DOI

УДК 631.89

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛА В ПРЕСС-ЭКСТРУДЕРЕ

ПРОТАСОВ Андрей Анатольевич, *Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова*

МАКАРОВ Сергей Анатольевич, *Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова*

ДАНИЛИН Андрей Владимирович, *Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова*

ЛЕВЧЕНКО Галина Викторовна, *Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова*

В статье представлена конструктивно-технологическая схема и проведен анализ теоретических исследований работы пресс-экструдера для гранулирования органических отходов животноводческих комплексов. Рассмотрены основные кинематические параметры пресс-экструдера, приведены аналитические выражения.

Введение. Отходы жизнедеятельности сельскохозяйственных животных (навоз, помет) – это основное органическое удобрение во всех зонах страны. Органические удобрения содержат все питательные вещества, необходимые растениям, и поэтому его называют полным удобрением.

Несмотря на важность и неоспоримость использования органических удобрений, недостаточно просто внести органические материалы в почву в исходном виде без соответствующей подготовки. Применение же распространенных методов удаления, подготовки и использования органических удобрений без определенной системы при отсутствии достаточно жесткого контроля над выполнением соответствующих природоохранных требований, приводит к негативному влиянию на основные компоненты природной среды [2, 5, 6, 10].

Поэтому дальнейшие исследования в этом направлении должны быть направлены на создание устройства для промышленного производства полнокомплектных органоминеральных удобрений на основе органических отходов сельскохозяйственного производства, включающие основные компоненты питания растений в соотношении, соответствующем биологическим особенностям растений и уровню плодородия почвы.

На базе кафедры «Техническое обеспечение АПК» ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ разработана конструктивно-технологическая схема пресс-экструдера для гранулирования органических отходов животноводческих комплексов (рис. 1) [9].

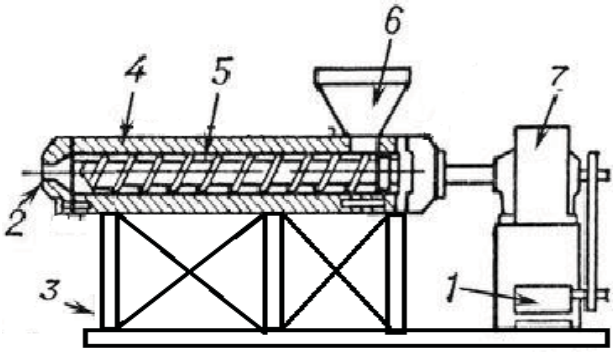

Рис. 1. Схема пресс-экструдера: 1 – привод; 2 – насадка; 3 – рама; 4 – канал шнека; 5 – шнек; 6 – загрузочное устройство; 7 – редуктор

Методика исследований. Теоретические исследования кинематических параметров движения материала в пресс-экструдере проводили с использованием методов механики сыпучей среды и теоретической механики, механики грунтов, дифференциального исчисления и математического моделирования.

Экструдируемый материал совершает сложное движение в канале шнека, поэтому для его теоретического изучения разделим абсолютное и относительное скольжение материальной точки по винтовой поверхности шнека [4, 7]. Тогда план скоростей материальной частицы, опирающейся на винтовую поверхность шнека и прижатой к стенке кожуха другими частицами, в общем случае будет иметь вид (рис. 2).

Вектор абсолютной скорости $\bar{\upsilon}$ будет равен сумме векторов переносной $\bar{\upsilon}_n$ и относительной $\bar{\upsilon}_r$ скоростей частицы, т.е. $\bar{\upsilon}_n = \bar{\upsilon}_n + \bar{\upsilon}_r$.

