DOI 10.28983/asj.y2021i7pp95-99 УДК 631.356.274

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВПОДОБИЯ ЗЕРНОПОГРУЗЧИКА НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ С ВИНТОВЫМ РАБОЧИМ ОРГАНОМ

ПАВЛОВ Павел Иванович, *Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова*

ПОЛОСУХИН Владислав Сергеевич, *Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И.Вавилова*

В статье рассматриваются вопросы теоретического обоснования конструктивно-режимных параметров зернопогрузчика непрерывного действия с винтовым рабочим органом.На основе теории подобия и размерностей получены критерии подобия, связывающие диаметр рабочего органа с поступательной и угловой скоростью. Полученные критерии подобия позволяют при изменении одного из параметров обосновать значения других параметров.

Введение. Зернопогрузчики непрерывного действия широко применяются в технологических схемах производства, хранения и переработки зерна. Значительное количество выпускается в виде навесных на трактор машин. К ним относятся погрузчик ПЗН-200[7], погрузчики, разработанные в Саратовском ГАУ [2, 3, 5, 6],и др.Погрузчики такого типа имеют потенциально высокую производительность, однако из-за влияния различных факторов эксплуатационная производительность снижается, а энергоемкость возрастает. Одними из факторов, наиболее влияющих на показатели эффективности, являются режимные параметры – поступательная скорость в направлении насыпи (бурта) зерна и угловая скорость рабочего органа. Данные параметры также связаны с высотой бурта зерна. Теоретическое обоснование режимов работы имеет важное значение для повышения эффективности погрузчиков непрерывного действия.

Методика исследований. Каждая точка винтового рабочего органа питателя описывает траекторию, благодаря которой происходит последовательный захват сыпучего груза из бурта. Движение происходит в вертикальной плоскости в двумерной системе координат (см. рисунок). На параметры движения оказывают влияние поступательная скорость погрузчика v и угловая скорость рабочего органа ω. Данная траектория описывается системой параметрических уравнений[4]:

$$\left.\begin{aligned} X &= R\cos(\omega t) + vt \\ Y &= R\sin(\omega t) \end{aligned}\right\}, \qquad (1)$$

где X и Y– координаты точки рабочего органа в вертикальной системе координат; R – радиус вращения некоторой точкиA рабочего органа, м; ω – угловая скорость вращения точки, рад/с; v – поступательная скорость движения,м/с; t – время с момента начала движения, с.

Производительность погрузчикаQ – количество груза, которое его рабочие органы захватывают и перемещают от основного массива к отгрузочному транспортеру и далее в транспортное средство в единицу времени.

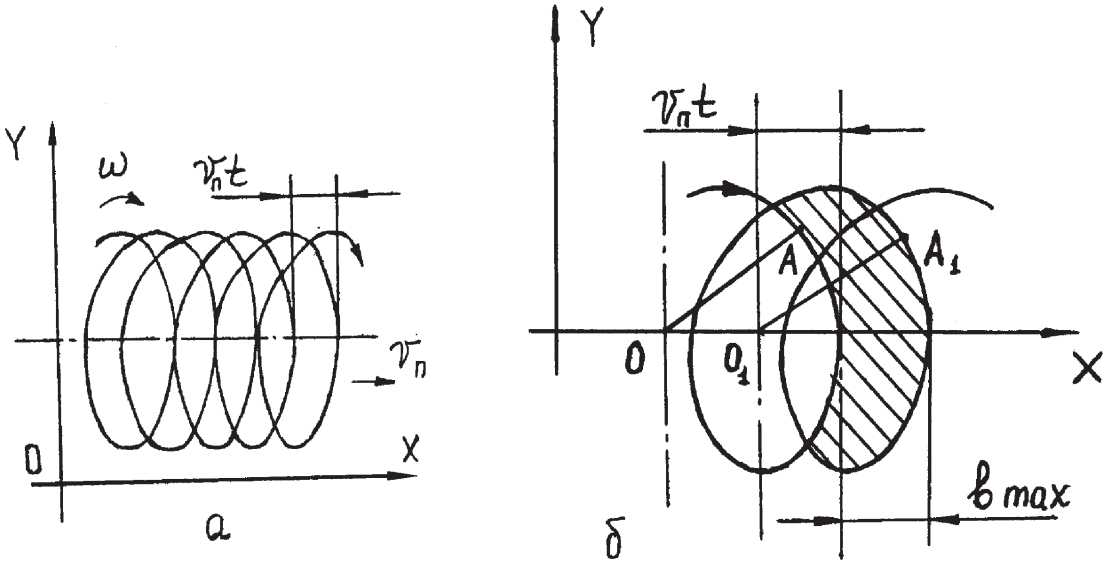
ЭнергоемкостьE – отношение мощностиP, затрачиваемой на выполнение рабочего процесса к производительности.

