

**ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ****PROCESSES AND MACHINERY OF AGRO-ENGINEERING SYSTEMS**

УДК 531.3

ГРНТИ 30.15.15

**Воякин С.Н., канд. техн. наук, доцент,**

E-mail: vsn177@yandex.ru;

**Доценко С.М., д-р техн. наук, профессор;****Школьников П.Н., канд. техн. наук,**

E-mail: pavel.shkolnikov@mail.ru,

Дальневосточный государственный аграрный университет,

г. Благовещенск, Амурская область, Россия

**КИНЕТИКА УПЛОТНЕНИЯ БИНАРНОЙ КОМПОЗИЦИИ В ПРИЛОЖЕНИИ  
К ОБОСНОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ КОМПРЕССИОННОЙ КАМЕРЫ  
ВИНТОВОГО ПРЕСС-ГРАНУЛЯТОРА**

*На основе составленного дифференциального уравнения движения воздуха в деформированной пористой среде обосновано значение требуемого давления. Изучена кинетика уплотнения соево-пастовых композиций с учетом скорости сдвига. На данной основе обоснована пропускная способность компрессионной камеры (объемная и массовая). С учетом полученных данных установлена зависимость плотности формируемых влажных гранул от параметров компрессионной камеры, характеризующая кинетикой процесса уплотнения; на основе полученных данных обоснованы параметры пресса и мощность, затрачиваемая на его привод.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ПРЕСС, ГРАНУЛИРОВАНИЕ, УПЛОТНЕНИЕ, КОМПРЕССИОННАЯ КАМЕРА, ДАВЛЕНИЕ, ПОРИСТАЯ СРЕДА, ПЛОТНОСТЬ РЕЛАКСАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ, КИНЕТИКА УСРЕДНЕНИЯ, ПАРАМЕТРЫ.

UDC 531.3

**Voyakin S.N., Cand. Tech. Sci., Associate Professor;**

E-mail: vsn177@yandex.ru;

**Dotsenko S.M., Dr Tech. Sci., Professor;****Shkolnikov P.N., Cand. Tech. Sci.,**

E-mail: pavel.shkolnikov@mail.ru,

Far Eastern State Agrarian University,

Blagoveshchensk, Amur region, Russia

**BINARY COMPOSITION COMPACTION KINEMATICS IN ADDITION  
TO THE RATIONALE OF A SCREW PRESS GRANULATOR COMPRESSION CAMERA  
PARAMETERS**

*Based on differential equation of air motion in a deformed porous medium, the value of the required pressure is justified. The kinetics of soya-paste compositions compaction was studied taking into account the shear rate. On this basis, the capacity of the compression chamber (volume and mass) is justified. Taking into account the obtained data, a dependence of formed wet granules density on the parameters of the compression chamber is calculated, which is characterized by the kinetics of the compaction process. Based on the obtained data, the press parameters and the power expended on its drive are justified.*

**KEYWORDS:** PRESS, GRANULATION, COMPACTION, COMPRESSIONCAMERA, PRESSURE, POROUS MEDIUM, DENSITY STRESS RELAXATION, HOMOGENIZATION KINETICS, PARAMETERS.

В настоящее время наибольшее распространение в приготовлении кормовых продуктов получило их гранулирование [1]. При этом в основе данного процесса лежит физическое сближение с последующим сцеплением частиц твердой фазы, путем механического давления до определенной степени уплотнения. Причем требуемая степень уплотнения характеризуется изменением объема разрыхленного материала до максимального удаления воздуха из воздушных пор и пустот с увеличением площади контактов между сближаемыми частицами.

В пресс-грануляторах винтового типа способствует такому сближению частиц так называемая компрессионная камера. В процессе уплотнения продуктового сырья в виде соево-пастовых композиций одновременно с уплотнением, осуществляется еще и перераспределение влаги в элементарных слоях формируемого монолита [2].

Целью исследований является обоснование подачи пресс-гранулятора винтового типа, содержащего компрессионную камеру, с позиций кинетики уплотнения упруго-пластичной среды.

Задачи исследования:

- на основании дифференциального уравнения движения воздуха в деформируемой пористой среде получить зависимость, характеризующую взаимосвязь между удельным давлением и степенью сжатия продукта, с учетом продолжительности воздействия на уплотняемый продукт и времени релаксации напряжений в нем;

- на основе установленных зависимостей обосновать параметры компрессионной камеры пресс-гранулятора.