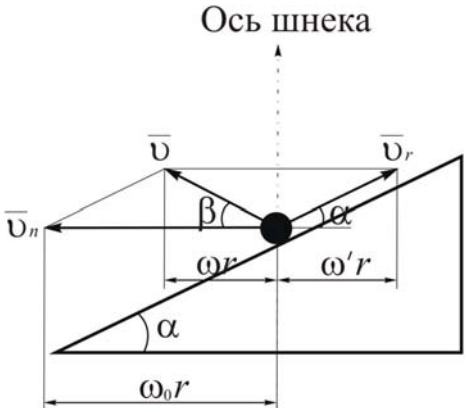

Рис. 2. План скоростей материальной частицы, движущейся по поверхности шнека

Окружная скорость абсолютного движения частицы υ может быть определена по следующей формуле [2]:

$$\upsilon = \frac{\omega_0 r \sin\alpha}{\sin(\alpha+\beta)},$$

где ω_0 – угловая скорость вращения шнека, $с^{-1}$; r – наружный радиус, м; α – угол подъема винтовой линии шнека, град;

$$\alpha = \mathrm{arctg}\frac{s}{2\pi r},$$

где S – шаг винта, м; β – угол между векторами переносной $\bar{\upsilon}_n$ и абсолютной $\bar{\upsilon}_n$ скоростей, град.

Значение угла β зависит от соотношения переносной и относительной скоростей движения частицы и может изменяться в процессе работы экструдера, а следовательно, является сложным для нахождения.

В зависимости от физико-механических свойств прессуемого материала его движение рассматривалось как течение вязкой жидкости (ньютоновской или неньютоновской), или как перемещение сыпучей среды (сплошной или зернистой) [1, 2, 4, 7, 8, 11]. Во втором случае удобнее рассматривать сплошную модель сыпучей среды, так как при этом дифференциальные уравнения равновесия тела аналогичны уравнениям в теории упругости и пластичности. Такой подход при рассмотрении напряженного состояния прессуемой массы позволяет все действительные силы, действующие на отдельные частицы в точках соприкосновения с другими частицами, заменять мнимыми усилиями, непрерывно распределенными по произвольному сечению материала [5]. Это, в свою очередь, позволяет переходить от рассмотрения материальной частицы к системе частиц, совокупность которых составляет сыпучую среду.

Для теоретического исследования движения материала в шнеке прибегнем к научной абстракции, т.е. рассмотрим не реальное материальное тело, а его упрощенную модель, и представим схему сил, приложенных к частице материала, опирающейся на поверхность наклонного шнека и прижатой к его стенке (рис. 3).

На основании схемы сил дифференциальные уравнения движения материальной частицы для общего случая наклонного расположения оси шнека:

$$\begin{cases} N_1\cos\alpha - f_1 N_1 \sin\alpha - ma\left(\dfrac{d^2\varphi}{dt^2}\right) - G\cos\gamma - \\ \quad - f_2 N_2 \sin\beta = 0; \\ G\cos\gamma\sin\varepsilon + f_2 N_2\cos\beta - f_1 N_1\cos\alpha - \\ \quad - N_1\sin\alpha - mr\left(\dfrac{d^2\varphi}{dt^2}\right) = 0, \\ G\sin\gamma\cos\varepsilon + mr\omega_0^2 + mr\left(\dfrac{d\varphi}{dt}\right)^2 - N_2 - \\ \quad - 2mr\omega_0\left(\dfrac{d\varphi}{dt}\right) = 0, \end{cases} \qquad (2)$$