$$E = \frac{P}{Q}. \qquad (2)$$

Количество груза, захватываемое винтовым рабочим органом зернопогрузчика, определяется боковой проекцией отделяемой части зерновой массы (см. рисунок, б) и шириной захвата винтовой лопасти. Отделение производится лопастями, количество груза, отделяемое в единицу времени одной лопастью, кг/с:

$$Q_1 = \frac{\rho A_1 b}{t} = \frac{\rho V_1}{t}, \qquad)$$

где ρ – плотность груза,кг/м^3; A_1 – площадь отделяемой части зерновой массы, м^2; b – ширина захвата винтовой лопасти, м; t – время, за которое осуществляется отделение одной винтовой



Траектория движения точки винтового рабочего органа погрузчика непрерывного действия: а – общий вид; б – схема параметров

лопастью, с; V_1 – объем, отделяемый одной лопастью, м^3.

При погрузке одного и того же материала из бурта основным изменяющимся эксплуатационным параметром является его высота. При изменении высоты бурта необходимо изменять поступательную скорость погрузчика и угловую скорость его рабочего органа для согласования режима работы и получения необходимой производительности. При этом необходимо стремится к минимальной энергоемкости для снижения затрат топлива. Зная оптимальные параметры для одной высоты можно обосновать их с использованием теории подобия [1, 8] и при высоте, изменяющейся во времени. Для этого рассмотрим работу погрузчика при разной высоте насыпи материала как подобные системы.

Изменение высоты бурта зерна при погрузке вызывает необходимость изменять другие конструктивно-режимные параметры погрузчика для соответствия изменяющейся подаче массы зерна и продолжения процесса. При этом количество и качество параметров остается неизменным, меняются только их значения. Рабочие органы погрузчика с исходными параметрами будут являться «прототипом», а рабочие органы с измененными параметрами будут являться моделируемыми или «моделью», относящиеся к ним величины обозначим соответственно индексами *Н*, *М*.

Обобщённые координаты этих систем являются одинаковыми функциями параметров[7,8]:

$$\left.\begin{aligned} q_{Mi} &= f_i\left(P_{M_1},\ldots,P_{Mn}\right) \\ q_{Hi} &= f_{i'}\left(P_{H_1},\ldots,P_{Hn}\right) \end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

где: $i = 1,2,\ldots,\bar{k}; P_{M_1} = P_{H_1}; q_{H_1} = q_{M_1}$

Условием подобия является пропорциональностьлюбых соответствующихпараметров для любых сходственных моментов времени (сходственных точек пространства), то есть два рабочих органа погрузчика подобны, если между параметрами существует соотношение [7, 8]:

$$q_{Hi}(t_H) = q_{Ci} q_{Mi}(t_M), \qquad (5)$$

где $q_{Ci} = \text{const}; t_H = t_C t_M; t_C = \text{const}$; t_H, t_M – сходственные моменты времени.

Теория подобия указывает, что если две системы подобны, и можно найти коэффициенты подобия, то, зная поведение одной системы (модели), можно узнать и то, как будет вести себя другая система (прототип) [7, 8]. Для исследования подобных рабочих органов большое значение имеют критерии подобия. Критерии подобия представляют собой безразмерные комплексы, состоящие из произведения параметров принятых в качестве базисных с различными степенями.

