

УДК 669.162.12:622

ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЗАРОДЫША СЛОЖНОЙ ФОРМЫ НА ТАРЕЛЬЧАТОМ ОКОМКОВАТЕЛЕ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ

*Павловец В.М., к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики
и экологии (pavlowets.victor@yandex.ru)*

*Герасимук А.В., аспирант кафедры электротехники, электропривода и
промышленной электроники (heavymetal7200@gmail.com)*

Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Новокузнецк, Кемеровская обл., ул. Кирова, 42)

Аннотация. Рассмотрены особенности движения зародыша сложной формы на тарельчатом окомкователе в производстве железорудных окатышей. В результате проведенного анализ сил, действующих на кубический зародыш при его перекате на шихтовом гарнисаже (ШГ) в условиях пластической деформации, построена математическая модель, позволяющая определить оптимальные параметры работы окомкователя для производства окатышей по технологии принудительного зародышеобразования. Рассмотрены два частных случая устойчивости зародыша на ШГ окомкователя и условия преодоления устойчивости, связанные с формированием переката. Устойчивость зародыша или, напротив, его перекат определяются горизонтальным положением его центра массы относительно опорного ребра, расположенного поперек вероятного направления переката. Если линия действующей силы (силы тяжести) переместится за опорное ребро и опорную плоскость, то сформируется момент силы, который выведет зародыш из состояния устойчивости и сформирует перекат зародыша. Первым частным случаем устойчивости зародыша на наклонной плоскости является отсутствие переката на ШГ при минимальной величине центробежной силы, что соответствует расположению зародыша в центральных областях зоны окомкователя, или работе рабочего органа с низкой частотой вращения ($n < 3$ об/мин). Более общим случаем выхода зародыша из состояния устойчивости в режим переката на наклонной плоскости ШГ является работа окомкователя при сравнительно высокой величине центробежной силы ($n > 3$ об/мин) и расположение зародыша в периферийных областях рабочей зоны окомкователя. Для указанных случаев сформулированы условия переката зародышей на ШГ в рабочей зоне окомкователя и корректирующие мероприятия в условиях пластической деформации при смятии его углов и ребер. Показаны особенности движения зародыша в рабочей зоне тарели окомкователя. Отмечены условия для корректировки режима принудительного зародышеобразования и озвучены мероприятия по целенаправленному воздействию на коэффициент смятия зародыша. Установлено, что для организации режима переката зародыша сложной формы угол наклона тарели окомкователя к горизонту следует назначать в зависимости от частоты его вращения и коэффициента смятия зародышей.

Ключевые слова: зародыш сложной формы, коэффициент смятия зародыша, перекат зародышей, тарельчатый окомкователь, шихтовый гарнисаж, принудительное зародышеобразование, напыление влажной шихты, железорудные окатыши.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-2-87-95

Производство железорудных окатышей в ряде стран с развитой металлургической промышленностью является основным направлением в технике подготовки сырья к доменной плавке и металлизации [1 – 4]. Причем значительная доля тонкодисперсного концентрата и вторичного техногенного сырья в производстве окатышей комплектуется в тарельчатых окомкователях [1, 2]. В последнее время этот тип окомкователя предложено использовать в промышленности для окомкования аглошихты [5, 6]. Результаты исследований и выводы, приведенные в этих источниках, свидетельствуют о повышении качества окомкованного продукта в тарельчатых окомкователях и увеличении производительности агломашинов. Резервные возможности окомковательного оборудования для получения окатышей предложено использовать в технологии принудительного зародышеобразования [1, 2].

Получение сырых окатышей по этой технологии включает две основные стадии: формирование зароды-

шей сложной формы, близкой к кубической, в холостой зоне тарели и создание оболочки окатышей путем их доокомкования в рабочей зоне окомкователя в режиме переката [7, 8].

Принудительное зародышеобразование основано на технике напыления влажной шихты сжатым воздухом на шихтовый гарнисаж (ШГ) с получением плотного слоя шихты, который механическим путем принудительно делится на мерные зародышевые фрагменты. Эта технология экспериментально опробована в лабораторных условиях на окомкователях малого диаметра (0,6 и 1,0 м) и, в отличие от известной технологии, позволяет получать окатыши с дифференцированным распределением пористости по их сечению с более высокой долей открытых пор [9]. В процессе принудительного зародышеобразования происходит удаление влаги, способное снизить влажность окатышей после окомкования на 0,5 – 2,5 %, а окомкователь может рабо-

тать с более высокой удельной производительностью. Для организации режима переката зародышей сложной формы и формирования окатышей на промышленном окомкователе необходимо задать соответствующий угол наклона тарели к горизонту и ее частоту вращения в зависимости от степени деформации зародыша [2]. Для этого требуется проанализировать характер силового воздействия на зародыш сложной формы в режиме переката со стороны сил, формирующихся вращающейся тарелью окомкователя.

Целью настоящей работы является анализ сил, действующих на кубический зародыш при его перекате на шихтовом гарнисаже в условиях его пластической деформации, и определение рабочих параметров работы окомкователя.

Для анализа сил, действующих на кубический зародыш при его перекате, условно приняли, что смятие углов и граней зародыша не сопровождается изменением его массы и центра тяжести, а действием силы трения на ШГ пренебрегли вследствие ее малой величины по сравнению силами, вызывающими перекат. В расчете не учитывали ударное взаимодействие зародышей между собой в слое, которое в общем случае может как препятствовать, так и способствовать перекату, и которое достаточно трудно учесть в расчете. Предполагали, что плоскость ШГ является абсолютно ровной и не деформируется в ходе переката от соударений с зародышами.

Частным случаем устойчивости зародыша на наклонной плоскости является отсутствие переката на

ШГ при минимальной величине центробежной силы, что соответствует расположению зародыша в центральных областях зоны окомкователя или работе рабочего органа с низкой частотой вращения ($n < 3$ об/мин) (рис. 1). В этом случае устойчивость зародыша или, напротив, его перекат определяются горизонтальным положением его центра массы (Ц) относительно опорного ребра OO_1 , расположенного поперек вероятного направления переката (рис. 1). Если линия действующей силы (в данном случае силы тяжести) переместится за опорное ребро OO_1 , то сформируется момент силы, который выведет зародыш из состояния устойчивости и сформирует его перекат. Это также справедливо в отношении зародыша со смятыми (деформированными) углами и ребрами (рис. 1, б) и в отношении зародыша, на котором при перекате частично сформирована оболочка окатыша (рис. 1, в). Положение устойчивости характеризуется углом переката γ_k , составленным из перпендикуляра на опорную плоскость ШГ и линии действующей силы. Графически этот угол можно зафиксировать при $\gamma = \gamma_k$. Выход из состояния устойчивости и формирование переката происходят при $\gamma > \gamma_k$. Для этих условий у зародыша правильной кубической формы угол переката превышает 45° (рис. 1, а).