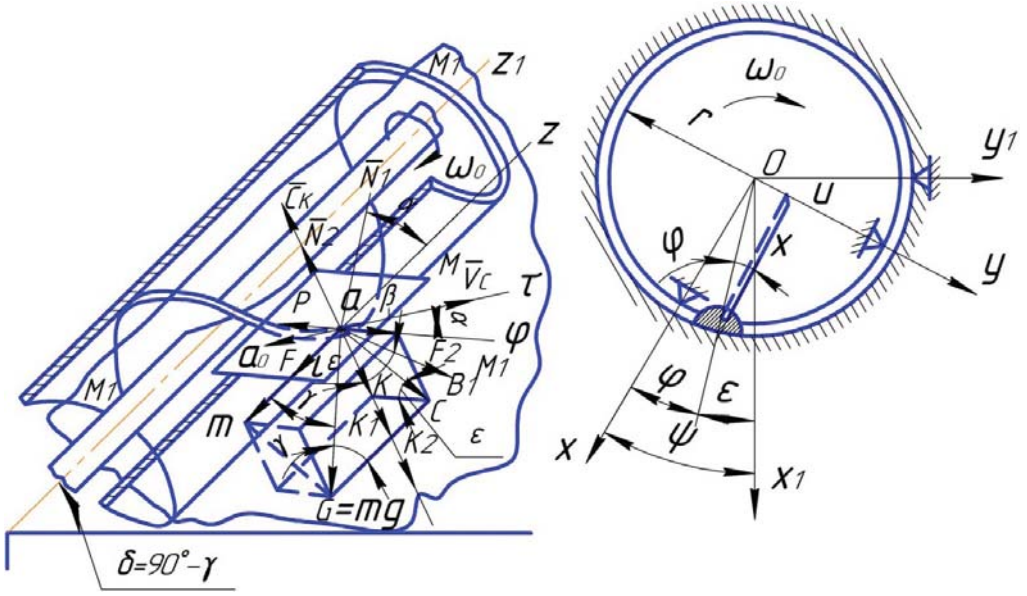

Рис. 3. Схема сил, приложенных к материальной точке, движущейся по наклонному шнеку

где N_1 – нормальная реакция наклонной плоскости, Н; f_1 – коэффициент трения материала о лопасть винта; m – масса элемента материала, кг; G – вес элемента материала, Н; γ – угол наклона оси вала шнека к вертикали, рад; N_2 – нормальная реакция кожуха, Н; f_2 – коэффициент трения материала о стенку кожуха; φ – угол, на который отклоняется частица при вращении с постоянной угловой скоростью ω_0; $\frac{d\varphi}{dt}=\omega'$ угловая скорость относительного движения материальной точки, c^{-1}; ε – угол, определяющий положение точки относительно вертикальной плоскости; $\varepsilon = \omega_0 t + (-\varphi)$; $mr\left(\frac{d^2\varphi}{dt^2}\right)$ – касательная сила инерции, Н; $mr\omega_0^2$ – центробежная сила инерции в переносном движении, Н; $mr\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2$ – центробежная сила инерции в относительном движении, Н; $2mr\omega_0\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)$ – сила Кориолиса, Н; $ma\left(\frac{d^2\varphi}{dt^2}\right)$ – аксиальная сила инерции, Н.

Представленная система дифференциальных уравнений (2) не имеет решения при любом значении γ. Стоит учесть, что при работе шнека период неустановившегося движения является кратковременным и длится от нескольких долей секунд до нескольких секунд, после чего движение становится устойчивым, характеризующимся постоянными значениями средней осевой скорости и абсолютной угловой скорости вращательного движения ω.

Таким образом, для установившегося режима работы экструдера при $\frac{d\varphi}{dt}=\omega'=\text{const}$ и $\frac{d^2\varphi}{dt^2}=0$, когда ось вращения шнека расположена горизонтально (т.е. $\gamma = 90°$), система уравнений (1) примет вид:

$$\begin{cases} N_1\cos\alpha - f_1 N_1 \sin\alpha - f_2 N_2 \sin\beta = 0; \\ f_2 N_2 \cos\beta - f_1 N_1 \cos\alpha - N_1 \sin\alpha = 0; \\ G\cos\varepsilon + mr\omega_0^2 - N_2 - 2mr\omega_0\left(\frac{d\varphi}{dt}\right) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Нормальную реакцию наклонной плоскости N_1 выразим из второго уравнения системы (3)

$$N_1 = \frac{f_2 N_2 \cos\beta}{f_1\cos\alpha + \sin\alpha}. \quad (4)$$

Полученное выражение подставим в первое уравнение системы (3):

$$\frac{f_2 N_2 \cos\beta}{f_1\cos\alpha + \sin\alpha}(\cos\alpha - f_1\sin\alpha) = f_2 N_2 \sin\beta;$$

$$\frac{\sin\beta}{\cos\beta} = \text{tg}\beta = \frac{\cos\alpha - f_1\sin\alpha}{f_1\cos\alpha + \sin\alpha}. \quad (5)$$