Для исследования влияния на производительность и энергоёмкость зернопогрузчика с винтовым рабочим органом основных конструктивных, режимных и эксплуатационных параметров необходимо обосновать критерии подобия. Производительность и энергоёмкость

связана с указанными параметрами некоторой функцией:

$$Q, E = f(D, H, \omega, \upsilon, \rho). \qquad (6)$$

В процессе исследований и установления моделей, связывающих параметры в выражении (6), в системе (4) в качестве основных могут быть приняты другие параметры и получены критерии подобия, отличающиеся от первоначальных критериев.

Исходными базисными единицами для винтового питателя зернопогрузчика примем диаметр рабочего органа *D*, м, угловую скорость ω, $с^{-1}$, плотность груза ρ, $кг/м^{-3}$. Выразим размерность базисных единиц через основные – время *[T]*, длину *[L]* и массу *[M]*:

$$\begin{aligned} [D] &= [L]^1[T]^0[M]^0 \\ [\omega] &= [L]^0[T]^{-1}[M]^0 \\ [\rho] &= [L]^{-3}[T]^0[M]^1 \end{aligned} \qquad (7)$$

Составим матрицу системы уравнений (7), удовлетворяющих условию; что определитель $\Delta \neq 0$

$$\Delta = \begin{vmatrix} \lambda_1 & \tau_1 & \mu_1 \\ \lambda_2 & \tau_2 & \mu_2 \\ \lambda_3 & \tau_3 & \mu_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ -3 & 0 & 1 \end{vmatrix} = -1 \neq 0 \qquad (8)$$

Поскольку общее число величин, характеризующее процесс равно шести *(n = 6)*, а число независимых базисных единиц равно трём *(p = 3)*, то необходимое и достаточное число критериев подобия: $k = n - p = 3$

Результаты исследований. В соответствии с положениями теории подобия и размерностей [8] зависимость между параметрами может быть описана функцией между комплексами с базисными единицами. Выражение (6) можно представить в виде:

$$\frac{E}{[D]^{\lambda_1}[\omega]^{\mu_1}[\rho]^{\tau_1}} = f\left(\frac{\upsilon}{[D]^{\lambda_2}[\omega]^{\mu_2}[\rho]^{\tau_2}}; \frac{H}{[D]^{\lambda_3}[\omega]^{\mu_3}[\rho]^{\tau_3}}\right) \qquad (9)$$

Определим критерии подобия с использованием комплексов, входящих в уравнение (9):

$$\frac{E}{[D]^{\lambda_1} \cdot [\omega]^{\mu_1} \cdot [\rho]^{\tau_1}} = 1.$$

Выразим энергоемкость через основные единицы:

$$\frac{[L]^2[T]^{-2}}{[D]^{\lambda_1}[\omega]^{\mu_1}[\rho]^{\tau_1}} = \frac{[L]^2[T]^{-2}}{([L]^{\lambda_1}([T]^{\mu_1}([M]\cdot[L]^{-3})^{\tau_1}} =$$

$$= [L]^2 \cdot [T]^{-2} \cdot [L]^{-\lambda_1} \cdot [T]^{\mu_1} \cdot [M]^{-\tau_1} \cdot [L]^{3\tau_1} = 1.$$

Последнее выражение будет безразмерным при равенстве нулю показателей степени всех входящих членов, т.е.

$$\left.\begin{aligned} 2 - \lambda_1 + 3\tau_1 &= 0 \\ -2 + \mu_1 &= 0 \\ -\tau_1 &= 0 \end{aligned}\right\} \Rightarrow \tau_1 = 0; \mu_1 = 2; \lambda_1 = 2.$$

Первый критерий подобия для энергоемкости:

$$\Pi_1 = \frac{E}{D^2\omega^2}. \qquad (10)$$

Далее определим второй критерий:

$$\frac{\upsilon}{[D]^{\lambda_2} \cdot [\omega]^{\mu_2} \cdot [\rho]^{\tau_2}} = 1.$$

