УДК 621

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПЛОСКОМАТРИЧНОГО ГРАНУЛЯТОРА С АКТИВНЫМИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ПРЕСС-ВАЛКАМИ

А.В. Осокин*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова), 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46*

Аннотация. Несмотря на большую распространенность грануляторов с плоской матрицей, комплексных теоретических исследований такой конструкции машины практически не проводилось. В то же время кинематика движения рабочих органов грануляторов с кольцевой матрицей изучена достаточно подробно. Кинематика движения рабочих органов машины определяет характер их движения и скоростные параметры, а также затраты энергии на работу агрегата. Кроме того, подробный анализ кинематической схемы установки позволяет рационально подойти к процессу проектирования нового оборудования.

В связи с этим в данной работе предложена классификация грануляторов с плоской пресс-матрицей по кинематическим схемам взаимодействия их рабочих органов. Проведены аналитические исследования кинематической схемы плоскоматричного гранулятора с активными цилиндрическими пресс-валками. Рассмотрены силы, действующие на пресс-валок при его работе. Определены кинематические параметры и установлена их взаимосвязь с конструктивными параметрами пресс-валка. Получены аналитические уравнения определения нейтрального сечения — как наиболее характерного сечения пресс-валка гранулятора.

Ключевые слова: гранулятор с плоской матрицей, пресс-валок гранулятора, нейтральное сечение, кинематическая схема плоскоматричного гранулятора

DOI: 10.22227/1997-0935.2017.3.317-325

STUDY OF THE FLAT DIE PELLET MILLS KINEMATIC DIAGRAM WITH ACTIVE CYLINDRICAL PRESS ROLLS

A.V. Osokin*JSC Scientific Research Institute of Parachute Design and Production (NII Parachutostroeniya), 2/1 Irkutskaya str., Moscow, 107241, Russian Federation*

Abstract. Though being widely spread, the designs of such machines as flat die pellet mills have hardly been comprehensively theoretically studied. At the same time, the kinematic motion of the ring die pellet mill executive parts have been studied quite thoroughly. The machine executive parts kinematics determines the nature of their motion and velocity parameters, as well as the energy costs for the unit operation of the assembly. In addition, a detailed analysis of the facility kinematic diagram enables a rational approach to the design process for a new equipment.

In view of this, this paper proposes a classification of flat matrix granulators over the kinematic diagrams of the executive parts interactions. We performed an analytical study of the kinematic diagram flat matrix granulator with active cylindrical press rolls. We considered the forces acting on the press roll during its operation. We determined the kinematic parameters and their interrelation with the design parameters of the press roll. We obtained the analytical equations for the of the neutral cross-section determination — the most characteristic section of the press-roll granulator.

Key words: flat matrix granulator, press roll granulator, neutral section, kinematics flat matrix pelletizer

Гранулирование материалов получило широкое распространение практически во всех отраслях промышленности, в частности в строительной отрасли на стадии подготовки и обогащения сырья, выпуска полуфабриката и готового продукта. При этом наиболее распространены грануляторы экструзионного действия, т.е. такие, в которых перерабатываемый материал продавливается через профилированные отверстия (фильеры). Самыми распространенными среди указанных грануляторов являются грануляторы с кольцевой и плоской пресс-матрицами. Послед-

ние занимают до 80 % от всего парка производственных грануляторов [1].

Производство строительных материалов является неотъемлемой частью строительной отрасли промышленности. С появлением и распространением в России нового вида дорожного покрытия — щебеночно-мастичного асфальтобетона, возникла потребность в производстве гранулированных стабилизирующих добавок (ГСД) как одного из основных компонентов смеси. Базовой перерабатывающей машиной в технологических линиях по производству

ГСД является плоскоматричный гранулятор [1, 2]. В частности, в разработанном на базе технопарка БГТУ им. В.Г. Шухова ресурсосберегающем технологическом комплексе для производства ГСД щебеночно-мастичного асфальтобетона [3] используется гранулятор с плоской матрицей диаметром 425 мм.

Несмотря на большую распространенность оборудования данного типа, комплексных теоретических исследований такой конструкции машины (в т.ч. анализа кинематических схем) практически не проводилось, в то время как кинематика движения рабочих органов грануляторов с кольцевой пресс-матрицей изучена достаточно подробно. Рабочие органы типовых промышленных грануляторов делаются с большим запасом прочности, что заметно утяжеляет и удорожает всю конструкцию. Зачастую при рациональном проектировании машины под конкретные материалы метало- и энергоемкость машины можно существенно снизить по сравнению с типовой. Для рационального проектирования плоскоматричных грануляторов полезен анализ кинематической схемы установки, непосредственно связанной с конструктивно-технологическими параметрами машины.

