

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-103-111

Вайтехович П.Е., *Боровский Д.Н.

Белорусский государственный технологический университет

*E-mail: dzianis23@rambler.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН ПЛАНЕТАРНОГО ТИПА

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы, связанные с исследованием планетарных машин. Показано, что они способны значительно интенсифицировать большинство применимых к ним процессов. Это происходит за счет усложнения траектории движения рабочего органа и увеличения инерционных сил. Кроме того, агрегаты планетарного типа являются энергоэффективными. Представлено влияние взаимного воздействия мелющих тел на их силовые характеристики в планетарной мельнице с внешней и внутренней обкатками барабанов. Показана зависимость разрушающих усилий от угловой скорости, степени заполнения помольных барабанов, геометрических соотношений самой мельницы. Получены достаточно простые зависимости для расчета полной скорости в любой точке планетарного рабочего органа заглаживающей машины. Их использование дает возможность проанализировать изменение скорости в широких пределах в зависимости от ряда конструктивных и технологических параметров. Предложенный метод позволяет выполнять расчет скоростей рабочих органов, совершающих планетарное движение. Методами классической механики с использованием мгновенного центра скоростей получена формула для расчета скорости в любой точке перемешивающей лопасти. Установлено, что скорость лопасти во времени изменяется по синусоидальному закону. Общая мощность с увеличением угловой скорости плавно возрастает. Полученные результаты в данной статье могут быть применены при конструировании и эксплуатации планетарных агрегатов.

Ключевые слова: планетарная мельница, рабочий орган, заглаживание, смеситель, перемешивание, вращение, водило.

Введение. Интенсификация работы технологических машин возможна за счет усложнения траектории движения рабочих органов и обрабатываемого материала, увеличения скорости их движения и перевода стационарных процессов в нестационарные. Все это может быть реализовано в машинах планетарного типа [1, 2].

Характерной особенностью таких машин является наличие колеса, которое с помощью водила обкатывается по неподвижной поверхности. В зависимости от способа обкатки (внутренней или внешней) траектория отдельных точек колеса может описывать одну из «замечательных» кривых: гипоциклоиду или эпициклоиду [3, 4].

Изменяя геометрические соотношения основных элементов планетарного механизма, можно получать самую разнообразную форму этих кривых, а соответственно и траекторию. В дополнение к этому, варьируя скоростью вращения водила, можно в широком интервале изменять скорости и ускорения отдельных точек вращающегося колеса. Таким образом, планетарные машины и механизмы имеют широчайший диапазон регулирования параметров.

Основная часть. Машины планетарного типа имеют большие перспективы для использования в механических процессах, таких как измельчение, смешение и довольно специфическом процессе –

заглаживании бетонных поверхностей [5]. Несмотря на кажущуюся простоту, эти процессы сложны по своей физической сущности и слабо изучены до настоящего времени. Все они довольно энергозатратны и сопровождаются повышенным абразивным износом рабочих органов технологического оборудования. В этой связи интенсификация процесса воздействия рабочего органа на обрабатываемую среду может привести к сокращению времени их контакта, а соответственно, к снижению энергозатрат износа.

Степень интенсификации за счет придания рабочим органам планетарного движения в указанных выше процессах проявляется по-разному. Она зависит прежде всего от максимально допустимой скорости, определяемой частотой вращения водила.

Для смесителей в режиме механического перемешивания эта скорость определяется удержанием твердых частиц на лопасти. В противном случае они начинают отбрасывать частицы от центра на периферию и наступает режим сепарации с уменьшением эффективности перемешивания. По этой причине перемешивающие агрегаты преимущественно тихоходные. Скорость лопастей при этом не превышает 10 м/с.

Подобным образом ограничивается и скорость движения рабочего органа дисковой загла-

живающей машины. Она представляет собой вращающийся диск, который с определенным усилием прижимается к не затвердевшей бетонной поверхности и перемещается вдоль нее. Задача диска состоит в выравнивании плоскости поверхности и заполнении мелких раковин. Показателем качества является заглаживающая способность – это длина линии, по которой рабочий орган воздействует на каждую элементарную площадку бетонной поверхности. Естественно, что при усложнении траектории движения ее длина будет больше. Указанный факт подтверждается простым сравнением. Любая точка диска с обычным вращением оставляет на поверхности след в виде окружности, а при его планетарном вращении – гипоциклоиды или эпициклоиды. Длина последних двух кривых при всех равных параметрах в 3–4 раза больше, чем окружности [3, 4]. Однако увеличение скорости вращения диска может привести к отбрасыванию частиц бетона на соседние участки уже обработанной поверхности. Такая скорость является верхним ограничением для дисковых заглаживающих машин. Она обычно выше 10 м/с, в общем случае лучше сказать составляет несколько десятков метров в секунду. По сравнению с быстроходной планетарной мельницей такую машину можно назвать среднеходной.

