяются $N = n_1 + n_2 + n_3$ число раз, соответствующих числу всех частиц, которое должно входить в состав будущей «идеальной» ячейки. В результате на первом шаге итерационной процедуры будет сформирована элементарная ячейка, характеризующаяся вектором $X^1 = X^1[n_1^1, n_2^1, n_3^1, v_c^1]$.

По приведенной схеме в последующем на каждом i -м шаге итерационной процедуры формируются элементарные ячейки со случайной структурой, то есть строится так называемое частное i -е решение, которое в соответствии с алгоритмом отжига металла должно далее совершенствоваться (то есть ячейка будет уплотняться) по мере перемешивания.

Обозначим n_1^i, n_2^i, n_3^i – случайно выбранное в элементарную ячейку в процессе перемешивания на i -м шаге число частиц первого, второго и третьего типа соответственно. Такую ячейку будем характеризовать вектором, имеющим координаты $X^i = X^i[n_1^i, n_2^i, n_3^i, v_0^i]$.

Тогда можно записать

$$v_1^i = n_1^i \frac{4}{3} \pi r_1^3, v_2^i = n_2^i \frac{4}{3} \pi r_2^3, v_3^i = n_3^i \frac{4}{3} \pi r_3^3. \quad (11)$$

Для получения значения объема пустот v_0 воспользуемся соотношением

$$v_0^i = v_c^i - (v_1^i + v_2^i + v_3^i). \quad (12)$$

Качество полученных ячеек (эффективность каждого частного решения X_i) будем характеризовать близостью вектора X_i к вектору $X^{\text{opt}} = X[n_1, n_2, n_3, v_c^{\text{min}}]$. Для этого рассчитывается величина