Из плана скоростей (рис. 2)

$$\text{tg}\beta = \frac{\omega' r\,\text{tg}\alpha}{\omega r} = \frac{\omega' r\,\text{tg}\alpha}{\omega_0 r - \omega' r} = \text{tg}\alpha = \frac{\omega'}{\omega_0 - \omega}.$$

После упрощений и преобразований получим:

$$\text{tg}\beta = \frac{\omega' r\,\text{tg}\alpha}{\omega r} = \frac{\omega' r\,\text{tg}\alpha}{\omega_0 r - \omega' r} = \text{tg}\alpha = \frac{\omega'}{\omega_0 - \omega}. \quad (6)$$

Абсолютную угловую скорость найдем по выражению:

$$\omega = \omega_0 - \omega' = \omega_0\left(1 - \frac{\text{ctg}\alpha - f_1}{\text{ctg}\alpha + \text{tg}\alpha}\right);$$

$$\omega = \omega_0 \frac{\text{tg}\alpha + f_1}{\text{ctg}\alpha + \text{tg}\alpha}. \quad (7)$$

Абсолютная ω и относительная ω' угловые скорости движения материальной точки зависят от кинематического параметра работы шнека (угловой скорости ω_0), его геометрической характеристики (угла подъема винтовой линии α) и физико-механических свойств перемещаемого материала и шнека (коэффициента трения материала о лопасть винта f_1), но для установившегося режима работы шнека значения угловых скоростей движения материала неизменны. Однако в одношнековых экструдерах с целью повышения давления в зоне прессования шаг винта и диаметр винта могут изменяться [8], следовательно, в этом случае найденные скорости будут неизменными при движении материала в определенной зоне шнека, а затем их расчетные величины должны быть скорректированы.

Учитывая, что $\omega_0 = \pi n/30$, где n – частота вращения шнека, мин$^{-1}$, выражения (6) и (7) будут иметь следующий вид:

$$\omega' = \frac{\pi n}{30}\cdot\frac{\text{ctg}\alpha - f_1}{\text{ctg}\alpha + \text{tg}\alpha}; \quad (8)$$

$$\omega = \frac{\pi n}{30}\cdot\frac{\text{tg}\alpha + f_1}{\text{ctg}\alpha + \text{tg}\alpha}. \quad (9)$$

Выразим нормальную реакцию кожуха N_2 из третьего уравнения системы (3) с учетом выражения (9)

$$N_2 = m\left(g\cos\varepsilon + r\omega_0^2 - 2r\omega_0^2\frac{\text{ctg}\alpha - f_1}{\text{ctg}\alpha + \text{tg}\alpha}\right). \quad (10)$$

Тогда выражение (4) примет следующий вид:

$$N_1 = m\left(g\cos\varepsilon + r\omega_0^2 - \right.$$

$$\left. -2r\omega_0^2 \frac{\mathrm{ctg}\alpha - f_1}{\mathrm{ctg}\alpha + \mathrm{tg}\alpha}\right)\frac{f_2\cos\beta}{f_1\cos\alpha + \sin\alpha}. \qquad (11)$$

Анализ полученных выражений (10) и (11) показывает, что нормальные реакции кожуха и винтовой поверхности шнека зависят от массы прессуемого материала m, кинематических параметров работы экструдера (угловой скорости ω_0 и угла β), геометрических параметров шнека (диаметра шнека, угла подъема винтовой линии α) и физико-механических свойств перемещаемого материала, винта экструдера и зеера (коэффициенты трения f_1 и f_2). Причем от угловой скорости вращения шнека указанные реакции находятся в квадратичной зависимости.

Силы трения материала о поверхность кожуха и шнека с учетом выражений (10) и (11) могут быть определены по выражениям:

$$F_1 = m\left(g\cos\varepsilon + r\omega_0^2 - \right.$$

$$\left. -2r\omega_0^2 \frac{\mathrm{ctg}\alpha - f_1}{\mathrm{ctg}\alpha + \mathrm{tg}\alpha}\right)\frac{f_2\cos\beta}{\cos\alpha + \sin\alpha}; \qquad (12)$$

$$F_2 = m\left(g\cos\varepsilon + r\omega_0^2 - 2r\omega_0^2 \frac{\mathrm{ctg}\alpha - f_1}{\mathrm{ctg}\alpha + \mathrm{tg}\alpha}\right)f_2, \qquad (13)$$

где F_1, F_2 – силы трения перемещаемого материала о поверхность шнека и кожуха соответственно, Н.