При всем разнообразии плоскоматричных грануляторов их можно разделить на две группы: грануляторы с активной пресс-матрицей и грануляторы с

активными пресс-валками (рис. 1). В первом случае во вращение приводится пресс-матрица гранулятора, а во втором случае движимые посредством приводного вала пресс-валки перекатываются по неподвижной пресс-матрице.

Схема 1, а чаще всего реализуется в небольших грануляторах и лабораторных установках как наиболее простая в изготовлении. Схема 1, б применяется в грануляторах комбикормов [4]. Схемы 1, в и 1, г применяются, в основном, в промышленных грануляторах большой производительности.

Рассмотрим подробнее данную кинематическую схему сложного движения пресс-валка по пресс-матрице (рис. 2). Вращение пресс-валка происходит одновременно вокруг двух пересекающихся осей: переносное движение совершается вокруг оси водила (приводного вала) $O'O_v$ с угловой скоростью ω_v , а относительное вращение – вокруг поводка (оси пресс-валка) $O'O_{п.в.}$ с угловой скоростью $\omega_{п.в.}$.

Мгновенная ось скоростей проходит через точку O' пересечения осей переносного и относительного вращений и через точку O'' касания нейтрального сечения пресс-валка с неподвижной рабочей поверхностью пресс-матрицы. Скорость точки O'' равна нулю. Крайние точки K и L обечайки пресс-валка при этом будут скользить по рабочей поверхности пресс-матрицы.

Рис. 1. Схемы грануляторов с плоской матрицей: а — с активной пресс-матрицей с цилиндрическими пресс-валками; б — с активной пресс-матрицей с коническими пресс-валками; в — с активными цилиндрическими пресс-валками; г — с активными коническими пресс-валками; ω_v — угловая скорость приводного вала; P — прижимное усилие, обеспечивающее необходимое давление на материал при работе гранулятора

Fig. 1. Flat matrix granulator diagrams: а — with active press matrix with conical press rolls; б — with active cylindrical press rolls; в — with active cylindrical press rolls; г — with active conical press rolls; ω_v — drive shaft angular velocity; P — hold down pressure to secure the required pressure on the material during the granulator operation.

По теореме о сложении вращений твердого тела вокруг двух пересекающихся осей имеем [5, 6]

$$\omega_a = \omega_e + \omega_r, \quad (1)$$

где ω_a — вектор абсолютной угловой скорости тела; ω_e — вектор переносной угловой скорости тела; ω_r — вектор относительной угловой скорости тела.

Параллелограмм угловых скоростей показан на рис. 2 (направления векторов угловых скоростей определяем по правилу буравчика). В условиях нашей задачи он представляет собой прямоугольник. Обозначим угол $\angle O' O'' P$ через χ , тогда

$$\omega_a = \frac{\omega_e}{\sin \chi} = \frac{\omega_b}{\sin \chi}. \quad (2)$$

Из треугольника $O' O'' P$

$$\sin \chi = \frac{R_{п.в.}}{\sqrt{R_{п.в.}^2 + R_0^2}}; \quad (3)$$

где $R_{п.в.}$ — радиус пресс-валка, м; R_0 — расстояние от оси приводного вала до нейтрального сечения, м.

Тогда

$$|\omega_a| = \omega_b \frac{\sqrt{R_{п.в.}^2 + R_0^2}}{R_{п.в.}} = \omega_b \sqrt{1 + \frac{R_0^2}{R_{п.в.}^2}}. \quad (4)$$

Определяя проекции вектора ω_a на оси координат x , y и z , т.е. ω_x , ω_y и ω_z , получим:

$$\omega_x = 0;$$

$$\omega_y = |\omega_a \cos \chi| = \omega_b \frac{\sqrt{R_{п.в.}^2 + R_0^2}}{R_{п.в.}} \frac{R_0}{\sqrt{R_{п.в.}^2 + R_0^2}} = \omega_b \frac{R_0}{R_{п.в.}}; \quad (5)$$

$$\omega_z = -|\omega_e| = -\omega_{п.в.}$$

Проекция вектора ω_a на ось y есть не что иное, как относительная скорость вращения пресс-валка вокруг своей оси:

$$|\omega_r| = \omega_{п.в.} = \omega_b \frac{R_0}{R_{п.в.}}. \quad (6)$$

Коническая поверхность, образованная вращением мгновенной оси в неподвижном пространстве, называется неподвижным аксоидом, а в подвижном пространстве — подвижным аксоидом [6].

Рассматривая движение пресс-валка как вращение вокруг оси $O'O''$, можно найти скорость любой его точки как произведение расстояния от интересующей точки пресс-валка (перпендикуляр к вектору ω_a) на абсолютную угловую скорость ω_a . Скорость точки M , например, будет составлять $v_M = 2R_0\omega_b$.