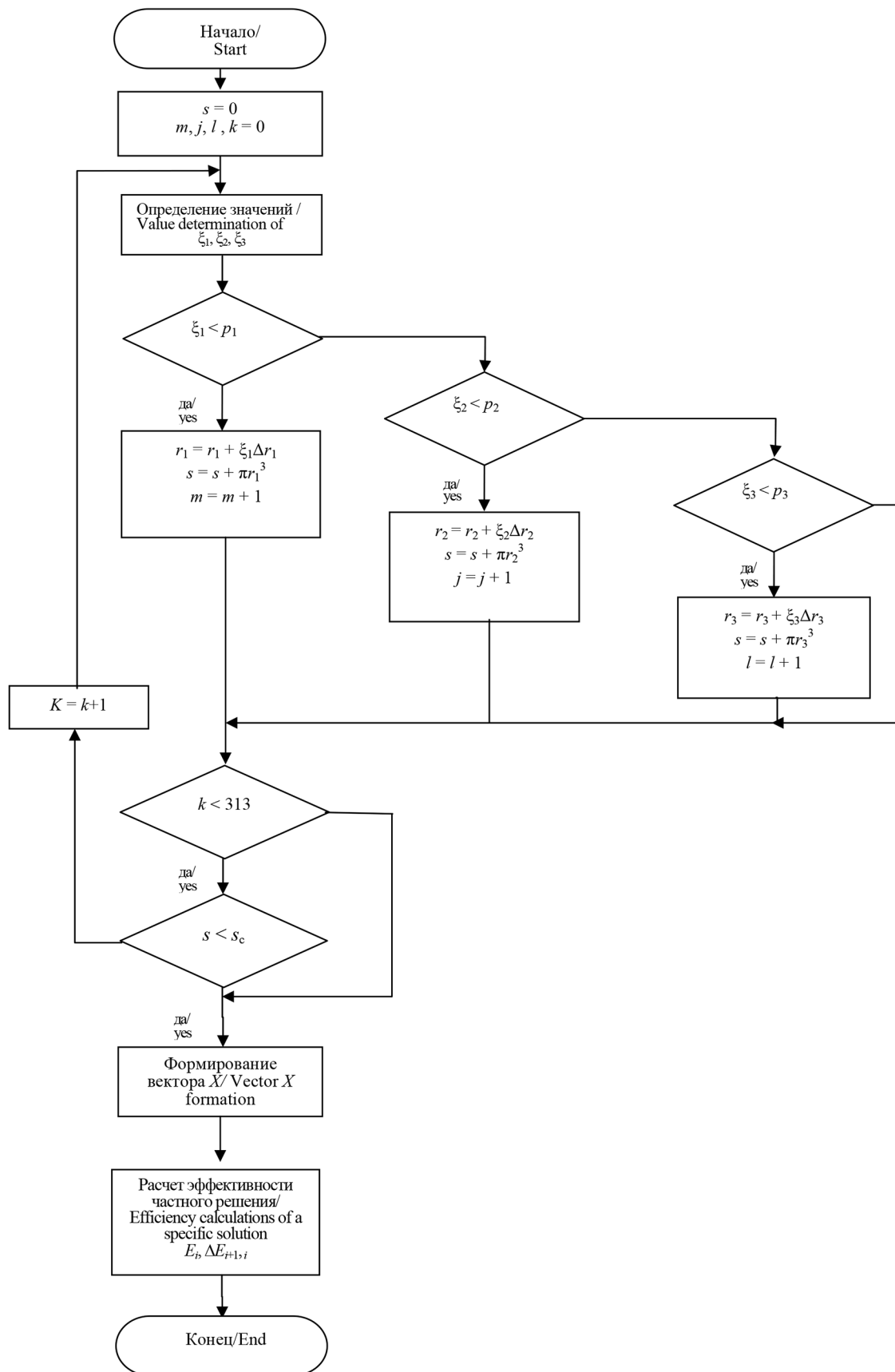


Рис. 3. Алгоритм построения частного решения
Fig. 3. Algorithm for construction of particular solution

$$E_i = [(n_1 - n_1^i)^2 r_1^3 + (n_2 - n_2^i)^2 r_2^3 + (n_3 - n_3^i)^2 r_3^3], \quad (13)$$

а на каждом последующем $(i+1)$ -м шаге определяется разница

$$\Delta E_{i+1, i} = E_{i+1} - E_i. \quad (14)$$

Алгоритм построения частного решения приведен на рис. 3.

Если $\Delta E_{i+1, i} < 0$, то новое решение лучше предыдущего и запоминается. В ином случае, прежде чем его отбросить и перейти к следующей итерации, оценивается вероятность сохранения полученного «плохого» решения. Эта вероятность зависит от так называемой температуры отжига. Аналогом «температуры отжига» принимается объем элементарной ячейки v_c^{i+1} , уменьшающийся от итерации к итерации. Закон изменения объема смеси (то есть закон уплотнения элементарной ячейки) предлагается принять следующим:

$$v_c^i = v_{co} \left[1 + \frac{1}{i^\alpha} \right], \quad i = 1, 2, \dots \quad (15)$$

Здесь $\alpha \in [1; 2; 3]$ – настроечный коэффициент, регулирующий скорость отжига; v_{co} – предельное значение объема элементарной ячейки.

В конце каждой i -й итерации осуществляется корректировка объема v_c^i (в соответствии с выражением $v_c^i = v_{co} \left[1 + \frac{1}{i^\alpha} \right]$) и пересчитываются вероятности выбора частиц каждого типа по следующим формулам $p_1^{i+1} = \frac{v_1^i}{v_c^i}$, $p_2^{i+1} = \frac{v_2^i}{v_c^i}$, $p_3^{i+1} = \frac{v_3^i}{v_c^i}$.

С учетом условия нормировки $p_0^{i+1} = 1 - p_1^{i+1} - p_2^{i+1} - p_3^{i+1}$.

Процедура формирования содержимого элементарной ячейки повторяется, то есть выполняется $(i+1)$ -я итерация.

Расчеты продолжаются до тех пор, пока значение $\Delta E_{i+1, i}$ с заранее заданной точностью не приблизится к нулю, то есть $\Delta E_{i+1, i} \approx 0$.

Число итераций (циклов смешивания) i , при котором выполняется вышеприведенное условие, характеризует искомое время перемешивания 1,3,5-тринитро-1,3,5-триаза циклогексана и двух фракций аммониевой соли хлорной кислоты. Сопоставление значений, полученных в ходе моделирования, с измеренными значениями результатов перемешивания на конкретном смесителе позволят сформировать шкалу соответствия результатов моделирования режимам работы технологического оборудования.

Выводы. Предложенный способ моделирования позволяет избежать локальных ошибок при исследовании процесса формирования максимально плотной упаковки полидисперсных порошков твердой фазы ГКМ в процессе их перемешивания. Наличие такой модели делает процесс смешивания более прогнозируемым, обеспечивая производителя ГКМ требуемой производственной информацией (продолжительность перемешивания). Это в свою очередь позволяет улучшить технологический процесс за счет нахождения целесообразных режимов еще на этапе его разработки при возможных колебаниях характеристик поставляемого сырья и тем самым создать методологические основы для формирования системы управления качеством производства ГКМ.