Для зародыша с частично смятыми углами и ребрами угол переката зависит от степени его деформации, которую определяли по коэффициенту смятия (деформации) зародыша $K_{см}$, вычисляемого по выражению

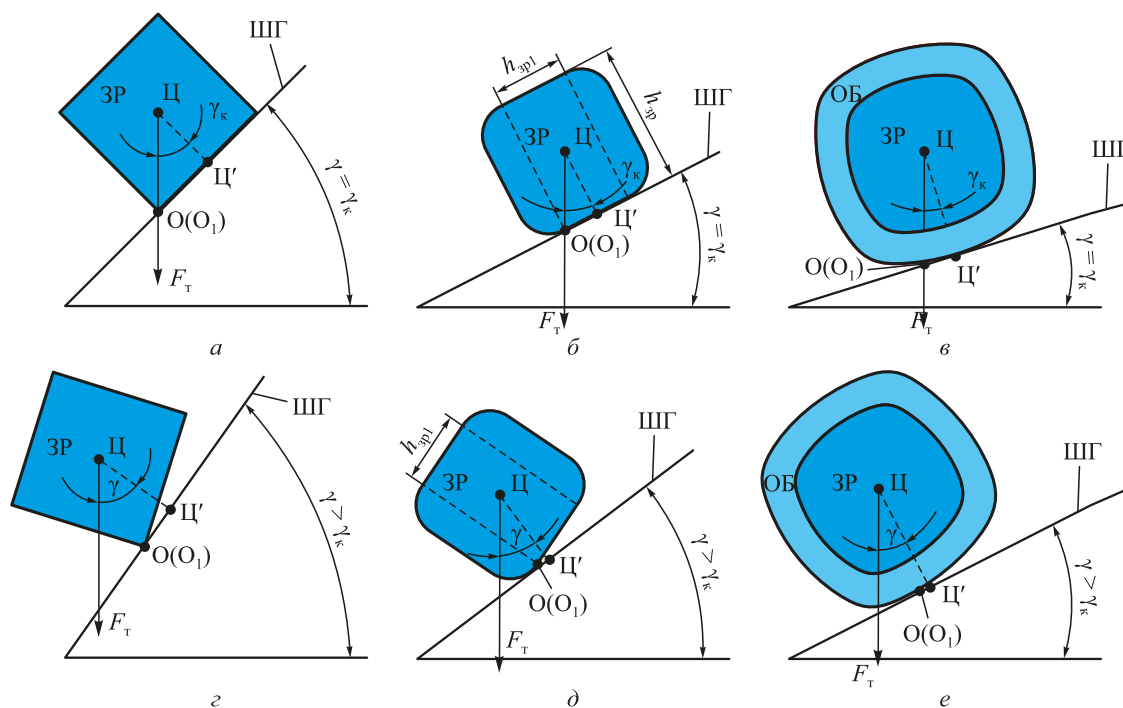


Рис. 1. Схемы, иллюстрирующие устойчивость (а – в) зародыша и режим переката (з – е) на шахтный гарнисаж. Зародыши: а, з – правильной кубической формы; б, д – с частично смятыми углами и ребрами; в, е – с полностью смятыми углами и ребрами

Fig. 1. Diagrams of the germ stability (а – в) and of the roll regime (з – е) in the CS; germs: а, з – with regular cubic form; б, д – with partially crushed corners and edges; в, е – with completely crushed corners and edges

$$K_{\text{см}} = \frac{h_{\text{зр1}}}{h_{\text{зр}}}, \quad (1)$$

где $h_{\text{зр}}$ – размер ребра несмятого зародыша правильной кубической формы, м; $h_{\text{зр1}}$ – размер ребра зародыша с частично смятыми углами и гранями, м (рис. 1).

Численное значение $K_{\text{см}}$ может варьироваться от единицы у несмятого зародыша кубической формы до нуля у зародыша с полностью смятыми углами и ребрами, на которые одновременно накатывается влажная шихта. В процессе переката его плоские стороны округляются и становятся выпуклыми. В конце технологии окомкования форма окатыша приближается к форме шара (рис. 1, в).

Угол переката зародыша с частично смятыми углами и ребрами может быть определен в состоянии устойчивости зародыша на ШГ геометрическими построениями из треугольника ЦЦ'О (рис. 1, б) как арктангенс отношения его сторон:

$$\gamma_{\text{к}} = \arctg\left(\frac{h_{\text{зр1}}}{h_{\text{зр}}}\right) = \arctg(K_{\text{см}}). \quad (2)$$

Для рассматриваемого частного случая величины углов переката $\gamma_{\text{к}}$ для коэффициентов $K_{\text{см}}$, равных 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0, соответственно равны 0; 14°; 26,6°; 36,9°; 45°.

Более общим случаем выхода зародыша из состояния устойчивости в режим переката на наклонной плоскости ШГ является работа окомкователя при сравнительно высокой центробежной силе ($n > 3$ об/мин) и расположении зародыша в периферийных областях рабочей зоны окомкователя (квадранты I и II) (рис. 2).

Устойчивость зародыша на вращающемся ШГ определяется балансом моментов сил, вызывающих перекал, и сил, препятствующих перекалу. Баланс моментов этих сил представляет собой равенство [10 – 12]:

$$M_{\Sigma} = M_{\Sigma 0}, \quad (3)$$

где M_{Σ} и $M_{\Sigma 0}$ – моменты сил, вызывающих перекал зародыша и препятствующих его перекалу, Н·м.

