Научная статья
УДК 631.363
EDN ZCGHGV
https://doi.org/10.22450/978-5-9642-0633-0-34-43

Теоретическое обоснование приготовления пастообразного и гранулированного продуктов на основе соево-зерновых композиций в гомогенизаторе-грануляторе винтового типа

Сергей Викторович Вараксин[1], кандидат технических наук, доцент
Дмитрий Александрович Маркин[2], кандидат технических наук
Лариса Сергеевна Силохина[3], кандидат сельскохозяйственных наук, доцент
[1, 2, 3] Дальневосточный государственный аграрный университет
Амурская область, Благовещенск, Россия
[1] varaksin.1973@yandex.ru, [2] armahem21@mail.ru, [3] super.sil28@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается приготовление пастовых композиций на основе соевого коагулята и соево-зернового нерастворимого остатка и сушеного гранулята. Представлена схема приготовления данных кормовых продуктов. Сделан вывод, что загрузка бункера устройства компонентами должна выполняться в определенном соотношении; формирование монолита в компрессионной камере будет выполняться определенного диаметра и длины под установленным давлением.

Ключевые слова: пастовая композиция, кормовые продукты, соево-зерновой нерастворимый остаток, соевый коагулят, рабочий процесс пастообразной смеси

Для цитирования: Вараксин С. В., Маркин Д. А., Силохина Л. С. Теоретическое обоснование приготовления пастообразного и гранулированного продуктов на основе соево-зерновых композиций в гомогенизаторе-грануляторе винтового типа // Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития : материалы междунар. науч.-практ. конф. (Благовещенск, 18–19 апреля 2024 г.). Благовещенск : Дальневосточный ГАУ, 2024. С. 34–43.

Original article

Theoretical substantiation of the preparation of pasty and granular products based on soy-grain compositions in a screw-type homogenizer-granulator

Sergey V. Varaksin[1], Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Dmitry A. Markin[2], Candidate of Technical Sciences
Larisa S. Silokhina[3], Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor
[1, 2, 3] Far Eastern State Agrarian University, Amur region, Blagoveshchensk, Russia

[1] varaksin.1973@yandex.ru, [2] armahem21@mail.ru, [3] super.sil28@yandex.ru

Abstract. The article discusses the preparation of paste compositions based on soybean coagulate and soy-grain insoluble residue and dried granulate. The scheme of preparation of these feed products is presented. It is concluded that the loading of the device's hopper with components must be carried out in a certain ratio; the formation of a monolith in the compression chamber will be carried out of a certain diameter and length under a set pressure.

Keywords: paste composition, feed products, soy-grain insoluble residue, soybean coagulate, working process of the paste-like mixture

For citation: Varaksin S. V., Markin D. A., Silokhina L. S. Theoretical substantiation of the preparation of pasty and granular products based on soy-grain compositions in a screw-type homogenizer-granulator. Proceedings from Agro-industrial complex: problems and prospects of development: *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya (Blagoveshchensk, 18–19 aprelya 2024 g.)* (PP. 34–43), Blagoveshchensk, Dal'nevostochnyj gosudarstvennyj agrarnyj universitet, 2024 (in Russ.).

Приготовление пастовых композиций на основе соевого коагулята и соево-зернового нерастворимого остатка и сушеного гранулята из них, характеризуется количественными и качественными показателями готового продукта, а также совокупными затратами на его получение. О качестве готового продукта судят по такому показателю, как прочность гранул (Пр). Существенное влияние на прочность гранул и затраты на их получение будут оказывать как управляемые, так и неуправляемые факторы, которые можно подразделить на технологические, определяющие параметры исходного сырья, его влажность; и конструктивно-режимные, зависящие от задаваемых оборудованию характеристик.

На рисунке 1 представлена структурная схема приготовления гранулята на основе нерастворимого соево-зернового остатка (НСЗО).