Для определения расстояния R_0 от оси приводного вала (оси переносного вращения) до нейтрального сечения пресс-валка рассмотрим схему на рис. 3.

Возникающие при таком движении силы трения скольжения $F_{тр1}$ и $F_{тр2}$ обусловлены распределенной по линии контакта пресс-валка и пресс-матрицы нагрузкой $G_{п.в.}/b_{п.в.}$. Эта нагрузка создает линейно распределенные силы трения скольжения $q_{тр}$ [7, 8]:

$$q_{тр} = \frac{f_t G_{п.в.}}{b_{п.в.}}, \quad (7)$$

где f_t — коэффициент трения скольжения пары «пресс-валок – пресс-матрица».

Приложенные к внутренней и внешней сторонам обечайки пресс-валка силы трения $F_{тр1}$ и $F_{тр2}$ направлены в разные стороны. При этом сила $F_{тр2}$ стре-

Рис. 2. Кинематическая схема сложного движения пресс-валка
Fig. 2. Kinematic diagram of the press roll complex motion

Рис. 3. К определению нейтрального сечения пресс-валка

Fig. 3. To the determination of the press roll neutral cross-section

мится вращать пресс-валок, а сила $F_{тр1}$ тормозит его (рис. 3). Кроме того, пресс-валку при перекачивании необходимо преодолеть реакцию опорной поверхности $N = G_{п.в}$.

Таким образом, уравнение равновесия моментов сил в вертикальной плоскости (относительно оси пресс-валка), действующих в паре «пресс-валок – пресс-матрица», будет иметь вид

$$F_{тр2} R_{п.в} - F_{тр1} R_{п.в} - N f_k = 0, \quad (8)$$

где $F_{тр1}$, $F_{тр2}$ — силы трения качения, приложенные к обечайке пресс-валка, Н; N — реакция опорной поверхности пресс-матрицы, Н; $R_{п.в}$ — радиус пресс-валка, м; f_k — коэффициент трения качения, м.

Это значит, что

$$F_{тр2} - F_{тр1} = \frac{G_{п.в} f_k}{R_{п.в}}, \quad (9)$$

где G — сила тяжести пресс-валка, Н.

Из рис. 3 следует, что

$$F_{тр1} = q_{тр} (R_0 - R_K); \quad (10)$$

$$F_{тр2} = q_{тр} (b_{п.в} - (R_0 - R_K)). \quad (11)$$

С учетом (7), (10) и (11) выражение (9) примет вид

$$\frac{f_k G_{п.в}}{b_{п.в}} [b_{п.в} - (R_0 - R_K)] - \frac{f_k G_{п.в}}{b_{п.в}} (R_0 - R_K) = \frac{f_k G_{п.в}}{R_{п.в}}. \quad (12)$$

Откуда расстояние от центра пресс-матрицы до нейтрального сечения пресс-валка

$$R_0 = R_K + 0,5 b_{п.в} \left(1 - \frac{f_k}{R_{п.в} f_t} \right). \quad (13)$$

Из полученного выражения видно, что нейтральное сечение пресс-валка смещено к внутренней стороне относительно его вертикальной плоскости симметрии на величину $f_k / (R_{п.в} f_t)$. Но поскольку коэффициент трения качения f_k очень мал (в нашем случае $f_k = 1 \cdot 10^{-5}$ м [9]), значением данной дроби для большинства практических расчетов можно пренебречь. Тогда нейтральное сечение будет находиться в вертикальной плоскости симметрии пресс-валка, а расстояние R_0 определится как

$$R_0 = R_K + 0,5 b_{п.в}. \quad (14)$$

Окружная скорость переносного движения пресс-валка по пресс-матрице:

$$v_B = \omega_B R, \quad (15)$$

где ω_B — угловая скорость вращения водила (приводного вала), c^{-1} ; R — радиус вращения, который определяется расстоянием от центра пресс-матрицы до точки на поверхности обечайки пресс-валка, м.

По выражению (15) окружные скорости нейтрального сечения и крайних точек обечайки пресс-валка определяются зависимостями

$$v_B^K = \omega_B R_K = \frac{2\pi n_B}{60} R_K; \quad (16)$$

$$v_B^0 = \omega_B R_0 = \frac{2\pi n_B}{60} R_0; \quad (17)$$

$$v_B^L = \omega_B R_L = \frac{2\pi n_B}{60} R_L, \quad (18)$$

где n_B — частота вращения водила (приводного вала), $мин^{-1}$.