Для того, чтобы произошел выход зародыша из состояния устойчивости в режим переката, необходимо выполнить условие [13, 14]

$$M_{\Sigma} > M_{\Sigma 0}. \quad (4)$$

К силам, вызывающим перекал зародыша через опорное ребро $ОО_1$, относятся: сила $F_{\text{ты}}$, являющаяся проекцией силы тяжести на ось $Y(R)$, и центробежная сила $F_{\text{ц}}$. К силе, препятствующей перекалу зародыша через опорное ребро $ОО_1$, относится сила $F_{\text{тз}}$, которая является проекцией силы тяжести на ось Z и ориентирована перпендикулярно ШГ и силам $F_{\text{ц}}$ и $F_{\text{ты}}$. Центробежная сила способствует перекалу зародыша в квад-

ранте I и препятствует перекалу в квадранте II, так как ее проекция на ось $Y(R)$ в этом квадранте противонаправлена силе $F_{\text{ты}}$.

Момент сил, вызывающих перекал зародыша через опорное ребро, описывается уравнением

$$M_{\Sigma} = 0,5 h_{\text{зр}} F_{\Sigma}. \quad (5)$$

где F_{Σ} – суммарная сила, вызывающая перекал зародыша, Н.

Для этого момента суммарной силы плечом является расстояние $0,5 h_{\text{зр}}$.

Момент силы $F_{\text{тз}}$, препятствующей перекалу зародыша, описывается уравнением

$$M_{\text{тз}} = 0,5 K_{\text{см}} h_{\text{зр}} F_{\text{тз}}. \quad (6)$$

Для этого момента силы плечом является расстояние $0,5 K_{\text{см}} h_{\text{зр}}$.

Силы, влияющие на устойчивость и перекал зародыша, определяются по выражениям

$$F_{\text{ты}} = mg \sin \gamma_{\text{к}}; \quad (7)$$

$$F_{\text{ц}} = m \omega^2 R = m \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 R; \quad (8)$$

$$F_{\text{тз}} = mg \cos \gamma_{\text{к}}, \quad (9)$$

где m – масса зародыша, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; ω – угловая частота вращения, рад/с; n – частота вращения тарели окомкователя, об/мин.

Суммарная сила F_{Σ} формируется как результирующая между проекцией силы тяжести $F_{\text{ты}}$ и центробежной силой $F_{\text{ц}}$. Она определяется по известному выражению [10, 15]

$$F_{\Sigma} = \left[m^2 g^2 \sin^2 \gamma_{\text{к}} + m^2 \omega^4 R^2 + 2 m^2 \omega^2 R g \sin^2 \gamma_{\text{к}} \cos \theta \right]^{0,5}, \quad (10)$$

где θ – угол между силами $F_{\text{ц}}$ и $F_{\text{ты}}$.

С помощью угла θ определяются положение зародыша на ШГ и область рабочей зоны окомкователя в квадрантах I и II до того момента, когда начинается перекал зародыша. При движении зародыша в этой зоне от точки 1 к точке 2, в которой происходит его перекал, угол θ увеличивается от нуля до 180° (рис. 2).

Равенство (3) с учетом выражений (5) – (10) примет вид

$$0,5 h_{\text{зр}} \left[(m \omega^2 R)^2 + (mg \sin \gamma_{\text{к}})^2 + 2 m^2 \omega^2 R g \cos \theta \right]^{0,5} = 0,5 K_{\text{см}} h_{\text{зр}} mg \cos \gamma_{\text{к}}. \quad (11)$$

Решая уравнение (11), получим выражение для нахождения угла переката $\gamma_{\text{к}}$:

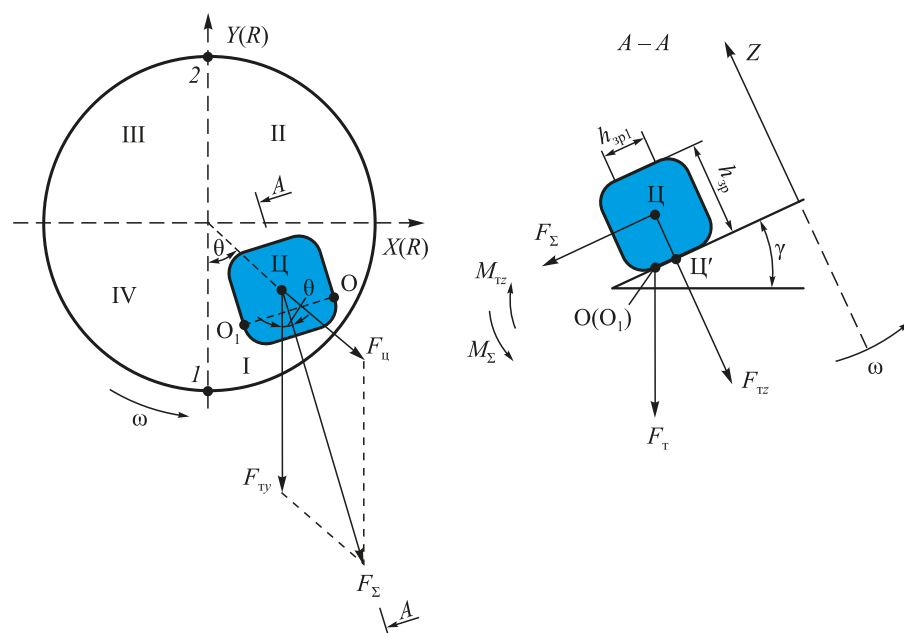


Рис. 2. Схема сил и моментов сил, действующих на зародыш, расположенный на тарели окомкователя до начала переката

Fig. 2. Scheme of forces and moments of forces acting on the germ located on the pelletizer disk before the beginning of the roll

$$\gamma_k = -\arcsin \left[\omega^2 R \cos \theta - \left(\omega^4 R^2 \cos^2 \theta - K_{cm}^2 \omega^4 R^2 - \omega^4 R^2 + \frac{K_{cm}^2 g^2 (1 + K_{cm}^2)^{0.5}}{(1 + K_{cm}^2) g} \right) \right]. \quad (12)$$

Задавая угол θ в этом уравнении от нуля до 180° и соответственно область ШГ рабочей зоны окомкователя в квадрантах I и II, можно вычислить значение угла γ_k , превысив которое можно осуществить перекал зародыша на ШГ.

Анализируя формулу (10), можно отметить, что суммарная сила представляет собой периодическую функцию угла поворота θ и может иметь как знакопеременный (при $F_{ty} < F_{tu}$, рис. 3, а), так и пульсирующий характер (при $F_{ty} \geq F_{tu}$, рис. 3, б).