В соответствии с выражениями (12) и (13) разность полезной и отрицательной сил трения будет иметь следующий вид:

$$\Delta F = F_2 - F_1 = mf_2\left(g\cos\varepsilon + r\omega_0^2 - \right.$$

$$\left. -2r\omega_0^2 \frac{\mathrm{ctg}\alpha - f_1}{\mathrm{ctg}\alpha + \mathrm{tg}\alpha}\right)\left(1 - \frac{\cos\beta}{\cos\alpha + \sin\alpha}\right). \qquad (14)$$

Результаты исследований. На основании полученных выражений построен график зависимости разности сил трения ΔF от угловой скорости вращения шнека ω_0 (рис. 4). В исследуемом интервале угловой скорости ω_0 = 1...10 с$^{-1}$ (соответствующем интервалу значений частоты вращения шнека n = 9,6...95,5 мин$^{-1}$) видно, что с увеличением ω_0 полезная разность сил трения F_1 и F_2 уменьшается, а при угловой скорости $\omega_0 \approx 6{,}7$ с$^{-1}$ (n = 64 мин$^{-1}$) их значения становятся одинаковыми. При последующем возрастании ω_0 разность между силами трения увеличивается уже в сторону F_1. Таким образом, увеличение частоты вращения шнека снижает эффективность процессов сжатия перемещаемого материала и выдавливания из него жидкой фракции и может привести к тому, что сыпучий материал перестанет перемещаться относительно шнека.

Заключение. Полученные в результате теоретических исследований выражения и графическая зависимость кинематических параметров движения сыпучего сырья по винтовой поверхности шнека позволяют перейти к определению конструктивных и режимных параметров предлагаемого пресс-экструдера.

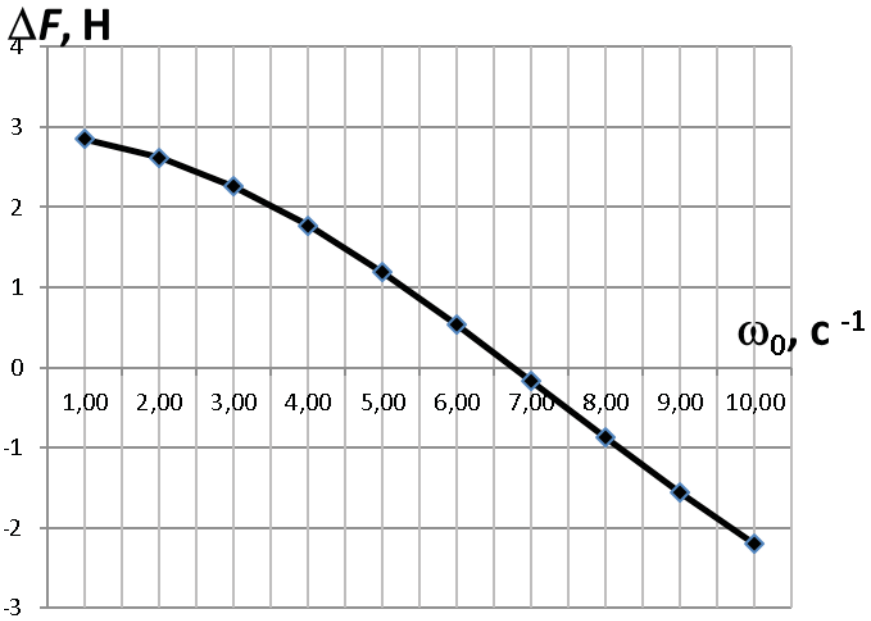

Рис. 4. График зависимости разности сил трения о поверхность кожуха и шнека перемещаемого материала от угловой скорости вращения шнека

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Барсуков В.Г., Грахольская Е.В., Волк О.С.* Влияние угла при вершине гребня витка на работоспособность шнека экструдера // Вестник Брестского государственного технического университета. Сер. Машиностроение. – 2009. – № 4(58). – С. 87–91.