Прессование продуктов в самом общем смысле есть процесс сближения частиц между их поверхностями с последующим уменьшением пор и удалением из них воздуха, поэтому, при сближении частиц продукта, в последующем деформируются и сами частицы с выходом из частиц молекул воздуха. При этом часть бинарной соево-пастовой композиции, из которой происходит удаление воздуха, испытывает в ходе уплотнения упруго – пластические деформации. Анализ возможного влияния различного характера деформаций на эффективность

уплотнения материала и выдавливания из него воздуха приводит к заключению о том, что предельное напряжение сдвига прессируемого материала, превышение которого способствует возникновению истинно пластичного течения, должно быть больше чем напряжение, создаваемое при давлении.

Для описания процесса выдавливания воздуха из бинарной соево-мясо- или рыбьей костной или другого вида композиции, составлено дифференциальное уравнение движения воздуха в деформируемой пористой среде, без учёта влияния силы тяжести

$$\nabla^2 \cdot P = \frac{m \cdot \mu}{R \alpha} \left[ 1 + \frac{\alpha}{m + \alpha_1} \right] \frac{\partial P}{\partial t} \quad (1)$$

и соответствующее ему уравнение неразрывности потока

$$\frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot W)}{\partial z} + \frac{m \cdot \rho_0}{\alpha} \left[ 1 + \frac{\alpha}{m + \alpha_1} \right] \frac{\partial P}{\partial t},$$

где  $\nabla$  - оператор Лапласа, выражаемый в декартовых прямоугольных координатах как

$$\nabla^2 = \nabla \cdot \nabla = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \quad (2)$$

$$\nabla^2 P = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2},$$

где  $P$  – давление;  $m$  – пористость продукта;  $\mu$  – вязкость воздуха;  $\alpha$  – модуль объёмной упругости воздуха;  $\alpha_1$  – модуль объёмной упругости бинарной композиции;  $t$  – продолжительность давления на продукт;  $\rho$  и  $\rho_0$  – плотности удаляемого воздуха соответственно при значениях  $P$  и  $P_0$ ;  $u$ ,  $v$ ,  $w$  – скорости движения воздуха соответственно вдоль осей координат  $x$ ,  $y$  и  $z$ .

Давление  $P$  есть равнодействующая давлений вдоль принятых осей координат –  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ .

Изучение диаграмм сжатия различных продуктов показало, что зависимость между удельным давлением -  $P$ , которое испытывает уплотняемый материал и степенью его сжатия –  $\zeta$ , при определённых температуре -  $T$  и влажности -  $W_n$ , описывается уравнением степенного вида

$$P = A \cdot \zeta^\gamma, \quad (3)$$

где  $A$  и  $\gamma$  – эмпирические коэффициенты.

Из этих же диаграмм установлено, что между удельным давлением и объёмом пор –  $V$  существует зависимость показательного вида

$$P = X \cdot e^{-RV} = \frac{X}{e^{RV}}, \quad (4)$$

где  $X$ ,  $R$  – эмпирические коэффициенты.

Таким образом, факторы, входящие в оба приведённых уравнения, связаны следующей зависимостью

$$P = \left( \frac{X \cdot A \cdot \zeta^{\nu}}{e^{RV}} \right)^{0,5} \geq P_{max}, \quad (5)$$

где  $P_{max}$  - давление формования гранул.

Анализ данной формулы позволяет сделать вывод о том, что поскольку между давлением и пористостью бинарной композиции существует убывающая функциональная зависимость, то при повышенной пористости бинарной композиции, для её сжатия до определённой степени, потребуется меньшее удельное давление.

Однако значения пористости и влажности бинарной композиции обуславливают её способность к формованию влажных гранул определённого качества по прочности.

В этой связи, такой параметр процесса как влажность, должен быть регламентированным, а потому его значение необходимо установить в процессе проводимых исследований.

Обоснование параметров пресс-гранулятора провели с учётом сдвиговых свойств бинарной композиции.

Величина скорости сдвига  $v_c$ , характеризующая движение бинарной композиции, как в компрессионную камеру, так и в отверстия формующей решетки при формовании гранул равна

$$\dot{\gamma} = 32 \cdot Q_{ПГ}^V \cdot (\pi D_{КК}^3 \cdot k_0)^{-1}, \quad (6)$$

где  $Q_{ПГ}^V$  – объёмная производительность пресс-гранулятора;  $D_{КК}$  – диаметр компрессионной камеры;  $k_0$  – количество формующих отверстий.