Можно заключить, что при угле $\theta = 0 \div 90^\circ$ (квадрант I) условия для перекала зародыша по ШГ наиболее благоприятные, так как сила тяжести F_{ty} и центробежная сила F_{tu} направлены под острым углом друг к другу, в результате чего уменьшается значение результирующей силы. В квадранте II при $\theta = 90 - 180^\circ$ указанные силы располагаются под тупым углом, тем самым уменьшают результирующую силу. Поэтому для расчетов угла

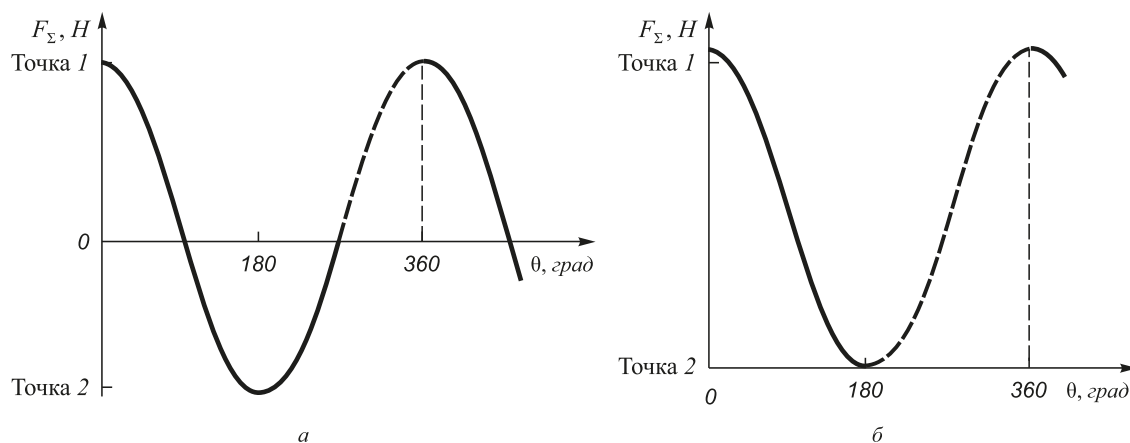


Рис. 3. Зависимости суммарной силы F_z от угла θ . Штриховая линия соответствует углам поворота тарели, при которых зародыш не может находиться в квадрантах I и II

Fig. 3. Dependences of the total force F_z on the angle θ . The dashed line corresponds to the rotation angles of the plate at which the germ cannot be in the quadrants I and II

переката γ_k была выбрана точка 2 с углом $\theta = 180^\circ$, в которой реализуются наименее благоприятные условия для переката, так как в ней силы $F_{\text{тг}}$ и $F_{\text{ц}}$ направлены диаметрально противоположно друг другу и суммарная сила F_{Σ} имеет минимальное значение. Дополнительным условием для выбора угла $\theta = 180^\circ$ (точка 2) явились требования технологии [16 – 19], согласно которым комкуемый материал должен полностью занимать площадь рабочей зоны тарели, вследствие чего перекат зародышей должен быть реализован в верхней точке вертикального диаметра тарели. Результаты расчетов представлены в виде безразмерного комплекса N , составленного из отношения рассчитанного угла γ_k и угла γ , заданного в технологическом процессе:

$$N = \frac{\gamma_k}{\gamma}.$$

Результаты расчетов представлены на рис. 4 – 7. Безразмерный комплекс N позволяет в зависимости от коэффициента смятия и частоты вращения тарели окомкователя прогнозировать условия переката зародыша на ШГ и назначить соответствующий угол γ наклона днища тарели к горизонту. Зависимость $N = f(K_{\text{см}})$ (рис. 4) показывает, что перекат зародыша по ШГ возможен при $N < 1$. Видно, что с увеличени-

ем угла наклона тарели γ свыше 45° параметр N резко снижается, и область возможного переката зародышей расширяется. При $N > 1$ перекат зародыша по ШГ невозможен, поскольку процесс переката несмятого зародыша ($K_{\text{см}} = 1,0$) протекает при $N < 1$, то угол γ для $n = 3$ об/мин должен быть не менее 45° (рис. 4, а). С увеличением параметра n значение угла γ должно быть скорректировано в сторону увеличения. В частности, для $n = 12$ об/мин угол γ должен быть более 55° (рис. 4, з). Результаты расчетов показывают, что принудительно изменяемый коэффициент смятия зародышей может быть фактором, влияющим на рабочие параметры окомкователя. Установлено (рис. 4), что с уменьшением коэффициента смятия зародыша и приближения его формы к сферической область переката по величине угла γ_k расширяется, а перекат возможен при меньших углах γ наклона тарели к горизонту. Это характерно для зародышей даже с малым коэффициентом смятия ($K_{\text{см}} = 0,7$), у которых угол γ может быть уменьшен с 45 до 35° ($n = 3$ об/мин).

В процессе сфероидизации зародыша параметры $K_{\text{см}}$ и γ_k изменяются довольно существенно, а назначаемый угол γ естественно остается неизменным в течение всего технологического процесса. Это значит, что траектория движения зародыша меняется, и он пе-