Для оценки технологии приготовления кормовых продуктов, представленной на рисунке 1, нами принята следующая модель (1):

$$\left.\begin{array}{l} Зг = Иг \cdot Qг \cdot tг \rightarrow \min \\ R_{ПГ}(t) = f(\theta_у; P; Пр_н; Пр_к) \rightarrow \max \end{array}\right\} \quad (1)$$

где Зг – совокупные затраты по приготовлению гранулята;

Иг – удельные эксплуатационные затраты на процесс получения гранулята;

$Q_Г$ – производительность гранулятора;

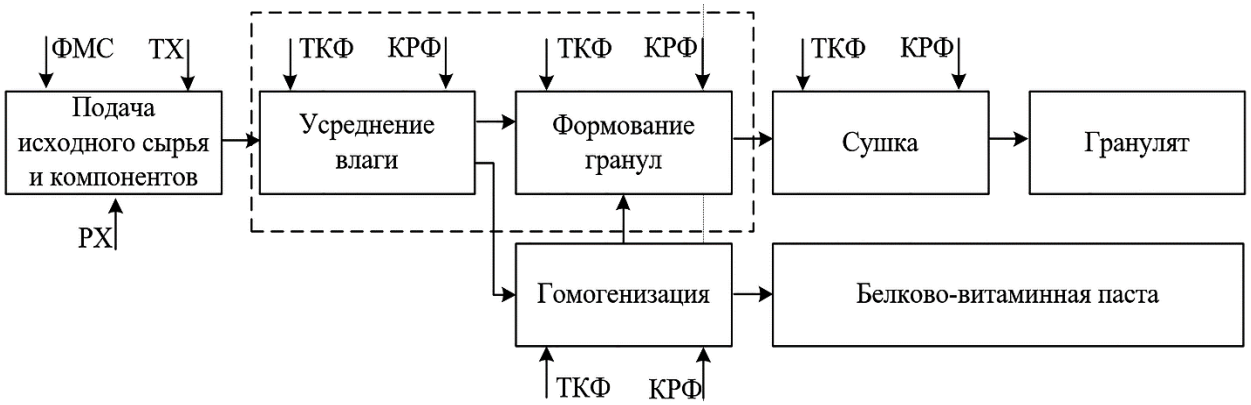
$t_Г$ – время работы гранулятора;

$\theta_у$ – равномерность перераспределения влаги в формуемых влажных гранулах;

Р – давление в гомогенизаторе-грануляторе;

$Пр_н$ – прочность влажных гранул (до сушки);

$Пр_к$ –прочность высушенных гранул.



ТКФ – технологические факторы; КРФ – конструктивно-режимные факторы;
ТХ, РХ – технологические и реологические характеристики (соответственно) исходного сырья и компонентов

Рисунок 1 – Схема приготовления кормовых продуктов на основе соево-зернового нерастворимого остатка и коагулята

Качество получаемых гранул возможно охарактеризовать функциональной зависимостью (2):

$$\text{Пр} = f\left[\theta_\text{у} = f\left(\tau_\text{у}\right); \theta_\text{у} = f(\rho_\text{о})\right] \rightarrow \max(100\%) \qquad (2)$$

где $\tau_\text{у}$ - продолжительность усреднения содержания влаги в перемешиваемых компонентах (диффузионного процесса).

Параметры процесса усреднения влаги в получаемом кормовом продукте возможно и целесообразно рассматривать с позиций конвективной диффузии, для которой справедлива следующая зависимость:

$$\text{М}_\text{в} = (Д_\text{н} + \varepsilon_\text{о}) \frac{F \cdot \Delta W \cdot \tau_\text{у}}{\Delta} \qquad (3)$$

где $\text{М}_\text{в}$ – количество перемещаемых частиц воды из частиц НСЗО в частицы смежного компонента с меньшей влажностью;

$Д_н$ – коэффициент диффузии;
$\varepsilon_о$ – поправочный коэффициент диффузии;
F – площадь контакта перераспределяемых частиц компонентов;
ΔW – разность концентраций воды в частицах компонентов;
$\tau_у$ – время контакта частиц компонентов (время усреднения влаги);
Δ – толщина контактируемых слоев компонентов.

Схема, поясняющая обоснование параметров процесса перераспределения влаги в винтовом гомогенизаторе-грануляторе для компонентов с различной влажностью, представлена на рисунке 2.