Следует отметить, что перед разработчиками планетарных мельниц ставятся совершенно иные задачи по сравнению со смесителями и заглаживающими машинами. Основная из них – это повышение эффективности процесса разрушения материала. Очевидно, что скорости движения рабочих органов при этом должны быть как можно больше. Основным элементом планетарной мельницы является размольный барабан, вовлеченный в планетарное движение, в который загружаются измельчающие тела (шары) и материал, подлежащий измельчению.

В конструктивном исполнении планетарные мельницы могут быть вертикальными, горизонтальными и наклонными, с внешней и внутренней обкаткой [1, 6–8]. В процессе изучения движения шаров в планетарной мельнице (рис. 1) удалось установить соотношения угловых скоростей и углов поворота водила и барабана [1, 9]:

$$\tilde{N} = \Omega^2 R(1+k) \left[\frac{b(1+k)}{k} + \cos\left(\frac{\varphi}{k}\right) \right] + g \cos\left(\frac{1+k}{k}\varphi\right) \leq 0 \quad (3)$$

Изменение силы давления за один цикл свидетельствует о нестационарности процесса разрушения материала, обусловленного воздействием измельчающих тел. Поскольку относительная сила давления \tilde{F}_p (отнесенная к единице массы шара) – это ни что иное как его ускорение, то из расчетной зависимости очевидно, что она

$$\Omega = \omega \frac{k}{1+k}; \quad \varphi = \psi \frac{k}{1+k}, \quad (1)$$

где ω и Ω – угловые скорости барабана и водила, рад/с; φ и ψ – углы поворота барабана и водила; k – геометрический критерий, который равен $k = r/R$, где r – радиус приводного элемента, м; R – радиус поверхности обкатки, м.

Знак «+» в формулах – внешняя обкатка, «-» – внутренняя.

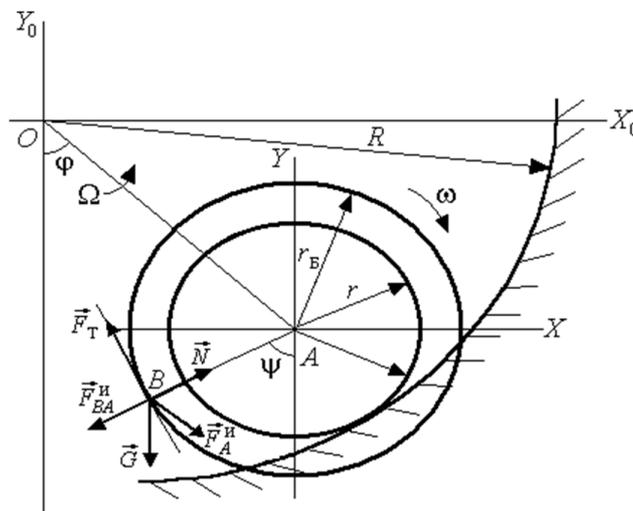


Рис. 1. Силовая схема планетарной мельницы с внутренней обкаткой

На измельчающее тело, находящееся внутри барабана, действует сила тяжести и две инерционные силы F_A и F_{BA} , связанные с поворотом барабана и водила соответственно:

$$F_A = m\omega^2 kbR; \quad F_{BA} = \frac{m\omega^2 k^2 R}{1+k}, \quad (2)$$

где b – второй геометрический критерий, который определяется как $b = r_\sigma/r$, где r_σ – радиус барабана.

Расчет силы давления шара на стенки барабана по формуле (3), равной нормальной реакции ($\tilde{N} = \tilde{F}_p$), показал, что она меняется циклически. Причем установлена зависимость цикличности от критерия k .

значительно превышает ускорение свободного падения. Таким образом, основным разрушающим силовым фактором в планетарных мельницах становятся инерционные силы. Экспериментальные исследования процесса помола в планетарной мельнице подтвердили ее высокую эффективность.

Естественно модель движения одиночного мелющего тела является довольно упрощенной. В дальнейшем было изучено движение сегмента загрузки в целом, рис. 2.