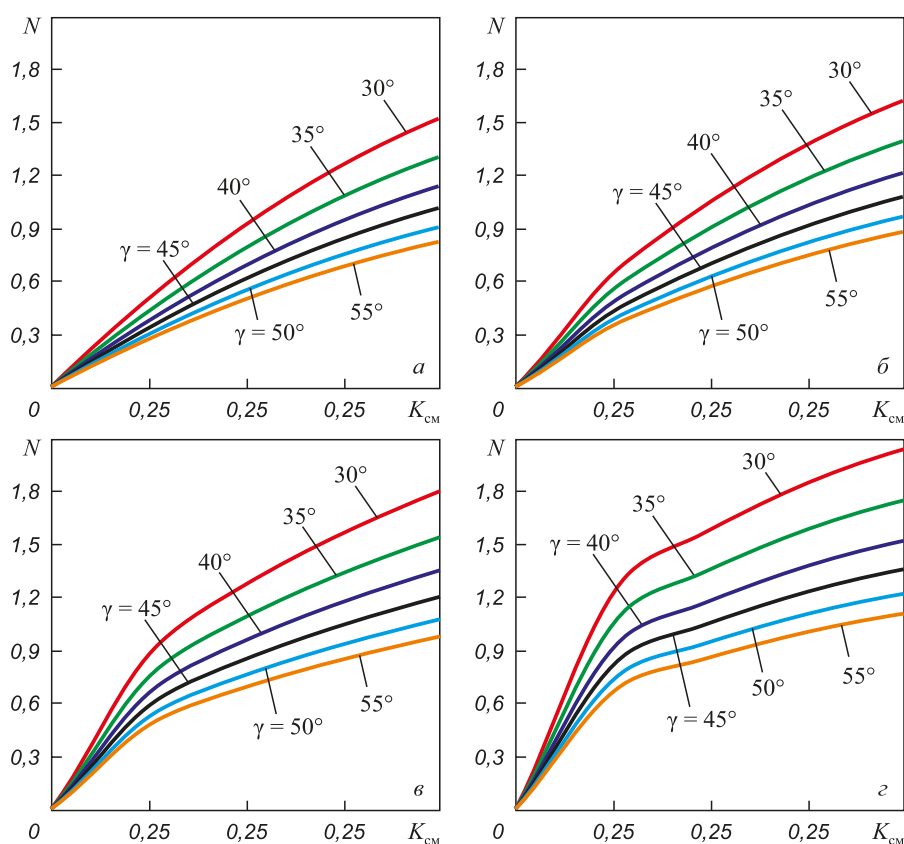


Рис. 4. Зависимость параметра N от коэффициента смятия зародыша $K_{\text{см}}$ и угла наклона тарели γ при частотах вращения n , об/мин, равных 3 (а), 6 (б), 9 (в) и 12 (з)

Fig. 4. Dependence of the parameter N on the germ crushing factor $K_{\text{см}}$ and the angle of disk inclination γ at the rotation frequencies n , rpm, equaling to 3 (а), 6 (б), 9 (в) and 12 (з)

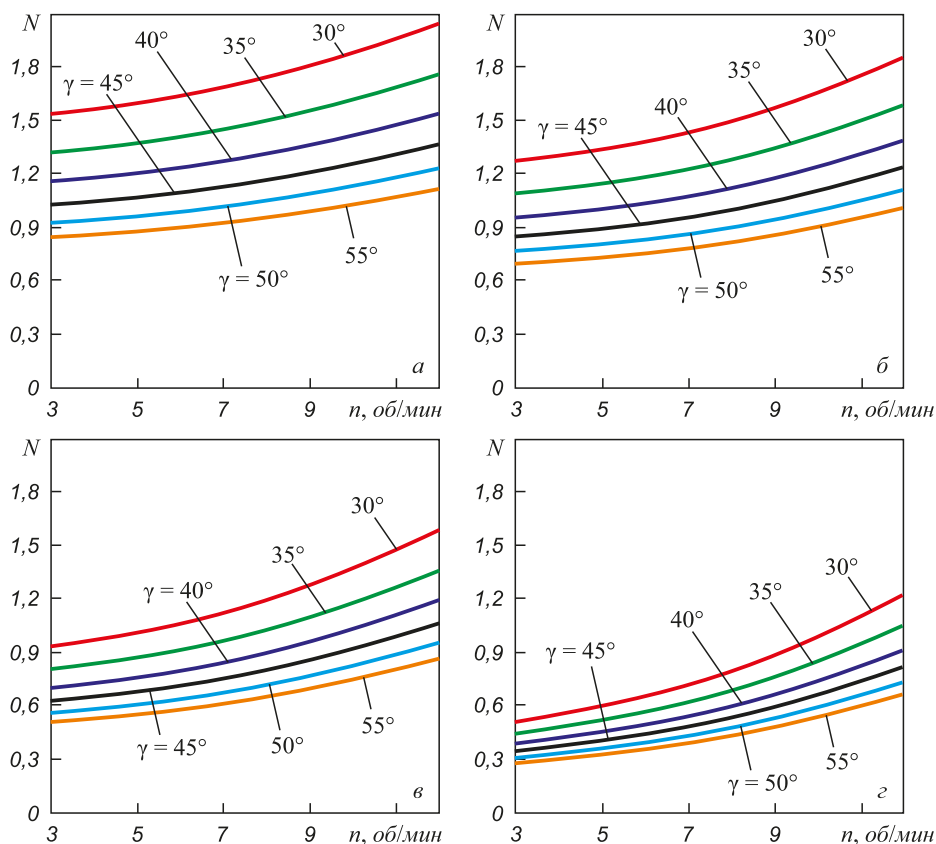


Рис. 5. Зависимость параметра N от частоты вращения n и угла γ при коэффициентах $K_{см}$, равных 1,0 (а); 0,75 (б); 0,5 (в) и 0,25 (г)

Fig. 5. Dependence of the parameter N on the rotation frequency n and the angle γ for the factors $K_{см}$, equaling to 1.0 (а); 0.75 (б); 0.5 (в) and 0.25 (г)

ремещается из квадранта II в квадрант I, что реально происходит на практике [1, 2]. Следует подчеркнуть, что значения $K_{см}$ и γ_k могут измениться на стадии зародышеобразования в холостой зоне тарели окомкователя, о чем свидетельствуют экспериментальные данные [2]. В частности, на этой стадии можно организовать предварительное смятие углов и ребер зародышей механическим путем, что приведет к изменению коэффициента $K_{см}$, значение которого можно вычислить, проведя физический эксперимент. Рассчитанное значение угла γ_k для стадии переката и роста массы зародышей в рабочей зоне окомкователя потребует корректировки угла γ и частоты вращения тарели окомкователя.

С увеличением частоты вращения тарели окомкователя область стабильного переката зародышей ($N < 1$) существенно снижается (рис. 5). Вернуть процесс переката в его стабильную зону возможно с увеличением угла наклона тарели свыше 45°. Заметим, что на производстве это наиболее мобильный параметр воздействия на технологический процесс.