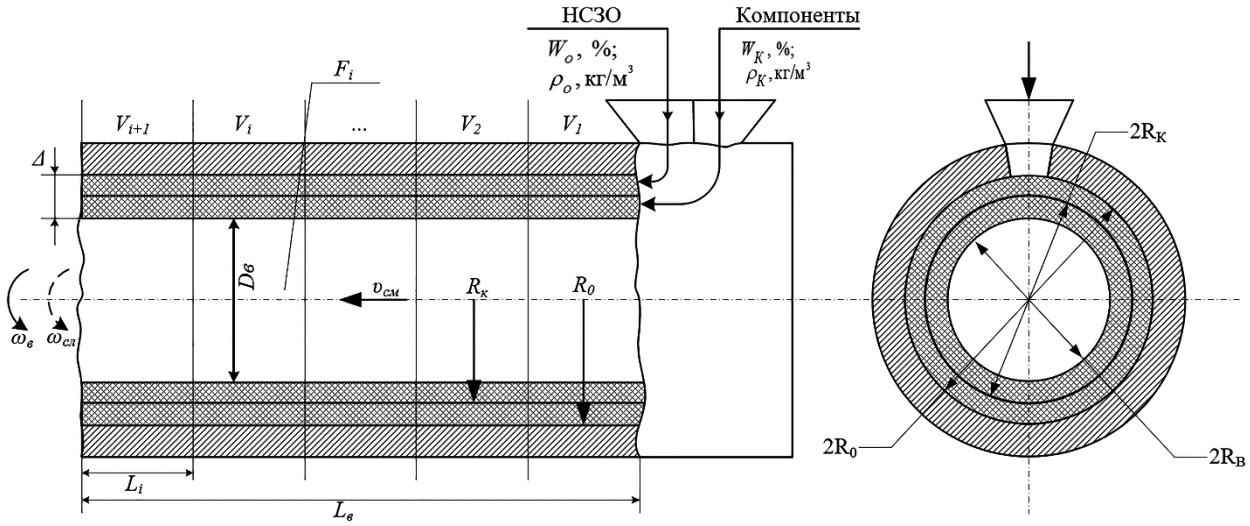


Рисунок 2 – Схема к обоснованию процесса усреднения влаги при получении композиций в гомогенизаторе-грануляторе

Для компонентов различной степени измельчения, структуры, размеров и свойств, будет справедливо выражение (4):

$$\lambda = \frac{Д}{d};\ \lambda = \frac{l_н}{l_к} \qquad (4)$$

где Д, *d, l*н, *l*к – начальные и конечные значения размеров частиц по их диаметру и длине, а $d = [d_r]$.

Для случая, когда объемы смежных компонентов рассматриваются по *i*-поперечным сечениям (где $i \to \infty$) (рис. 2), для *i*-го слоя можно записать:

1) для продолжительности усреднения влаги в *i*-м сечении:

$$r_i = \frac{2\pi}{\omega_{\text{сл}_i}} \tag{5}$$

где $\omega_{\text{сл}_i}$ – угловая скорость перемещения слоя продукта в *i*-м слое.

2) для площади *i*-го сечения:

$$F_i = \frac{\pi D\text{к} \cdot L\text{в}}{n_i}, \tag{6}$$

$$\Delta_i = D\text{о} - D\text{в} \tag{7}$$

где *D*к – внутренний диаметр продуктового кольца по его границе;

*L*в – длина винта;

n – количество сечений;

*D*о – внутренний диаметр корпуса гомогенизатора.

С учетом данных выражений равенство (3) примет вид:

$$\text{М}_{\text{в}_i} = (\text{Дн} + \varepsilon_{\text{о}}) \frac{2\pi^2 D\text{к} L\text{в}(Wo - W\text{к})\tau_{\text{у}}}{n(D\text{о} - D\text{в})\omega_{\text{сл}i}} \tag{8}$$

где $(Wo - W\text{к})$ – разность значений влажности в компонентах, составляющих композицию (НСЗО + соломенная мука).

При количестве элементарных слоев, равном $n = (L\text{в} \cdot \lambda)/d = (L\text{в} \cdot \lambda)/l_{\text{к}}$, с учетом равенства (4) для уравнения (8) окончательно имеем:

$$\text{М}_{\text{в}} = \sum_{i=1}^{n} (\text{Дн} + \varepsilon_{\text{о}}) \frac{2\pi^2 D\text{к} \cdot n \cdot d^2(Wo - W\text{к})\tau_i}{L\text{в} \cdot \lambda^2(D\text{о} - D\text{к})\omega_{\text{сл}i}} \tag{9}$$

В результате усреднения влажности исходных компонентов в разработанном устройстве, на выходе влажность пасты или гранул составит:

$$W_{\text{н}}^{\text{г}} = \frac{W_o \cdot \text{М}_o + W_k \cdot \text{М}_k}{\text{М}_o + \text{М}_k} \tag{10}$$

где W_o, W_k – влажность исходных компонентов;

$\text{М}_{\text{о}}$, М_k – массы исходных компонентов.