Разности между скоростями крайних точек обечайки пресс-валка и нейтрального сечения будут определять скорости максимального скольжения крайних точек пресс-валка по пресс-матрице. С учетом (14) получим

$$v_{\text{ск}}^L = v_{\text{в}}^L - v_{\text{в}}^0 = \frac{2\pi n_{\text{в}}}{60} (R_L - R_0) = \frac{\pi}{60} b_{\text{п.в}} n_{\text{в}}; \quad (19)$$

$$v_{\text{ск}}^K = v_{\text{в}}^0 - v_{\text{в}}^K = \frac{2\pi n_{\text{в}}}{60} (R_0 - R_K) = -\frac{\pi}{60} b_{\text{п.в}} n_{\text{в}}, \quad (20)$$

где $n_{\text{в}}$ — частота вращения водила (приводного вала), мин^{-1} .

Знак «минус» в выражении (20) показывает, что скорость скольжения точки K направлена противоположно скорости точки L (рис. 3).

Значение скорости скольжения меняется по линейному закону (рис. 3). Следовательно, *средняя скорость скольжения* для всех точек обечайки пресс-валка

$$v'_{\text{ск}} = 0,5(v_{\text{ск}}^L + v_{\text{ск}}^K) = \frac{\pi}{120} b_{\text{п.в}} n_{\text{в}}, \quad (21)$$

где $n_{\text{в}}$ — частота вращения водила (приводного вала), мин^{-1} .

Таким образом, из полученных уравнений видно, что скорость скольжения прямо пропорциональна ширине пресс-валка: чем больше ширина пресс-валка, тем больше его истирающее действие, что, с одной стороны, расширяет технологические возможности агрегата и позволяет использовать его в качестве измельчителя [10], с другой — повышается износ обечайки пресс-валков и рабочей поверхности пресс-матрицы, увеличивается степень измельчения материала (и связанная с этим явлением потеря про-

изводительности), а также возрастают температурные режимы вследствие нагрева при трении.

Рассматривая вектор угловой скорости ω_a как радиус-вектор точки, находящейся на конце данного вектора (рис. 4), и дифференцируя его по времени, получим вектор углового ускорения ε этой точки [11]

$$\varepsilon = \frac{d\omega_a}{dt}. \quad (22)$$

Модуль вектора ε равен абсолютной величине производной $d\omega_a/dt$ [11]:

$$|\varepsilon| = \left| \frac{d\omega_a}{dt} \right|. \quad (23)$$

В то же время вектор скорости точки в данный момент времени равен первой производной от радиус-вектора точки по времени (формула Эйлера) [6, 12]:

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = [\omega, \mathbf{r}]. \quad (24)$$

Сравнивая выражения (22) и (24), можно заключить, что угловое ускорение ε можно вычислять как скорость, с которой конец вектора ω_a перемещается вдоль годографа (своей траектории) [12]. Таким образом, в обозначениях нашей задачи (рис. 4) получим

$$\mathbf{u} = \frac{d\omega_a}{dt} = \varepsilon; \quad (25)$$

$$u = \left| \frac{d\omega_a}{dt} \right| = |\varepsilon|. \quad (26)$$

Поскольку вектор ω_a , не изменяя своей величины, равномерно вращается вокруг вертикальной оси $O_B O'$ с угловой скоростью $\omega_{\text{в}}$, точка на его конце опи-

Рис. 4. К определению ускорений точек пресс-валка

Fig. 4. To the determination of the press roll points acceleration

шет окружность радиуса $r = \omega_a \cos \chi = \omega_b \operatorname{ctg} \chi$. Для абсолютной величины окружной скорости u имеем

$$u = r\omega_b = \omega_b^2 \operatorname{ctg} \chi. \quad (27)$$

Из рис. 4 видно, что

$$\operatorname{ctg} \chi = \frac{R_0}{R_{п.в}}, \quad (28)$$

тогда (27) примет вид

$$u = \frac{R_0}{R_{п.в}} \omega_b^2. \quad (29)$$

Вектор скорости u лежит в горизонтальной плоскости и направлен перпендикулярно к радиусу r в сторону вращения вектора ω_a вокруг оси $O_b O'$ (рис. 4). Так как угловое ускорение $\varepsilon = u$, то можно заключить, что вектор углового ускорения ε направлен по перпендикуляру, восстановленному в точке O' , к вертикальной плоскости, проходящей через оси относительного $O'P$ и переносного $O_b O'$ вращений (рис. 4). Значение же углового ускорения

$$\varepsilon = \omega_b^2 \operatorname{ctg} \chi. \quad (30)$$

Найденное таким образом ускорение ε позволяет определить ускорения любой точки пресс-вала. В соответствии с теоремой Ривальса ускорение точки твердого тела, вращающегося вокруг неподвижного центра, равно геометрической сумме векторов нормального и тангенциального ускорений [13]. Например, ускорение точки M определится как

$$a_M = a_M^n + a_M^\tau. \quad (31)$$

Тангенциальное ускорение a_M^τ (вращательное ускорение вокруг вектора ε) по абсолютной величине определяется как

$$a_M^\tau = O'M \varepsilon. \quad (32)$$

Из треугольника $MO'P$ (рис. 4) имеем

$$O'M = \frac{R_0}{\cos \chi}, \quad (33)$$

с учетом (30) формула (32) примет вид

$$a_M^\tau = \frac{R_0}{\sin \chi} \omega_b^2. \quad (34)$$

Вектор тангенциального ускорения a_M^τ перпендикулярен плоскости, проходящей через вектор ε и отрезок $O'M$ и направлен против хода часовой стрелки, если смотреть с конца вектора ε .