С ростом угла наклона тарели окомкователя γ параметр N уменьшается, и зона стабильного переката зародышей расширяется (рис. 6). Данные этого рисунка дополняют ранее полученные выводы о том, что с ростом частоты вращения тарели параметры N и γ_k увеличива-

ются. Для того, чтобы скорректировать режим переката ($N < 1$), используя полученные данные, необходимо с ростом угла γ на каждые 5° (при условии $\gamma_k < \gamma$) частоту вращения тарели окомкователя увеличивать примерно на 3 об/мин. Следует заметить, что режим зародышеобразования в цикле: напыление шихты на ШГ с получением плотного напыленного слоя – деление слоя на зародыши – деформация зародышей, также должен быть скорректирован, поскольку все процессы протекают на одном вращающемся днище тарели одновременно. Коррекция напыления может быть проведена достаточно оперативно с помощью таких параметров, как угол атаки ВШС, расстояние до напыленного слоя и др. [2]. В ряде источников [20 – 22] коррекцию напыления наряду с указанными параметрами предложено осуществлять с помощью кинематических параметров, включающих траекторию и скорость перемещения напыляющего устройства, регулирование расхода дисперсной фазы за счет изменения скорости вращения шнекового питателя и др.

При перемещении зародыша от точки 1 к точке 2 (на рис. 7 угол θ меняется от 30 до 180°) расчетный угол переката γ_k увеличивается с разной интенсивностью при работе тарели окомкователя на различных частотах вращения. Это значит, что для соблюдения условия $N < 1$ следует одновременно увеличивать и угол γ , что

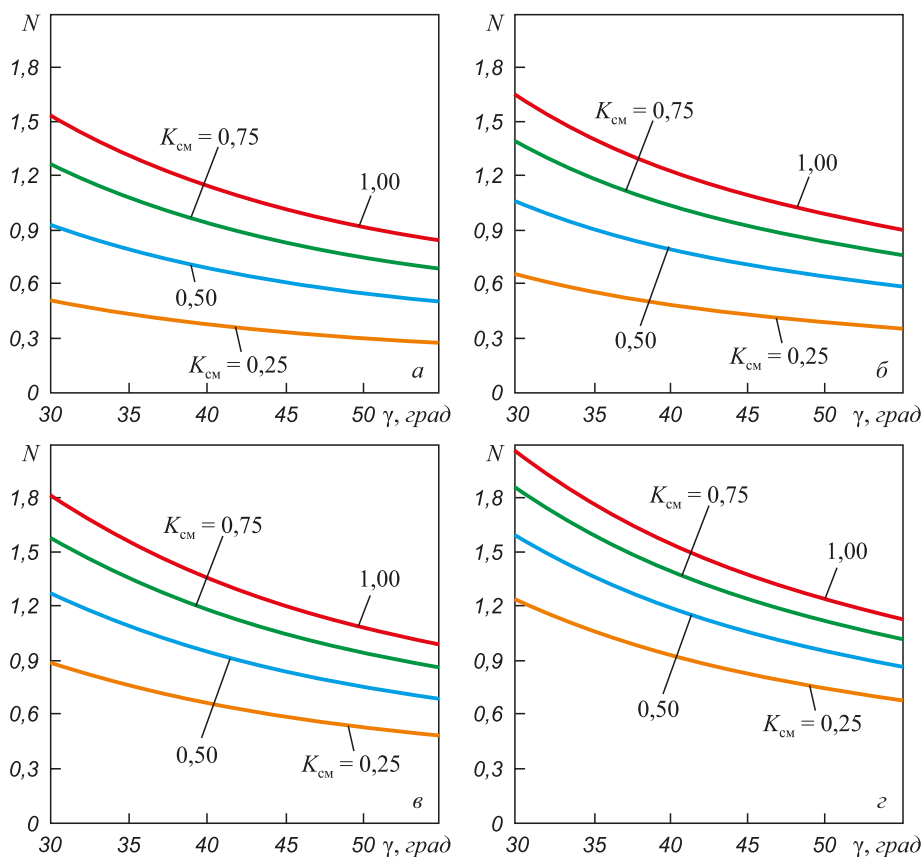


Рис. 6. Зависимость параметра N от угла γ и коэффициента K_{cm} при частотах вращения тарелки n , об/мин, равных 3,0 (а), 6 (б), 9 (в) и 12 (г)

Fig. 6. Dependence of the parameter N on the angle γ and the factor K_{cm} at the rotation frequencies of the plates n , rpm, equaling to 3 (a), 6 (б), 9 (в) and 12 (г)

физически сделать невозможно. В этом случае следует подобрать такую частоту вращения тарелки окомкователя, при которой угол переката γ_k изменялся бы в наиболее узких пределах. Результаты расчетов показывают, что это возможно реализовать на тарелках, работающих с низкой частотой вращения. В частности, для частоты вращения $n = 3$ об/мин ($K_{cm} = 1,0$) угол γ_k меняется в наиболее узком интервале значений ($\gamma_k = 44 - 46^\circ$). Это позволяет на практике сделать соответствующую корректировку угла γ при условии $N < 1$.

Выводы. В результате проведенного анализ сил, действующих на кубический зародыш при его перекате на ШГ в условиях пластической деформации, построена математическая модель, позволяющая определить оптимальные параметры работы окомкователя для производства окатышей по технологии принудительного зародышеобразования. Сформулированы условия переката зародышей на ШГ в рабочей зоне окомкователя и корректирующие мероприятия в условиях пластической деформации при смятии его углов и ребер. Показаны особенности движения зародыша в рабочей зоне тарелки окомкователя. Отмечены условия для корректировки режима принудительного зародышеобразования и мероприятия по целенаправленному воздействию на коэффициент смятия зародыша.

Установлено, что для организации режима переката зародыша сложной формы угол наклона тарелки окомкователя к горизонту следует назначать в зависимости от частоты его вращения и коэффициента смятия зародышей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павловец В.М. Окатыши в технологии экстракции металлов из руд: Учебн. пособие. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2014. – 345 с.
2. Павловец В.М. Расширение функциональных возможностей агрегатов для подготовки железорудного сырья к металлургической плавке. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2016. – 373 с.
3. Frantes K. North American Iron Mines Running Flat Out to Meet Domestic and Worldwide Demand // Skillings' Mining Review. 2005. Vol. 94. No. 7. Pp. 6 – 21.
4. BASICS IN MINERAL PROCESSING: Metso Corporation, 2015. – 752 p.
5. Chikashi Kamijo, Masaki Hara, Takazo Kawaguchi et al. Sinter feed granulation improvement technique by pan pelletizer // Zairyo to Prosesu = CAMP ISIJ. 2010. Vol. 23. No. 1. P. 5.
6. Kei Watanabe, Masahide Yasukawa, Chikashi Kamisaka et al. Improvement of productivity by installing P-type separate granulation process at Wakayama no. 5 sintering plant // Zairyo to Prosesu = CAMP ISIJ. 2010. Vol. 23. No. 1. P. 6.
7. Павловец В.М. Исследование процесса получения влажных окатышей с использованием принудительного зародышеобразования // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 6. С. 15 – 20.