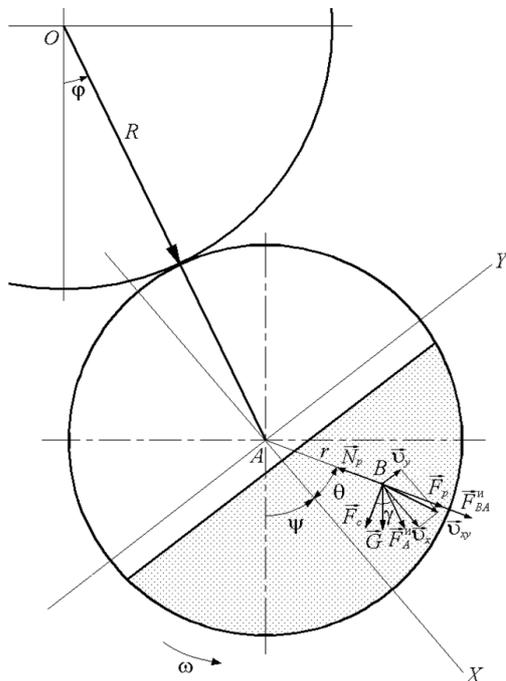


Рис. 2. Расчетная схема относительного движения мелющего тела в сегменте загрузки при внешней обкатке барабанов

Рассмотрим относительное движение мелющих тел помольной камеры планетарной мельницы в подвижной системе координат *AXY*, которая вращается с угловой скоростью ω , равной скорости вращения барабана [1, 9].

Уравнение относительного движения мелющего тела можно записать в следующем виде:

$$m\vec{a}_d = \vec{G} + \vec{F}_T + \vec{F}_A^n + \vec{F}_{BA}^n + \vec{F}_c + \vec{F}_p, \quad (4)$$

$$\vec{F}_{ip} = \vec{N}_{ip} = \frac{1}{2r_{ш}} \left[\omega^2 \frac{(r_i + r_{ш})^2 - r_0^2}{2} + (r_i + r_{ш} - r_0) \left(\frac{\omega^2 k^2 R^2}{1+k} \cos(\psi - \varphi) + g \cos \psi \right) \right] \quad (5)$$

где $r_{ш}$ – радиус шара, м; r_i – текущий радиус, м; r_0 – расстояние от центра барабана до свободной поверхности сегмента загрузки, м.

С учетом всех силовых факторов, входящих в уравнение (5) удалось в пределах сегмента загрузки определить зоны отрыва мелющих тел, а также зоны безотрывного движения со скольжением и без него [13]. В каждой из этих зон реализуется преобладающий способ разрушающего воздействия: удар, истирание и раздавливание. Разработана методика расчета напряжений при каждом из них. В качестве примера показано изменение ударных напряжений (рис. 4), которые значительно выше сжимающих.

где m – масса мелющего тела, кг; a_d – относительное ускорение мелющего тела, m/c^2 ; G – сила тяжести, Н; F_T – сила трения, Н; F_A^n, F_{BA}^n – соответственно переносная и относительная силы инерции, действующие на мелющее тело, Н; F_c – кориолисова сила инерции, Н; F_p – сила давления, Н. В то время, когда мелющее тело находится внутри сегмента загрузки, то на него оказывают воздействие другие тела. Последнее предлагается оценить дополнительной силой, названной силой давления F_p .

Для возможности учета воздействия других мелющих тел, выраженного силой давления F_p , обратимся к модели (рис. 3). Рассмотрим послойное движение шаров по дуге окружности. Тангенциальное усилие в момент сдвига слоев будет зависеть от давления, оказываемого в радиальном направлении на каждое мелющее тело анализируемого слоя [9–12].

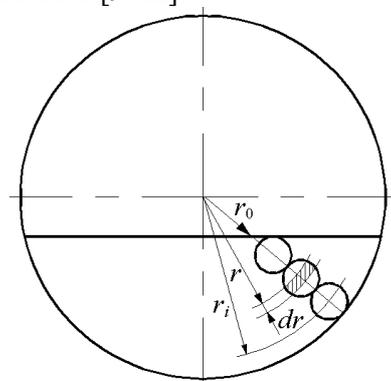


Рис. 3. Расчетная схема для определения силы давления

Составив уравнения для силы давления на элементарном участке dr и проведя интегрирование, получили расчетную зависимость для нее на любом радиусе r_i :

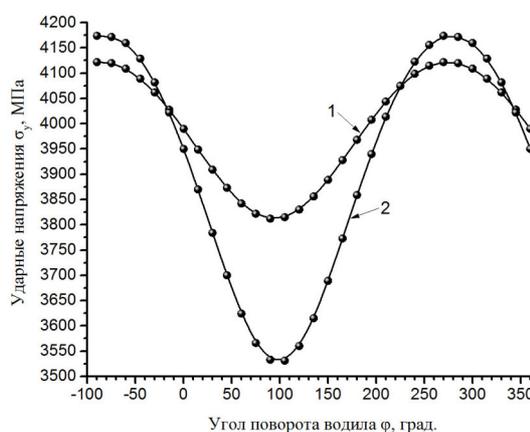


Рис. 4. Изменение ударных напряжений в планетарной мельнице: 1 – $\omega = 90$ рад/с; 2 – $\omega = 180$ рад/с

Таким образом можно оценить влияние на эффективность изменения каждого из них в отдельности и провести суммирование этих разрушающих эффектов.