Объёмную производительность пресс-гранулятора –  $Q_{ПГ}^V$  определили из условия неразрывности потока, по каждому из структурных элементов пресс-гранулятора

$$Q_{ПГ}^V \leq Q_{КК}^V \leq Q_{ГР}^V, \quad (7)$$

где  $Q_{ПГ}^V$  – объёмная производительность винтового пресс-гранулятора;  $Q_{КК}^V$  – пропускная способность компрессионной камеры;  $Q_{ГР}^V$  – пропускная способность гранулирующего узла.

Значение  $Q_{ПГ}^V$  определили как

$$Q_{ПГ}^V = 0,25[(\pi \cdot D_B \cdot \sin\varphi - b') \cdot h_B(D_B - h_B)\omega_B \cdot \sin 2\varphi \cdot (1 - tg\varphi \cdot ctg\alpha) \cdot m] \cdot V_B^{-1}, \quad (8)$$

где  $D_B$  – наружный диаметр винта пресса;  $h_B$  – глубина нарезки винта;  $b'$  – ширина витка

винта;  $\omega_B$  – угловая скорость вращения винта;  $V_B$  – объём межвиткового пространства;  $m$  – масса продукта, находящегося в межвитковом пространстве;  $\alpha$  – угол между направлением движения продукта и боковой стенкой канала винта;  $\varphi$  – угол подъёма винтовой линии.

Тогда подача ПГ равна:

– по объёму:

$$Q_{ПГ}^V = 0,25[(\pi \cdot D_B \cdot \sin\varphi - b') \cdot h_B(D_B - h_B)\omega_B \cdot \sin 2\varphi \cdot (1 - tg\varphi \cdot ctg\alpha)] \quad (9)$$

– по массе:

$$Q_{ПГ}^m = 0,25[(\pi \cdot D_B \cdot \sin\varphi - b') \cdot h_B(D_B - h_B)\omega_B \cdot \sin 2\varphi \cdot (1 - tg\varphi \cdot ctg\alpha)] \omega_B \cdot \rho_B, \quad (10)$$

где  $\rho_B$  – плотность продукта в пресс-грануляторе.

Пропускную способность компрессионной камеры выразили через скорость сдвига  $\dot{\gamma}$

– по объёму:

$$Q_{КК}^V = 0,098 D_{КК}^3 \cdot \dot{\gamma}; \quad (11)$$

– по массе:

$$Q_{КК}^m = 0,098 D_{КК}^3 \cdot \dot{\gamma} \cdot \rho_{КК}, \quad (12)$$

где  $D_{КК}$  – диаметр компрессионной камеры;  $\rho_{КК}$  – плотность продукта.

В тоже время, объёмную пропускную способность компрессионной камеры определили с учётом её длины

$$Q_{КК}^V = 0,785 \cdot \pi D_{КК}^2 \cdot L_{КК} \cdot t, \quad (13)$$

где  $L_{КК}$  – длина компрессионной камеры;  $t$  – время движения продукта вдоль камеры за один оборот винта, равное  $2\pi/\omega$ .

С учётом этого, для массовой пропускной способности ПГ имеем, что

$$Q_{КК}^m = 0,125 D_{КК}^2 \cdot L_{КК} \cdot \rho \cdot \omega_B, \quad (14)$$

где  $\rho$  – плотность массы.

Объёмную пропускную способность гранулирующего узла определили как

$$Q_{ГР}^V = 0,125 d_0^2 \cdot z_0 \cdot h_p \cdot \omega_{ГР}, \quad (15)$$

где  $d_0$  – диаметр отверстия формующей решётки-матрицы;  $z_0$  – число отверстий формующей решётки;  $h_p$  – величина перемещения продукта в отверстии за один оборот винта гранулирующего узла;  $\omega_{ГР}$  – угловая скорость вращения винта гранулирующего узла.

Соответственно, массовая пропускная способность гранулирующего узла равна

$$Q_{КК}^m = 0,125 d_0^2 \cdot z_0 \cdot h_p \cdot \rho_{ГР} \cdot \omega_{ГР}, \quad (16)$$

где  $\rho_{ГР}$  – плотность гранул (влажных).