Откуда:

$$\frac{[L]^1 \cdot [T]^{-1}}{[D]^{\lambda_2} \cdot [\omega]^{\mu_2} \cdot [\rho]^{\tau_2}} = \frac{[L]^1 \cdot [T]^{-1}}{([L]^{\lambda_2} \cdot ([T]^{-1})^{\mu_2} \cdot ([M]\cdot[L]^{-3})^{\tau_2}} =$$

$$= [L]^1 \cdot [T]^{-1} \cdot [L]^{-\lambda_2} \cdot [T]^{\mu_2} \cdot [M]^{-\tau_2} \cdot [L]^{-3\tau_2} = 1.$$

Решая вышеуказанное условие:

$$\left.\begin{aligned} 1 - \lambda_2 - 3\tau_2 &= 0 \\ -1 + \mu_2 &= 0 \\ -\tau_2 &= 0 \end{aligned}\right\} \Rightarrow \tau_2 = 0; \mu_2 = 1; \lambda_2 = 1.$$

Получим второй критерий подобия:

$$\Pi_2 = \frac{\upsilon}{D\omega}. \qquad (11)$$

Аналогично найдём третий критерий подобия:

$$\Pi_3 = H / D. \qquad (12)$$

Важное значение имеет исследование критериев подобия с использованием поступательной скорости υ, м/с, зернопогрузчика.Примем ее в качестве базисного параметра вместо угловой скорости и получим критерии подобия.

Выразим указанные базисные параметры через основные единицы:

$$[D]=[L]^1[T]^0[M]^0$$
$$[\upsilon]=[L]^1[T]^{-1}[M]^0. \qquad (13)$$
$$[\rho]=[L]^{-3}[T]^0[M]^1$$

Составим определитель матрицы, на основании (13):

$$\Delta=\begin{vmatrix}\lambda_1 & \tau_1 & \mu_1\\ \lambda_2 & \tau_2 & \mu_2\\ \lambda_3 & \tau_3 & \mu_3\end{vmatrix}=\begin{vmatrix}1 & 0 & 0\\ 1 & -1 & 0\\ -3 & 0 & 1\end{vmatrix}=-1\neq 0. \qquad (14)$$

Определитель матрицы не равен нулю, поэтому базисные параметры выбраны верно. Определим количество критериев подобия: $k=6-3=3$. Таким образом, можно записать:

$$\frac{E}{[D]^{\lambda_1}[\upsilon]^{\mu_1}[\rho]^{\tau_1}}=f\left(\frac{\omega}{[D]^{\lambda_2}[\upsilon]^{\mu_2}[\rho]^{\tau_2}};\frac{H}{[D]^{\lambda_3}[\upsilon]^{\mu_3}[\rho]^{\tau_3}}\right). \qquad (15)$$

Определим критерии подобия:

$$\frac{E}{[D]^{\lambda_1}\cdot[\upsilon]^{\mu_1}\cdot[\rho]^{\tau_1}}=1.$$

Откуда:

$$\frac{[L]^2\cdot[T]^{-2}}{([L]^{\lambda_1}\cdot([L]\cdot[T]^{-1})^{\mu_1}\cdot([M]\cdot[L]^{-3})^{\tau_1}}=$$

$$=[L]^2\cdot[T]^{-2}\cdot[L]^{-\lambda_1}\cdot[L]^{-\mu_1}\cdot[T]^{\mu_1}\cdot[M]^{-\tau_1}\cdot[L]^{3\tau_1}=1.$$

Из данного выражения определим показатели степени основных единиц:

$$\left.\begin{aligned}2-\lambda_1+3\tau_1-\mu_1&=0\\ -2+\mu_1&=0\\ -\tau_1&=0\end{aligned}\right\}\Rightarrow \mu_1=2;\tau_1=0;\lambda_1=0.$$