Абсолютную величину нормального ускорения a_M^n определяем по зависимости

$$a_M^n = MM' \omega_a^2. \quad (35)$$

Перпендикуляр MM' из точки M на мгновенную ось $O'O''$ определим по рис. 6:

$$MM' = 2R_0 \sin \chi, \quad (36)$$

С учетом (2), получим

$$a_M^n = \frac{2R_0}{\sin \chi} \omega_b^2. \quad (37)$$

Вектор ускорения a_M^n направлен по прямой MM' от точки M к точке M' .

Полное ускорение определяем по формуле (31). Так как оба вектора лежат в вертикальной плоскости, проходящей через ось $O'O_b$ и точку M , то в этой же плоскости лежит и вектор ускорения a_M . Величину ускорения можно определить как диагональ параллелограмма по теореме косинусов (учитывая угол между векторами a_M^τ и a_M^n равным 2χ) получим

$$a_M^2 = (a_M^n)^2 + (a_M^\tau)^2 - 2a_M^n a_M^\tau \cos 2\chi. \quad (38)$$

После соответствующих преобразований получим

$$a_M^2 = R_0^2 \omega_b^4 (9 + \operatorname{ctg}^2 \chi). \quad (39)$$

Поскольку

$$\operatorname{ctg} \chi = \frac{R_0}{R_{п.в}}, \quad (40)$$

получим

$$a_M^2 = \frac{R_0^2}{R_{п.в}^2} \omega_b^4 (9R_{п.в}^2 + R_0^2); \quad (41)$$

откуда

$$a_M = \frac{R_0}{R_{п.в}} \omega_b^2 \sqrt{9R_{п.в}^2 + R_0^2}. \quad (42)$$

Аналогичным образом определяется ускорение любой точки во всем объеме пресс-вала.

Для определения динамических нагрузок на рабочие органы гранулятора, возникающих при его работе, используем приближенную теорию гироскопов. И в самом деле, в первом приближении пресс-валок — симметричное твердое массивное тело, быстро вращающееся вокруг своей оси симметрии, — можно рассмотреть как *тяжелый гироскоп* (гироскоп с двумя степенями свободы, совершающий вращение вокруг неподвижной точки). Тогда переносное движение пресс-вала вокруг оси приводного вала можно назвать *прецессионным* (или просто *прецессией*).

При работе гранулятора на движущийся пресс-валок действуют внешние силы (рис. 5): вес пресс-вала $G_{п.в}$, составляющие R_x , R_y и R_z реакции поводка в точке O' (на рис. 5 не показаны), а также реакция R опорной (рабочей) поверхности пресс-матрицы. При неподвижном пресс-валке реакция будет называться *статической* $R^{ст}$, а при подвижном — *динамической*, или *гироскопической* $R^{гир}$. Определим, как соотносятся статическая и динамическая (гироскопическая) реакции пресс-матрицы при движении по ней пресс-вала.

Статическая опорная реакция пресс-матрицы определяется из уравнения моментов относительно точки O' : $R^{ст} R_0 - G_{п.в} R_0 = 0$, откуда имеем

$$R^{ст} = G_{п.в}, \quad (43)$$

где $G_{п.в}$ — вес пресс-вала, Н.

Воспользуемся приближенной теорией гироскопов и направим вектор главного момента количества движения L_0 пресс-вала относительно неподвижной точки O' по оси симметрии пресс-вала (в сторону ω_r). Обозначим конец вектора точкой D , которая опи-

Рис. 5. К определению статической и гироскопической реакций пресс-матрицы
Fig. 5. To the determination of the static and press matrix gyroscopic reactions.

сывает окружность радиуса L_0 с угловой скоростью ω_a (ω_p), т.е. скорость точки D

$$u_D = \mathbf{L}_0 \mathbf{\Omega}_e, \quad (44)$$

где $\mathbf{L}_0$ — вектор главного момента количеств движения, м.

Главный момент количеств движения по модулю

$$|\mathbf{L}_0| = J_v \omega_r, \quad (45)$$

где J_y — осевой момент инерции пресс-валка относительно оси y , кг · м².