2. *Дидык Т.А.* Снижение энергозатрат технологического процесса экструдирования зернового материала за счет совершенствования конструктивных параметров шнека пресс-экструдера: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. – Саратов, 2006. – 140 с.

3. *Ефимов В.Н., Донских И.Н., Царенко В.К.* Система удобрения. – М.: Колос, 2002. – 320 с.

4. *Зубкова Т.М.* Повышение эффективности работы одношнекового экструдера для производства кормов на основе параметрического синтеза: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01. – Оренбург, 2006. –318 с.

5. Индустриальная технология применения минеральных удобрений / сост. М.Н. Марченко. – М.: Россельхозиздат, 1987. – 239 с.

6. *Киселев Н.Г.* Повышение эффективности применения органоминеральных удобрений на основе куриного помета путем разработки технологии и технических средств их гранулирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01.– СПб., 2006. – 19 с.

7. *Корохов В.Г.* Бурова И.В. Расчет продолжительности воздействия шнекового механизма на прессуемое сырье // Строительство и техногенная безопасность. – 2005. – № 11. – С. 117 –120.

8. *Крючкова Л.Г.* Совершенствование процесса работы дозирующе-выгрузных устройств шнекового типа бункерного раздатчика-смесителя: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. – Благовещенск, 2007. – 19 с.

9. Патент № 132796 Россия, МПК C05F3/06. Шнековый пресс-экструдер для гранулирования органических отходов животноводческих комплексов / Е.Е. Демин, А.В. Данилин, И.С. Кисенко (Россия); № 132796; заявл. 21.05.2013; опубл. 27.09.2013, Бюл. № 11.

10. Состояние погрузки органических удобрений в сельском хозяйстве / Ю.А. Дугин [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 1–3 (43). – С. 15–17.

11. *Черненко Г.В.* Обоснование параметров вертикального шнекового конвейера с оребренным кожухом для транспортирования сыпучих материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13. – Шахты, 2010. – 23 с.

Протасов Андрей Анатольевич, *д-р техн. наук, проф., Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова*

Макаров Сергей Анатольевич, *канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Техническое обеспечение АПК», Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова. Россия.*

Данилин Андрей Владимирович, *канд. техн. наук, доцент кафедры «Техническое обеспечение АПК», Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова. Россия.*

Левченко Галина Викторовна, *канд. техн. наук, доцент кафедры «Математика, механика и инженерная графика», Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова*

410056, г. Саратов, ул. Советская,60.

Тел.: (8452) 74-96-63.

Ключевые слова: *органические удобрения; пресс-экструдер; прессуемый материал; кинематические параметры; угловая скорость.*

THE ORETICAL STUDIES OF KINEMATIC PARAMETERS OF MATERIAL MOTION IN A PRESS-EXTRUDER

Protasov Andrey Anatolyevich, *Doctor of Technical Sciences, Professor, Saratov State Agrarian University in honor of N.I. Vavilov. Russia.*

Makarov Sergey Anatolyevich, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the chair "Technical Support of the Agricultural and Industrial Complex", Saratov State Agrarian University in honor of N.I. Vavilov. Russia.*

Danilin Andrey Vladimirovich, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the chair "Technical Support of the Agricultural and Industrial Complex", Saratov State Agrarian University in honor of N.I. Vavilov. Russia.*

Levchenko Galina Virtorovna, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the chair "Mathematics, Mechanics and Engineering Graphics", Saratov State Agrarian University in honor of N.I. Vavilov. Russia.*

Keywords: *organic fertilizers; extruder press; pressed material; kinematic parameters; angular velocity.*

The article presents a constructive-technological scheme and analyzes theoretical studies of the operation of a press-extruder for granulating organic waste from livestock complexes. The basic kinematic parameters of the press extruder are considered, and analytical expressions are given.