Получим первый критерий подобия:

$$\Pi_1=E/(\upsilon)^2. \qquad (15)$$

Аналогично определяются другие критерии: второй

$$\Pi_2=\frac{\omega D}{\upsilon_{\Pi}}. \qquad (16)$$

Третий критерий для винтового питателя соответствует выражению (12): $\Pi_3=H/D$

Заключение. Анализ полученных с помощью методов подобия критериев,связывающих основной конструктивный параметр погрузчика – диаметр рабочего органа и режимные параметры – угловую скорость ω и поступательную скорость υ с производительностью и энергоемкостью позволяет сделать следующие выводы.Теоретически влияние на энергоемкость диаметра и угловой скорости рабочего органа носит квадратичный характер (выражение (10)). Аналогичный характер имеет влияние поступательной скорости погрузчика (выражение (16)). Увеличение каждого из этих параметров приводит к возрастанию энергоемкости по квадратичной зависимости. Между параметрами зависимость носит линейный характер, однако увеличение или уменьшение угловой скорости рабочего органа при неизменной поступательной скорости погрузчика требует изменения диаметра в обратную сторону на такую же величину.Высота бурта и диаметр рабочего органа при неизменных других параметрахсвязаны прямо пропорциональной зависимостью.

Таким образом, установлены критерии подобия для зернопогрузчика с винтовым рабочим органом и обоснованы параметры для получения зависимостей между критериями подобия и проведения экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гухман А.А.* Введение в теорию подобия. – М.: Высш. шк., 1963.

2. *Дубинин В.Ф., Павлов П.И., Хитрова Н.В.* Шнекофрезерный питатель погрузчика органических удобрений// Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2000. – № 10. –С. 14–15.

3. *Загоруйко М.Г., Павлов П.И., Хакимзянов Р.Р.* Погрузчик непрерывного действия для зерна // Аграрный научный журнал. – 2017. – № 4. – С. 55–57.

4. Павлов П.И. Научно-технические решения проблемы ресурсосбережения при использовании навозопогрузчиков непрерывного действия: дис. .... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Павлов П.И. – Саратов, 2002. – 441 с.

5. Патент на полезную модель RUS № 156452. Погрузчик сыпучих грузов /Хакимзянов Р.Р., Павлов П.И. Заявка № 2015126285/11 от 02.07.2015. Опубл. 10.11.2015.

6. Патент РФ №2083463, МКИ B65 G 67/24 // (B65 G 65/22) Шнекофрезерныйпитатель / П.И. Павлов, Н.В. Хитрова. Опубл. 10.07.97. Бюл. №19.

7. Погрузчик зерна навесной ПЗН-200. – Режим доступа: https://rosagro2010.ru/pogruzchik_zerna_navesnoy_200/200m/.

8. Теория подобия и размерностей. Моделирование/ П.М. Алабужев [и др.]. – М.: Высш.шк., 1968. – 208 с.

Павлов Павел Иванович, *д-р техн. наук, проф. кафедры «Математика, механика и инженерная графика»,Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. Россия.*

Полосухин Владислав Сергеевич, *аспирант кафедры «Математика, механика и инженерная графика», Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова. Россия.*

410056, г. Саратов, ул. Советская, 60.
Тел.: (8452) 74-96-63.

Ключевые слова: *зернопогрузчик; рабочий орган; поступательная скорость; критерий.*

THEORETICAL SUBSTANTIATION OF THE SIMILARITY CRITERIA FOR A CONTINUOUS GRAIN LOADER WITH A SCREW WORKING BODY

Pavlov Pavel Ivanovich, *Doctor of Technical Sciences, Professor of the chair "Mathematics, Mechanics and Engineering Graphics", Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov. Russia.*

Polosukhin Vladislav Sergeevich, *Post-graduate Student of the chair "Mathematics, Mechanics and Engineering Graphics", Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov. Russia.*

Keywords: *grain loader; working body; forward speed; criterion.*

The article deals with the theoretical substantiation of the design and operating parameters of a continuous grain loader with a screw working body. On the basis of the theory of similarity and dimensions, similarity criteria were obtained. They relate the diameter of the working body to the translational and angular velocity. When one of the parameters is changed, the obtained similarity criteria allow one to justify the values of other parameters.