Поскольку мы рассматриваем пресс-валок как массивное однородное твердое тело массой $m_{п.в.}$, его момент инерции относительно оси y определяется зависимостью [12]

$$J_v = 0,5m_{\Pi.B}R_{\Pi.B}^2. \quad (46)$$

Скорость ω_r определяем по формуле (6) (не забывая, что $\omega_e = \omega_p$), тогда

$$u_D = 0,5m_{\text{п.б}} R_{\text{п.б}}^2 \omega_e \frac{R_0}{R_{\text{п.б}}} \omega_e = 0,5m_{\text{п.б}} R_{\text{п.б}} R_0 \omega_{\text{Б}}^2. \quad (47)$$

Вектор скорости $\mathbf{u}_D$ точки D направлен параллельно оси x (рис. 7).

Согласно теореме Резаля, скорость конца вектора кинетического момента системы относительно данной неподвижной точки равна главному моменту внешних сил, действующих на систему относительно этой же точки:

$$\mathbf{u}_D = \mathbf{M}_0^e. \quad (48)$$

Изобразим вектор момента внешних сил $\mathbf{M}_0^e$ на оси x из центра O' параллельно вектору $\mathbf{u}_D$ и в том же направлении. С учетом (47)

$$M_0^e = 0,5m_{\text{п.р.}}R_{\text{п.р.}}R_0\omega^2. \quad (49)$$

Гироскопическая опорная реакция $R^{\text{гир}}$ пресс-матрицы, моментом которой является вектор $\mathbf{M}_0^e$, определяется из формулы $M_0^e = R^{\text{гир}} R_0$, т.е.

$$R_{\text{гир}} = \frac{M_0^e}{R_0} = \frac{0,5m_{\text{п.б}}R_{\text{п.б}}R_0\omega_{\text{б}}^2}{R_0} = 0,5m_{\text{п.б}}R_{\text{п.б}}\omega_{\text{б}}^2. \quad (50)$$

Тогда отношение гироскопической реакции
пресс-матрицы к статической

$$\frac{R^{\text{ГП}}}{R^{\text{CT}}} = \frac{0,5m_{\text{П.Б}} R_{\text{П.Б}} \omega_{\text{Б}}^2}{G_{\text{П.Б}}} = \frac{R_{\text{П.Б}}}{2g} \omega_{\text{Б}}^2. \quad (51)$$

Полная реакция опорной поверхности будет составлять

$$R^\Sigma = R^{\text{ct}} + R^{\text{rip}} = G_{\text{п.б.}} \left(1 + \frac{R_{\text{п.б.}} \omega_{\text{б.}}^2}{2g} \right). \quad (52)$$

При работе машины при указанных направлениях вращений полная реакция рабочей поверхности пресс-матрицы будет больше соответствующей реакции при покое. Это необходимо учитывать, поскольку возникающие нагрузки определяют степень изнашивания рабочих поверхностей (вследствие повышенного трения), а также величину изгибающих моментов поводка пресс-валка. Из формулы (52) видно, что чем больше скорость вращения приводного вала $\omega_{\text{в}}$, тем больше будут нагрузки на рабочие органы машины.

Рассмотренный пример увеличения реакции рабочей поверхности пресс-матрицы при сложном движении по ней пресс-валка объясняется так называемым гироскопическим эффектом. Согласно правилу Н.Е. Жуковского [12], если быстро вращающемуся гироскопу сообщить вынужденное прецессионное движение, то на подшипники, в которых закреплена ось гироскопа, будет действовать пара сил с моментом $M^{гир}$, стремящаяся кратчайшим путем установить ось собственного вращения параллельно оси прецессии так, чтобы направления векторов ω_e и ω_r при этом совпали. Данное правило справедливо как для астатического, так и для тяжелого гироскопа.

Значение гироскопического момента можно определить, используя теорему Резаля. Численно момент определится по выражению [12]

$$M^{\text{гир}} = J_{\text{в}} \omega_{\text{гир}} \sin \theta, \quad (53)$$

где θ — угол между векторами ω_B и $\omega_{П.В}$ (угол нутации), град.

Так как в нашем случае угол $\theta = 90^\circ = \text{const}$, с учетом (6) и (46) выражение (53) примет вид

$$M^{\text{гпр}} = 0,5m_{\text{п.в}}R_{\text{п.в}}R_0\omega_{\text{в}}^2. \quad (54)$$

Полученное выражение совпадает с формулой (49), что соответствует физическому смыслу явления.

В условиях нашей задачи данное правило объясняет увеличение реакции R^Σ за счет возникающего момента, стремящегося повернуть вектор ω , параллельно вектору ω_e .

Изменив направление вращения приводного вала на противоположное, согласно тому же правилу получим уменьшение силы давления пресс-валка на пресс-матрицу.