Список использованных источников

1. Энергонасыщенные гетерогенные композиционные материалы на полимерной основе. Некоторые проблемы разработки и пути их решения / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия: респ. межведомств. сб. науч. тр. / редкол.: А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2016. – Вып. 39. – С. 12–16.

2. Повышение плотности упаковки твердой фазы гетерогенного композиционного материала. Основные проблемы и пути их решения / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия: респ. межведомств. сб. науч. тр. / редкол.: А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2017. – Вып. 40. – С. 42–47.

3. Кривонос, О. К. Моделирование процесса смешивания энергонасыщенного композиционного материала на основе генетического алгоритма / О. К. Кривонос // Сборник научных статей Военной академии Республики Беларусь. – 2017. – Вып. 33. – С. 90–97.

4. Kirkpatrick, S. Optimization by Simulated Annealing / S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr., M. P. Vecchi // Science. – 1983. – Vol. 220, № 4598. – P. 671–680. <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>

5. Ильющенко, А. Ф. Модифицирование энергонасыщенного гетерогенного композиционного материала циклическими нитраминами / А. Ф. Ильющенко, Е. Е. Петюшик, О. К. Кривонос // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 27–33. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-1-27-33>

6. Лопатин, А. С. Метод отжига [Электронный ресурс] / А. С. Лопатин. – Режим доступа: <http://www.math.spbu.ru/user/gran/sbl/lopatin.pdf> – Дата доступа: 09.03.2018.

References

1. Ilyushchanka A. Ph., Kryvanos A. K., Piatsiushyk Ya. Ya., Smirnov G. V. Energy-saturated heterogeneous composite-materials on a polymer base. Some development issues and ways to solve them. *Poroshkovaya metallurgiya: Respublikanskii mezvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov* [Powder Metallurgy: Republican Inter-Institutional Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2016, Issue 39, pp. 12–16 (in Russian).

2. Ilyushchanka A. Ph., Kryvanos A. K., Piatsiushyk Ya. Ya., Smirnov G. V. Increasing the density of the solid phase packing of a heterogeneous composite material. The main problems and ways to solve them. *Poroshkovaya metallurgiya: Respublikanskii mezvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov* [Powder Metallurgy: Republican Inter-Institutional Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017, Issue 40, pp. 42–47 (in Russian).

3. Krivonos O. K. Modeling the process of mixing energy-saturated composite material based on genetic algorithm. *Sbornik nauchnykh statei VoЕННОI akademii Respubliki Belarus'* [Collection of scientific articles of the Military Academy of the Republic of Belarus], 2017, Issue 33, pp. 90–97 (in Russian).

4. Kirkpatrick S., Gelatt Jr. C. D., Vecchi M. P. Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 1983, vol. 220, no. 4598, pp. 671–680. <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>

5. Ilyushchanka A. Ph., Piatsiushyk Ya. Ya., Kryvanos A. K. Modification of the energy-saturated heterogeneous composite material by cyclic nitramines. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 27–33 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-1-27-33>

6. Lopatin A. S. *Method of annealing*. Available at: <http://www.math.spbu.ru/user/gran/sbl/lopatin.pdf> (Accessed 9 March 2018) (in Russian).

Информация об авторах

Ильющенко Александр Федорович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, генеральный директор, Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alexil@mail.belpak.by

Булойчик Василий Михайлович – доктор технических наук, профессор, начальник центра моделирования военных действий, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vas-mih@tut.by

Кривонос Олег Константинович – кандидат военных наук, заместитель генерального директора, Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Krivonos_ok@tut.by

Петюшик Евгений Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе, Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pet65@bk.ru

Information about the authors

Aliaksandr F. Ilyushchanka – Correspondent Member of National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, General Director, State Research and Production Powder Metallurgy Association (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alexil@mail.belpak.by

Vasyl M. Buloychik – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Center for simulation of military operations, Military Academy of the Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vas-mih@tut.by

Aleh K. Kryvanos – Ph. D. (Military Science), Deputy of General Director, State Research and Production Powder Metallurgy Association (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Krivonos_ok@tut.by

Yauheni Ya. Piatsiushyk – D. Sc. (Engineering), Professor, Deputy of General Director for Research, State Research and Production Powder Metallurgy Association (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pet65@bk.ru