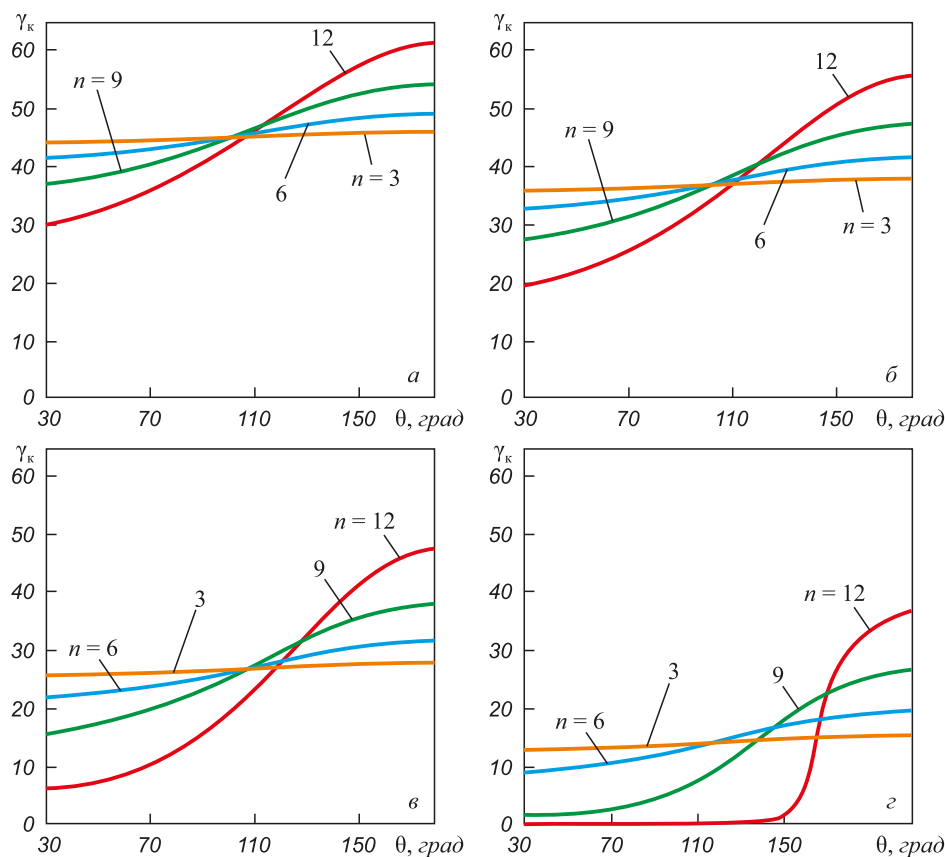


Рис. 7. Зависимость угла переката γ_k от угла θ и частоты вращения тарели окомкователя n при коэффициентах K_{cm} , равных 1,0 (а); 0,75 (б); 0,5 (в) и 0,25 (г)

Fig. 7. Dependence of the roll angle γ_k on the angle θ and rotation frequency of the disc pelletizer at coefficients K_{cm} , equaling to 1.0 (a); 0.75 (б); 0.5 (в) and 0.25 (г)

8. Павловец В.М. Развитие принципов принудительного зародышеобразования в процессе получения железорудных окатышей // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 10. С. 15 – 22.
9. Павловец В.М. Формирование структуры железорудных окатышей, полученных с использованием теплосилового напыления влажной шихты // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. № 12. С. 857 – 863.
10. Яблонский А.А., Никифорова В.М. Курс теоретической механики. Ч. 1. – М.: Высшая школа, 1966. – 429 с.
11. Sunil Golwala. Lecture Notes on Classical Mechanics for Physics 106ab. Publisher: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014. – 396 p.
12. John R. Taylor. Classical mechanics. – Publisher: University Science Books, 2005. – 786 p.
13. James L., Meriam L., Kraige G. Engineering Mechanics. Vol. 1. Statics. Wiley; 7 edition, 2011. – 544 p.
14. James L., Meriam L., Kraige G. Engineering Mechanics. Vol. 2. Dynamics. Wiley; 7 edition, 2012. – 752 p.
15. Демидович Б.П., Кудрявцев В.А. Краткий курс высшей математики. Учебное пособие для вузов. – М.: Астрель; АСТ, 2001. – 656 с.
16. Интенсификация производства и улучшение качества окатышей / Ю.С. Юсфин, Н.Ф. Пашков, П.К. Антоненко, Р.М. Жак. – М.: Металлургия, 1994. – 240 с.
17. Ручкин И.Е. Производство железорудных окатышей. – М.: Металлургия, 1976. – 184 с.
18. Маерчак Ш. Производство окатышей. – М.: Металлургия, 1982. – 232 с.
19. Коротич В.И. Теоретические основы окомкования железорудных материалов. – М.: Металлургия, 1966. – 152 с.
20. Goijen J.G., Miller R.A., Brindley W.J., Leissler G.W. A simulation technique for predicting defects of thermal sprayed coatings: NASA Technical Memorandum TM-106939, 1995.
21. Hansbo A. and Nylén P. Models for the simulation of spray deposition and robot motion optimization in thermal spraying of rotating objects // Surface Coatings Technol. 1999 Vol. 122. Pp. 191 – 201.
22. Ensz M.T., Griffith M.L., Reckaway D.E. Critical issues for functionally graded material deposition by laser engineered net shaping. <http://edge.cs.drexel.edu/GICL/people/schroeder/references/mpif02me.pdf>

Поступила 17 февраля 2017 г.