Проведенный анализ кинематической схемы плоскоматричного гранулятора с активными цилиндрическими пресс-валками позволяет сделать вывод о том, что при проектировании нового оборудования необходимо учитывать не только общие закономерности процесса экструдирования, но и конструктивные особенности проектируемого агрегата.

Полученные в данной работе зависимости можно использовать при расчетах как технологических параметров (скоростные режимы гранулирования, производительность агрегата, затраты мощности), так и конструктивных (определения геометрических размеров рабочих органов, определение сечений приводного вала и других передающих органов). Кроме того, рассмотренная схема может быть использована для дальнейших теоретических исследований.

Полученные в данной работе зависимости можно использовать при расчетах как технологических параметров (скоростные режимы гранулирования, производительность агрегата, затраты мощности), так и конструктивных (определения геометрических размеров рабочих органов, определение сечений приводного вала и других передающих органов). Кроме того, рассмотренная схема может быть использована для дальнейших теоретических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Осокин А.В., Севостьянов М.В. Анализ существующих способов и технологических средств для компактирования техногенных материалов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2013. № 7–1. С. 62–66.
2. Осокин А.В., Севостьянов М.В., Гиенко Е.А. и др. Основные направления конструктивно-технологического совершенствования пресс-валковых агрегатов с плоской матрицей для экструдирования волокнистых материалов // Молодой ученый. 2015. № 12 (92). С. 288–294.
3. Севостьянов М.В., Ильина Т.Н., Кузнецова И.А. и др. Ресурсосберегающий технологический комплекс для производства гранулированных стабилизирующих добавок щебеночно-мастичного асфальтобетона // Вестник Тамбовского государственного технического университета. Т. 22. № 2. С. 272–279.
4. Кучинская З.М., Особов В.И., Фрегер Ю.Л. Оборудование для сушки, гранулирования и брикетирования кормов. М.: Агропромиздат, 1988. 208 с.
5. Бать М.И., Джанелидзе Г.Ю., Кельзон А.С. Теоретическая механика в примерах и задачах: в 3 т. 5-е изд., стер. М.: Наука, 1972. Т. 2: Динамика. 624 с.
6. Лойцянский Л.Г., Лурье А.И. Курс теоретической механики: в 2 т. Т. 1: Статика. Кинематика. 2-е изд., испр. М.; Л.: Главная редакция технико-теоретической литературы, 1938. 327 с.
7. Борцев В.Я. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2004. 75 с.
8. Иванов М.Н. Детали машин. 3-е изд., доп. и перераб. М.: Высш. шк., 1976. 399 с.
9. Эрдеди А.А., Медведев Ю.А., Эрдеди Н.А. Техническая механика: Теоретическая механика. Сопротивление материалов. 3-е изд., перераб и доп. М.: Высш. шк., 1991. 304 с.
10. Пат. 2462320 РФ, МПК В 21 В 1/12, В 02 С 4/26, В 30 В 11/22. Способ измельчения лигноцеллюлозы на волокна / В. Наундорф, В. Зитцман, Ш. Штерновский; заяв. и патетообл. АМАНДУС КАЛ ГМБХ ЭНД КОЮ КГ (DE). № 2011104698/02; заявл. 10.07.2009; опубл. 27.09.2012. Бюл. № 27. 17 с.
11. Воронков И.М. Курс теоретической механики. М.; Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1940. 435 с.
12. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. 4-е изд., стер. М.: Наука, 1966. 478 с.
13. Бать М.И., Джанелидзе Г.Ю., Кельзон А.С. Теоретическая механика в примерах и задачах: в 3 т. Т. 1: Статика и кинематика. 4-е изд., стер. М.: Наука, 1967. 512 с.

Поступила в редакцию в ноябре 2016 г.

Об авторе: **Осокин Антон Владиславович** — аспирант кафедры технологических комплексов, машин и механизмов, **Белгородский государственный технический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; ведущий инженер отдела характеристик, **ОАО «Научно-исследовательский институт парашютостроения» (ОАО «НИИ парашютостроения»)**, 107241, г. Москва, ул. Иркутская, д. 2, корп. 1, anton_osokin@xaker.ru.

Для цитирования: *Осокин А.В.* Исследование кинематической схемы плоскоматричного гранулятора с активными цилиндрическими пресс-валками // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 3 (102). С. 317–325. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.3.317-325

REFERENCES

1. Osokin A.V., Sevostyanov M.V. Analiz sushchestvuyushih sposobov i tekhnologicheskikh sredstv dlya kompaktirovaniya tekhnogennykh materialov [Analysis of the Existing Methods and Technological Means for Compacting Manmade Materials]. *Aktualniye problem gumanitarnykh i estestvennykh nauk* [Topical Issues of Humanities and Natural Sciences]. 2013, no. 7, pp. 62–66. (In Russian)