Диаметр компрессионной камеры определили, приравнявая правые части

уравнений (8) и (11) и решая их относительно искомого параметра  $D_k$

$$D_k = [2,55(\pi \cdot D_b \cdot \sin\varphi - b') \cdot (D_b - h_b) \cdot h_b \cdot \sin 2\varphi (1 - tg\varphi \cdot ctg\alpha) \cdot \omega_b \cdot \dot{\gamma}^{-1}]^{-0,33} \quad (17)$$

Плотность бинарной композиции в компрессионной камере определили, приравняв правые части уравнений (11) и (14) и решая их относительно искомого технологического параметра –  $\rho_{kk}$

$$\rho_{kk} = 2,55(\pi \cdot D_b \cdot \sin\varphi - b') \cdot h_b (D_b - h_b) \omega_b \cdot \sin 2\varphi (1 - tg\varphi \cdot ctg\alpha) \cdot \rho_b \cdot \dot{\gamma}^{-1} \cdot D_k^{-3} \quad (18)$$

Анализ данного выражения показывает, что плотность бинарной композиции в компрессионной камере зависит от сдвиговых свойств композиции, а также режимных и конструктивных параметров винтового пресс-гранулятора. Длина канала  $h_p$  формующей решётки-матрицы конструктивно равна её толщине  $H_p$ .

В свою очередь данный параметр  $h_p$ , связан с таким процессом, как релаксация напряжений во влажных гранулах. Согласно этому процессу, материал гранулы должен находиться в отверстии формующей решётки по времени –  $t_{\text{бк}}$  не меньшем времени релаксации напряжений –  $t_{\text{рел}}$ , определяемом материалом гранулы, т.е. бинарной композиции  $t_{\text{бк}} \geq t_{\text{рел}}$ .

Для получения гранул заданной плотности необходимо, чтобы соблюдалось условие

$$f_{\text{ст}} \cdot \xi \cdot P_{\text{уп}} \cdot \Phi \cdot h_p \geq P_{\text{max}} \cdot F_k, \quad (19)$$

где  $f_{\text{ст}}$  – статический коэффициент трения;  $\xi$  – коэффициент бокового расширения;  $P_{\text{уп}}$  – нормальное давление выдавливания гранулы;  $\Phi$  – периметр поперечного сечения канала;  $P_{\text{max}}$  – максимальное давление выдавливания гранулы;  $F_k$  – площадь поперечного сечения отверстия (гранулы).

Из данного неравенства следует, что

$$h_p \geq P_{\text{max}} \cdot F_k \cdot [f_{\text{ст}} \cdot \xi \cdot P_{\text{уп}} \cdot \Phi]^{-1} = H_p, \quad (20)$$

В окончательной форме, данное выражение имеет следующий вид

$$H_p = P_{\text{max}} \cdot \left[ \frac{d_0^2}{4} \right] \cdot [f_{\text{ст}} \cdot \xi \cdot P_{\text{уп}} \cdot \frac{d_0}{2}]^{-1} = 0,5 P_{\text{max}} \cdot d_0 \cdot [f_{\text{ст}} \cdot \xi \cdot P_{\text{уп}}]^{-1} \quad (21)$$

Пропускная способность пресс-гранулятора с учетом длины канала формующей решетки  $H_p$  определяется по известному выражению

$$Q_{\text{ПГ}} = F_{\text{ПГ}} \cdot z_k \cdot H_p \cdot \rho_{zp} \cdot \beta / t_{\text{обр}}, \quad (22)$$

где  $F_{\text{ПГ}}$  – площадь поперечного сечения продукта в камере;  $z_k$  – число формующих каналов решетки-матрицы;  $\rho_{zp}$  – плотность гранул;  $\beta$  – коэффициент, учитывающий «живое сечение» решетки-матрицы;  $t_{\text{обр}}$  – продолжительность обработки продукта (полученных гранул) равная  $2\pi/\omega_g$ .

Из условия неразрывности материального потока следует, что

$$\rho_{zp} = 2,77 \cdot (V_k - V_g) \cdot \frac{\rho_g \cdot K \cdot T \cdot W_n \cdot t_{\text{обр}}}{\eta \cdot F_{\text{ПГ}} \cdot z_k \cdot H_p \cdot \beta}, \quad (23)$$

где  $K$  – газовая постоянная;  $T$  – температура продукта;  $W_n$  – начальная влажность продукта.

Анализ данной зависимости показывает, что плотность получаемых гранул обратно пропорциональна длине канала формующей решетки-матрицы –  $H_p$ , а также вязкости –  $\eta$  прессуемого продукта, которая функционально связана с такими параметрами как – влажность –  $W_n$ , и температура  $T$ .