Количество воды в составе полученной композиции по *i*-м сечениям на выходе составит:

$$\text{М}_{\text{в}i} = \frac{M_{\text{в}} - W_o(M_{oi} + M_{ki})}{W_o - W_k} \quad (11)$$

где $M_{\text{в}}$ – массы воды в составе исходной композиции;

M_{oi} – масса НСЗО в i-м сечении;

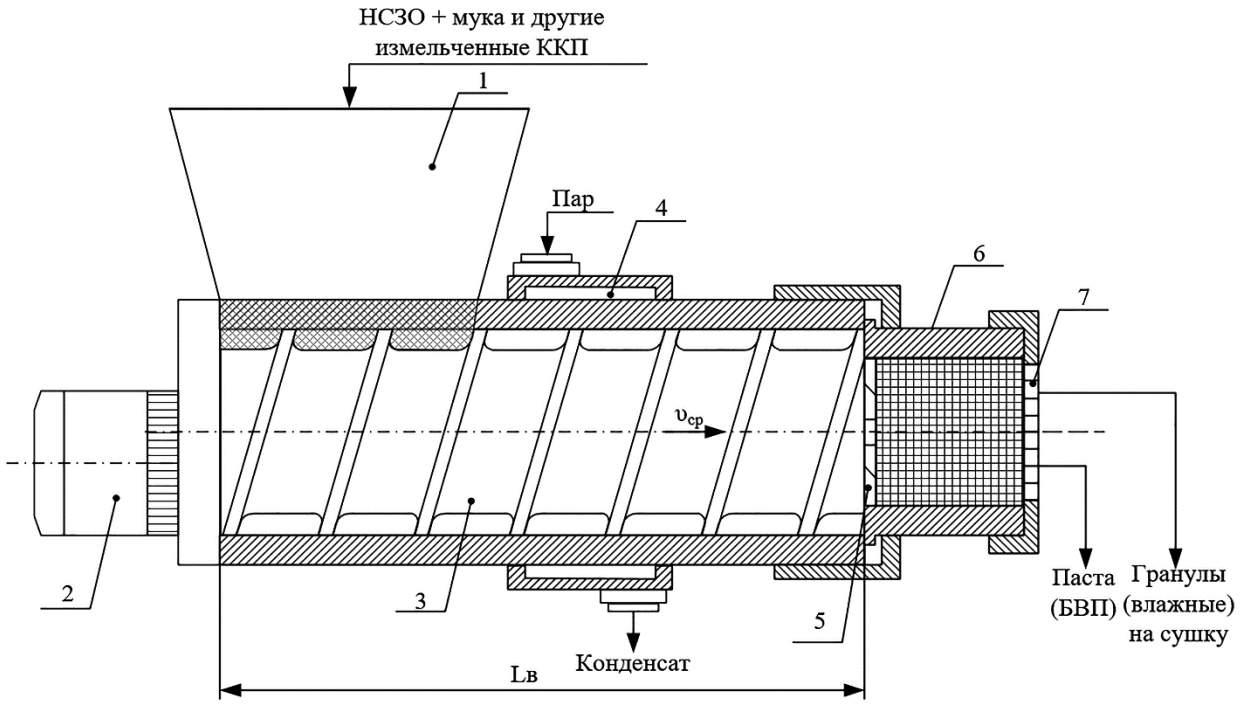
M_{ki} – масса соломенного компонента в i-м сечении.

Среднее значение массы воды в составе продукта равно:

$$\text{М}_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^{n} \text{М}_{\text{в}i}/2 \quad (12)$$

С учетом выражений (9) и (11), выражение для определения допускаемого значения дисперсии колебаний массы воды [Dy] по длине усреднителя-гомогенизатора-гранулятора, схема которого представлена на рисунке 3, запишется в следующем виде:

$$[D\text{у}] = \sum_{i=1}^{n} \left[\frac{2\pi^2(\text{Дн} + \varepsilon_{\text{о}}) \cdot \text{Дк} \cdot n \cdot d^2(\text{Мо} - \text{Мк}) \cdot \tau_i}{L\text{в} \cdot \lambda^2(D\text{о} - D\text{в})\omega_{\text{сл}i}} - \text{М}_{\text{ср}} \right] \quad (13)$$



1 – транспортер подающий; 2 – привод; 3 – винтовой рабочий орган; 4 – термокамера; 5 – гомогенизирующий элемент; 6 – компрессионная камера; 7 – решетка