MOVEMENT SPECIFICS OF A GERM WITH COMPLEX SHAPE ON THE PELLETIZING DISK IN IRON-ORE PELLETS PRODUCTION

V.M. Pavlovets, A.V. Gerasimuk

Siberian State Industrial University, Russia, Novokuznetsk

Abstract. The movement specifics of a germ with complex shape on the pelletizing disk in production of iron-ore pellets are considered. As a result of the analysis of the forces acting on the cubic germ during its roll on the charge skull (CS) in the conditions of plastic deformation, a mathematical model was built that allows the optimal parameters of the pelletizer to be determined for the production of pellets based on the technology of a forced germ formation. Two particular cases of germ stability on the pelletizer CS and the conditions for the overcoming of the stability associated with the formation of a roll are considered. The germ stability, or conversely, its roll is determined by the horizontal position of its mass center relative to the support edge located across the probable direction of the roll. If the line of the acting force (gravity force) moves behind the support edge and the reference plane, a force moment will be generated which will lead the germ out of the stability state and form a germ roll. The first special case of germ stability on the inclined plane is the absence of a roll on the CS with a minimum value of the centrifugal force corresponding to the location of the germ in the central areas of the pelletizing zone or to operation of a working element with a low rotation speed ($n < 3$ rpm). A more general case of the transition of the germ from the state of stability into the roll regime on the inclined plane of CS is the work of the pelletizer when centrifugal force is relatively high ($n > 3$ rpm) and location of the germ in peripheral areas of the working zone of the pelletizer. For these cases the conditions for germs roll on the CS in the pelletizer working zone and correcting measures in the conditions of plastic deformation during the corners and edges crushing are formulated. The features of the germ movement in the working zone of the pelletizing disk are shown. The conditions for correcting the regime of forced germ formation are provided, and the measures are indicated for the purposeful impact on the crushing factor of a germ. It was established that for the organization of the regime of a germ roll with complex shape the angle of disk inclination to the horizon should be set depending on the frequency of its rotation and the crushing factor of germs.

Keywords: germ with complex shape, germ crushing factor, germ roll, pelletizer, charge skull, forced germ formation, spraying of wet charge, iron-ore pellets.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-2-87-95

REFERENCES

1. Pavlovets V.M. *Okatyshi v tekhnologii ekstratsii metallov iz rud: uchebn. posobie* [Pellets in the technology of metals extraction from ores: Manual]. Novokuznetsk: SibGIU, 2014, 345 p. (In Russ.).
2. Pavlovets V.M. *Rasshirenie funktsional'nykh vozmozhnostei agregatov dlya podgotovki zhelezorudnogo syr'ya k metallurgicheskoi plavke* [Expansion of functional capabilities of aggregates for the preparation of iron-ore raw materials for metallurgical smelting]. Novokuznetsk: SibGIU, 2016, 373 p. (In Russ.).
3. Frantes K. North American iron mines running flat out to meet domestic and worldwide demand. *Skilling's Mining Review*. 2005, vol. 94, no. 7, pp. 6–21.
4. *Basics in mineral processing: Metso Corporation*. 2015, 752 p.
5. Chikashi Kamijo, Masaki Hara, Takazo Kawaguchi etc. Sinter feed granulation improvement technique by pan pelletizer. *Zairyo to Prosesu = CAMP ISIJ*. 2010, vol. 23, no. 1, pp. 5.
6. Kei Watanabe, Masahide Yasukawa, Chikashi Kamisaka etc. Improvement of productivity by installing P-type separate granulation process at Wakayama no. 5 sintering plant. *Zairyo to Prosesu = CAMP ISIJ*. 2010, vol. 23, no. 1, pp. 6.
7. Pavlovets V.M. Moisture-laden pellets production with forced nucleation process. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 6, pp. 15–20. (In Russ.).
8. Pavlovets V.M. Development of principles of forced nucleation in the production process of iron ore pellets. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 10, pp. 15–22. (In Russ.).
9. Pavlovets V.M. Formation of the structure of iron ore pellets produced using heat-spraying of wet charge. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, no. 12, pp. 857–863. (In Russ.).
10. Yablonskii A.A., Nikiforova V.M. *Kurs teoreticheskoi mekhaniki. Ch. I* [Course of theoretical mechanics. Part I]. Moscow: Vysshaya shkola, 1966, 429 p. (In Russ.).
11. Sunil Golwala. *Lecture notes on classical mechanics for physics 106ab*. Publisher: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014, 396 p.
12. John R. Taylor. *Classical mechanics*. Publisher: University Science Books, 2005, 786 p.
13. James L., Meriam L., Kraige G. *Engineering mechanics*. Vol. 1. *Statics*. Wiley; 7 edition, 2011, 544 p.
14. James L., Meriam L., Kraige G. *Engineering mechanics*. Vol. 2. *Dynamics*. Wiley; 7 edition, 2012, 752 p.
15. Demidovich B.P., Kudryavtsev V.A. *Kratkii kurs vysshei matematiki. Uchebnoe posobie dlya vuzov* [A short course in higher mathematics. Textbook for universities]. Moscow: Astrel'; AST, 2001, 656 p. (In Russ.).
16. Yusfin Yu.S. etc. *Intensifikatsiya proizvodstva i uluchshenie kachestva okatyshei* [Intensification of production and improvement of the quality of pellets]. Moscow: Metallurgiya, 1994, 240 p. (In Russ.).
17. Ruchkin I.E. *Proizvodstvo zhelezorudnykh okatyshei* [Production of iron-ore pellets]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 184 p. (In Russ.).
18. Maerchak Sh. *Proizvodstvo okatyshei* [Production of pellets]. Moscow: Metallurgiya, 1982, 232 p. (In Russ.).
19. Korotich V.I. *Teoreticheskie osnovy okomkovaniya zhelezorudnykh materialov* [Theoretical foundations for the palletization of iron-ore materials]. Moscow: Metallurgiya, 1966, 152 p. (In Russ.).
20. Goejen J.G., Miller R.A., Brindley W.J., Leissler G.W. A simulation technique for predicting defects of thermal sprayed coatings. *NASA Technical Memorandum TM-106939*, 1995.
21. Hansbo A., Nylén P. Models for the simulation of spray deposition and robot motion optimization in thermal spraying of rotating objects. *Surface Coatings Technol.* 1999, vol. 122, pp. 191–201.
22. Enszt M.T., Griffith M.L., Reckaway D.E. *Critical issues for functionally graded material deposition by laser engineered net shaping*. Available at URL: <http://edge.cs.drexel.edu/GICL/people/schroeder/references/mpif02me.pdf>

Information about the authors:

V.M. Pavlovets, Cand. Sci., (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Thermal Power and Ecology" (pavlovets.victor@yandex.ru)
A.V. Gerasimuk, Postgraduate of the Chair of Electrical Engineering, Electric Drive and Industrial Electronics
(heavymetal7200@gmail.com)

Received February 17, 2017