Затраты мощности на процессы, осуществляемые в предложенном пресс-грануляторе –  $N_{\text{э}}$  определили как сумму затрат по его структурным элементам.

$$N_{\text{э}} = (0,1 - 0,2) N_{\text{ПГ}} + k_{\text{ПГ}} \cdot Q_{\text{ПГ}} \cdot \left( L_b + L_k + \sum_{i=1}^{z_0} \frac{2 \cdot \pi \cdot v_0}{\beta \cdot \omega_b} \right). \quad (25)$$

Экспериментальным путем получена математическая модель получения прессованных гранул на основе соево-пастовых композиций

$$\rho_{\text{ГР}} = -3342,1 + 343,63 \cdot \omega_b + 249,06 \cdot \omega_r + 58,6 \cdot \ell_k - 3,6 \cdot \omega_b \cdot \omega_r - 1,5 \cdot \omega_b \cdot \ell_k - 0,75 \cdot \omega_r \cdot \ell_k - 18,71 \cdot \omega_b^2 - 6,54 \cdot \omega_r^2 - 1,11 \cdot \ell_k^2 \rightarrow \text{opt}; \quad (26)$$

где  $\omega_b$  – угловая скорость винта пресса, равная  $6,9 - 9,6 \text{ с}^{-1}$ ;  $\omega_r$  – угловая скорость винта гранулятора, равная  $16,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $\ell_k$  – длина канала формующей решетки-матрицы, равная  $12,4 - 13,2 \text{ мм}$  при которых показатель плотности влажных гранул составил  $\rho_{\text{ГР}} = 1070 \text{ кг/м}^3$ .

Аналитическим и экспериментальным путем получены математические модели, характеризующие процесс уплотнения соево-пастовых гранул с учетом кинетических особенностей системы «пресс – соево-пастовая композиция».

На основе полученных данных обоснованы оптимальные параметры предложенного авторами пресс-гранулятора винтового типа [3].

#### Список литературы

1. Мельников, С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм / С.В. Мельников. – Л.: Колос, 1978. – 560 с.
2. Воякин, С.Н. Научные основы повышения эффективности приготовления кормовой добавки с использованием соевого компонента для сельскохозяйственной птицы: монография / С.Н. Воякин, С.М. Доценко, Л.А. Ковалева, С.В. Бушуев. – Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2013. – 205 с.
3. Способ приготовления белково-минерального кормового продукта: пат. 2486759 РФ, МПК 51. / С. М. Доценко, С. Н. Воякин; Дальневосточный государственный аграрный университет. - №2011150185/13 ; Заявл. 09.12.2011; Оpubл. 10.07.2013, Бюл. № 19.

#### Reference

1. Mel'nikov, S.V. Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya zhivotnovodcheskikh ferm (Mechanization and Automation of Livestock Farms), L., Kolos, 1978, 560 p.
2. Voyakin, S.N. Nauchnye osnovy povysheniya effektivnosti prigotovleniya kormovoi dobavki s ispol'zovaniem soevogo komponenta dlya sel'skokhozyaistvennoi ptitsy: monografiya (Scientific Bases of Increase of Efficiency of Preparation of Feed Additives Using Soy Component for Poultry: monograph), S.N. Voyakin [i dr.], Blagoveshchensk, Dal'GAU, 2013, 205 p.
3. Patent RF № 2486759 Sposob prigotovleniya belkovo-mineral'nogo kormovogo produkta (RF patent № 2486759 Method of Preparation of Protein-Mineral Feed Product), Avtory Dotsenko S.M., Voyakin S.N. Opubl. v BI No 19 ot 10.07.2013.

УДК 631.363:636  
ГРНТИ 65.85.39

**Курков Ю.Б., д-р. техн. наук, профессор,**

E-mail: kurkov1@mail.ru;

**Краснощекова Т.А., д-р. с.-х. наук, профессор;**

**Якименко А.В., канд. техн. наук, доцент,**

E-mail: avsata@mail.ru;

**Иванов С.А., д-р техн. наук;**

**Власенко Н.К., аспирант**

Дальневосточный государственный аграрный университет,

г. Благовещенск, Амурская область, Россия

#### **МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА И РАЗДАЧИ КОРМОВ**

*Представлены аналитические выражения для определения потерь питательных веществ кормового рациона сельскохозяйственных животных в процессе выполнения технологических операций заготовки, хранения, производства кормовых добавок, приготовления и раздачи кормов. Определены потери продукции, вследствие потерь питательных веществ кормового рациона при его движении к животному. Приведена блок-схема и методика оценки эффективности технологий производства и раздачи кормов с учетом показателей качества выполнения технологических операций.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ТЕХНОЛОГИЯ, КОРМ, ХРАНЕНИЕ, ПРИГОТОВЛЕНИЕ, РАЗДАЧА, ПИТАТЕЛЬНЫЕ ВЕЩЕСТВА, ПОТЕРИ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