Рисунок 3 – Конструктивно-технологическая схема гомогенизатора-гранулятора

Для оценки процесса усреднения влаги с помощью устройств данного типа введем коэффициент вариации $\theta_{\text{у}}$:

$$\theta_{\text{у}} = \frac{\left[\sqrt{D\text{у}}\right]}{\text{М}_{\text{ср}}} \tag{14}$$

С другой стороны, справедливо равенство:

$$\theta_{\text{у}} = 1 - e^{k\tau_{\text{у}}}$$

При этом k представляет коэффициент, характеризующий свойства исходных компонентов. Выражения (13) и (14) можно уравнять:

$$1 - e^{k\tau_{\text{у}}} = \left[D_y^{0,5}\right]/\text{М}_{\text{ср}}, \tag{15}$$

$$\text{или } e^{k\tau_{\text{у}}} = 1 - \left[D_y^{0,5}\right]/\text{М}_{\text{ср}} \tag{16}$$

Тогда продолжительность усреднения влаги в композициях составит:

$$\tau_{\text{у}} \geq \frac{1}{k} ln \left\{ 1 \Big/ \left\{ 1 - \left(\left[D_y^{0,5}\right]/\text{М}_{\text{ср}} \right) \right\} \right\}$$
$$\text{или } \tau_{\text{у}} \geq k^{-1} \, ln \left\{ \left\{ 1 - \left(\left[D_y^{0,5}\right]/\text{М}_{\text{ср}} \right) \right\}^{-1} \right\} \tag{17}$$

Продолжительность усреднения влаги в соево-зерновой композиции будет напрямую зависеть от конструктивно-режимных параметров усреднителя-гомогенизатора:

$$\tau_y = \frac{L\text{в}}{v_{\text{ср}}} \geq \left[\tau_y\right] \tag{18}$$

где $\upsilon_{\text{ср}}$ – средняя скорость перемещения обрабатываемого продукта в устройстве;

$[\tau_y]$ – допускаемое время усреднения.

По зоотехническим требованиям продолжительность диффузионного процесса усреднения влаги определим из выражения (19):

$$[\tau_{\text{у}}] = \ln[W_0/(W_0 - W_{\text{к}})] \Big/ \alpha \tag{19}$$

где W_0, $W_{\text{к}}$ – массовая доля влаги в начальный и конечный моменты времени;

α – эмпирический коэффициент для конкретных условий усреднения

влаги в композициях.

Среднюю скорость движения продукта в зоне усреднения можно определить из выражения (20), а производительность усредняющего устройства из выражения (21):

$$v_{\text{ср}} = {L\text{в} \cdot}/{\ln[W_0/(W_0 - W_\text{к})]}/{\alpha}, \quad (20)$$

$$[Q_{11} + Q_9] = [Q_{12} + Q_8] = F \cdot \rho \cdot v_{\text{ср}} = \frac{F \cdot \rho \cdot L\text{в} \cdot \alpha}{\ln[W_0/(W_0 - W_\text{к})]} \quad (21)$$

Для разработанной схемы приготовления белково-витаминного кормового продукта основной машиной является гомогенизатор-гранулятор, схема которого представлена на рисунке 3.

На процесс усреднения влаги будет оказывать влияние совокупность следующих факторов:

1) физико-механические свойства исходного сырья (ФМС);

2) технологические характеристики исходного сырья (ТХ);

3) реологические характеристики исходного сырья (РХ);

4) конструктивно-технологические параметры устройства для получения продукта (КТП).

Тогда для процесса смешивания и гомогенизации функциональную зависимость, связывающую все эти факторы, можно представить в виде:

$$\Theta_\text{у} = f(\text{ФМС; ТХ; КТП; РХ}) \rightarrow max \;\; (100\ \%) \quad (22)$$

На рисунке 4 представлена структурно-технологическая схема гомогенизатора-гранулятора.

Рассматриваемая система характеризуется двумя потоками: 1) входной поток ($У_{вх}$) со своими параметрами и свойствами; 2) выходной поток ($У_{вых}$) в виде пасты определенного качества однородного состава $\theta_\text{п}$.