2. Osokin A.V., Sevostyanov M.V., Gienko E.A. et al. Osnovnye napravleniya konstruktivno-tekhnologicheskogo sovershenstvovaniya press-valkovykh agregatov s ploskoy matritsei' [Main Directions of Structural and Technological Improvement of the Press Roll Units with Flat Die]. *Molodoi uchenyi* [Young Scientist]. 2015, no. 12, pp. 288–294. (In Russian)
3. Sevostyanov M.V., Il'ina T.N., Kuznetsova I.A. et al. Resursoberegayushiy tekhnologicheskiy kompleks dlya proizvodstva granulirovannykh stabiliziruyushikh dobavok shebenochno-mastichnogo asfal'tobetona [Resource-Saving Technological Complex for the Production of Granular Stabilizing Additives Crushed Stone-Mastic Asphalt]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Tambov State Technical University]. 2016, vol. 22, no. 2, pp. 272–279. (In Russian)
4. Kuchinkas Z.M., Osobov V.I., Areger Yu.L. *Oborudovaniye dlya sushki, granulirovaniya i briketirovaniya kormov* [The Equipment for Drying, Granulation and Briquetting Feed]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1988, 208 p. (In Russian)
5. Bat' M.I., Dzhanlidze G.Y., Kelzon A.S. *Teoreticheskaya mekhanika v primerakh i zadachakh : v 3 t.* [Theoretical Mechanics in the Examples and Problems]. 5th reprint edition. Moscow, Nauka Publ., 1972, vol. 2 : Dinamika [Dynamics], 624 p. (In Russian)
6. Loitsiansky L.G. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki : v 2 t.* [Course of Theoretical Mechanics: Part I. Statics. Kinematics]. 2nd edition with amendments, Moscow, Leningrad, Glavnaya redaktsiya tekhniko-teoreticheskoi literatury Publ., 1938, vol. 1: Statics. Kinematics, 327 p. (In Russian)
7. Borshev V.Y. *Oborudovanie dlya izmel'cheniya materialov: drobilki i melnitsy* [The Equipment for Crushing Materials Crushers and Mills]. Tambov, Tambov Univ. of TSTU Publ., 2004, 75 p. (In Russian)
8. Ivanov M.N. *Detali mashin* [Detail of Machines: A Textbook for High Schools]. 3rd ed., ext. and rev. Moscow, Higher School Publ., 1976, 399 p. (In Russian)
9. Erdedi A.A. *Tekhnicheskaya mekhanika: Teoreticheskaya mekhanika. Soprotivlenie materialov* [Engineering Mechanics: Theoretical Mechanics. Frictional materials]. 3rd ed., ext. and rev. Moscow, Higher School Publ., 1991, 304 p. (In Russian)
10. Sposob razmel'cheniya lignotsellulozy na volokna [Method of Crushing Lignocellulose to Fibers]: pat. 2462320, MPK B21B 1/12, B02C 4/26, B30B 11/22 / Naundorf V., Zittsmann V., Shternovski Sh.; proprietor(s) Amandus Kal' GMB-Kh und Ko.KG (DE). No. 2011104698/02; convention priority 10.07.09; published on 27/09/12, bull. no. 27, 17 p. (In Russian)
11. Voronkov I.M. *Kurs teoreticheskoi mekhaniki* [Course of Theoretical Mechanics]. Moscow, Leningrad, Gosudarstvennoe izdatelstvo tekhniko-teoreticheskoi literatury Publ., 1940, 435 p. (In Russian)
12. Targ S.M. *Kratkii kurs teoreticheskoi mekhaniki* [Short Course of Theoretical Mechanics]. 4th ed. reprint. Moscow, Nauka Publ., 1966, 478 p. (In Russian)
13. Bat' M.I. *Teoreticheskaya mekhanika v primerakh i zadachakh : v 3 t.* [Theoretical Mechanics in the Examples and Problems]. 5th reprint edition. Moscow, Nauka Publ., 1967, vol. 1: Statika i kinematika [Statics and Kinematics], 512 p. (In Russian)

Received in November, 2016.

About the author: **Osokin Anton Vladislavovich** — graduate student of "Technological complexes, machines and mechanisms", **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU)** 46 Kostyukova str., Belgorod, Russian Federation; Leading, **Engineer of the Research Institute of parachute characteristics (AO "NII parashyutostroyeniya")**, 2/1 Irkutskaya str., Moscow, 107241, Moscow, Russian Federation, anton_osokin@xaker.ru.

For citation: Osokin A.V. Issledovanie kinematicheskoy skhemy ploskomatrichnogo granulyatora s aktivnymi tsilindricheskimi press-valkami [Study of the Flat Die Pellet Mills Kinematic Diagram with Active Cylindrical Press Rolls]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 3 (102), pp. 317–325. (In Russian) DOI: 10.22227/1997-0935.2017.3.317-324