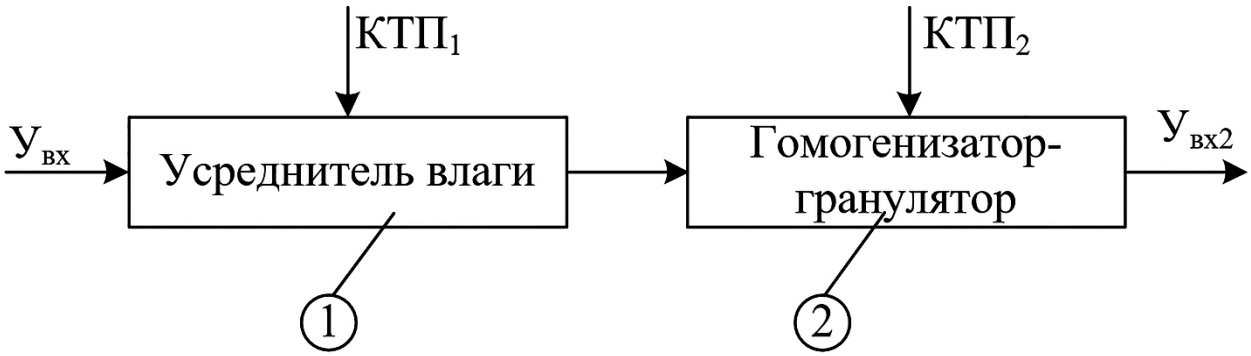


Рисунок 4 – Структурно-технологическая схема гомогенизатора-гранулятора

Для всех элементов рассматриваемой системы функциональные связи в более раскрытой форме можно представить:

1. Для усреднителя влаги:

$$\theta_{\text{у}}^{1} = f\left(\lambda; W_{k_1}; \rho_1; C; \omega_c; S; L\text{в}; D; d \ldots\right) \rightarrow max \qquad (23)$$

где $\theta_{\text{у}}^{1}$ – равномерность усреднения влаги в компонентах;

λ – степень измельчения исходного сырья и компонентов;

W_{k_1} – влажность компонентов;

ρ – плотность исходного сырья и компонентов;

C – соотношение компонентов смеси;

ω_c – угловая скорость винта;

S – шаг расположения витков винта;

Lв – длина винта;

D и d – соответственно диаметры винта и вала винта.

2. Для гомогенизатора-гранулятора:

$$\theta_{\text{у}}^{2} = f\left(\theta_1; \text{Р}; \rho_2; \text{в}_{\text{щ}}; \alpha_{\text{щ}}; W_{k_2}; r_{\text{п}}; R_{\text{щ}}; Z_{\text{щ}}; \ldots\right) \rightarrow max \qquad (24)$$

где P – давление в щелях гомогенизирующего элемента;

ρ_2 – плотность композиции;

$\text{в}_{\text{щ}}$ – ширина щели гомогенизирующего элемента;

$\alpha_{\text{щ}}$ – угол наклона плоскости стенки щели;

W_{k_2} – влажность предварительно полученной смеси;

$r_{\text{п}}$ – коэффициент живого сечения пластины;

$R_{\text{щ}}$ – длина щели;

$Z_{\text{щ}}$ – количество щелей в элементе.

3. Давление в камере будет определяться:

$$\text{Р} = f\left(\omega_{\text{с}}; Z_{\text{щ}}; Д_{\text{к}}; L_{\text{к}}; \rho_{\text{З}}; \dots\right) \rightarrow max \quad (25)$$

где $Д_{\text{к}}$ – диаметр компрессионной камеры;

$L_{\text{к}}$ – длина компрессионной камеры;

$\rho_{\text{З}}$ – плотность композиции в компрессионной камере.

Заключение. Анализируя рассматриваемые процессы, можно сделать следующие выводы:

1) загрузка бункера устройства компонентами должна выполняться в определенном соотношении;

2) формирование монолита в компрессионной камере будет выполняться определенного диаметра и длины, под определенным давлением Р.

Рабочий процесс предложенного нами устройства показывает, что длина цилиндрической камеры зависит от таких факторов как касательное напряжение сдвига (скольжения) вязко-пластичного тела; коэффициент трения продукта о стенки камеры; радиус камеры и соответственно давление, создаваемое в компрессионной камере.

© Вараксин С. В., Маркин Д. А., Силохина Л. С., 2024

Статья поступила в редакцию 29.03.2024; одобрена после рецензирования 08.05.2024; принята к публикации 07.06.2024.
The article was submitted 29.03.2024; approved after reviewing 08.05.2024; accepted for publication 07.06.2024.