Специфика процесса заглаживания, геометрические размеры рабочего органа и его скоростные режимы оказывают влияние на показатели эффективности и методы исследования заглаживающей машины.

Показателем эффективности заглаживания бетонных поверхностей является заглаживающая способность [5, 14], определяемая для дискового рабочего органа по формуле:

$$\theta_d = 0,94 \frac{v_d R}{v_3}, \quad (6)$$

где v_d – скорость диска, м/с; v_3 – скорость поступательного движения машины, м/с; R – радиус диска, м.

Для определения скорости диска, вовлеченного в планетарное движение, использован совершенно иной подход. Она определялась путем дифференцирования параметрических уравнений траекторий движения: эпициклоиды при внешней обкатке и гипоциклоиды при внутренней [15].

Методологию определения скорости рассмотрим на примере эпициклоиды (рис. 5).

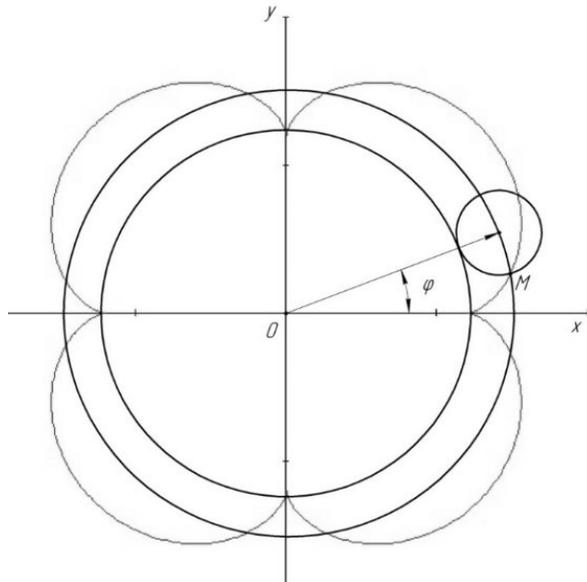


Рис. 5. Эпициклоида

Параметрические уравнения эпициклоиды имеют вид:

$$\begin{aligned} x &= (R+r) \cdot \cos \varphi - r_d \cdot \cos \left(\frac{R+r}{r} \cdot \varphi \right); \\ y &= (R+r) \cdot \sin \varphi - r_d \cdot \sin \left(\frac{R+r}{r} \cdot \varphi \right), \end{aligned} \quad (7)$$

где R – радиус обкатки, м; r – радиус обкатываемого круга (диска), м; r_d – радиус производящего круга (рабочего органа), м; φ – угол поворота водила, рад.

Первая производная по каждой координате для уравнений эпициклоиды по переменной φ :

$$\begin{aligned} \frac{dx}{d\varphi} &= -(R+r) \cdot \sin \varphi + r_d \cdot \frac{R+r}{r} \cdot \sin \left(\frac{R+r}{r} \cdot \varphi \right); \\ \frac{dy}{d\varphi} &= (R+r) \cdot \cos \varphi - r_d \cdot \frac{R+r}{r} \cdot \cos \left(\frac{R+r}{r} \cdot \varphi \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Так как скорость – это производная по времени, то необходимо перейти от переменной φ к новой переменной t . По каждой из координат получим:

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{dx}{dt} = \frac{dx}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \Omega \cdot \frac{dx}{d\varphi}; \\ v_y &= \frac{dy}{dt} = \frac{dy}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \Omega \cdot \frac{dy}{d\varphi}, \end{aligned} \quad (9)$$

где Ω – угловая скорость водила, рад/с.

Используя геометрические критерии $k = r/R$ и $b = r_d/r$ и учитывая соотношения углов (10), получим уравнение для расчета полной скорости диска (11).

$$\psi = \frac{R+r}{r} \cdot \varphi. \quad (10)$$

$$v = 2 \cdot \Omega \cdot R \cdot \sqrt{1 + b^2 - 2 \cdot b \cdot \cos \left(\frac{\varphi}{k} \right)}. \quad (11)$$

На рис. 6 показано изменение модуля полной скорости в зависимости от частоты вращения водила n за один полный оборот.

Очевидно, что зависимость линейной скорости от угла поворота носит периодический характер. Причем увеличение частоты вращения приводит только к росту амплитуды изменения скорости. Изменение геометрического критерия k не очень существенно влияет на амплитуду скорости.

Соблюдая последовательность в изложении материала от быстро- и среднеходных технологических агрегатов, переходим к тихоходным. Таковыми в нашем случае являются лопастные смесители с планетарным движением рабочего органа. Задача процесса перемешивания заключается в достижении гомогенности среды по всему объему смесителя и поддержании ее в таком состоянии длительное время. Это особенно важно в высокопроизводительных технологических процессах, например, в шлам-бассейнах в производстве цемента.

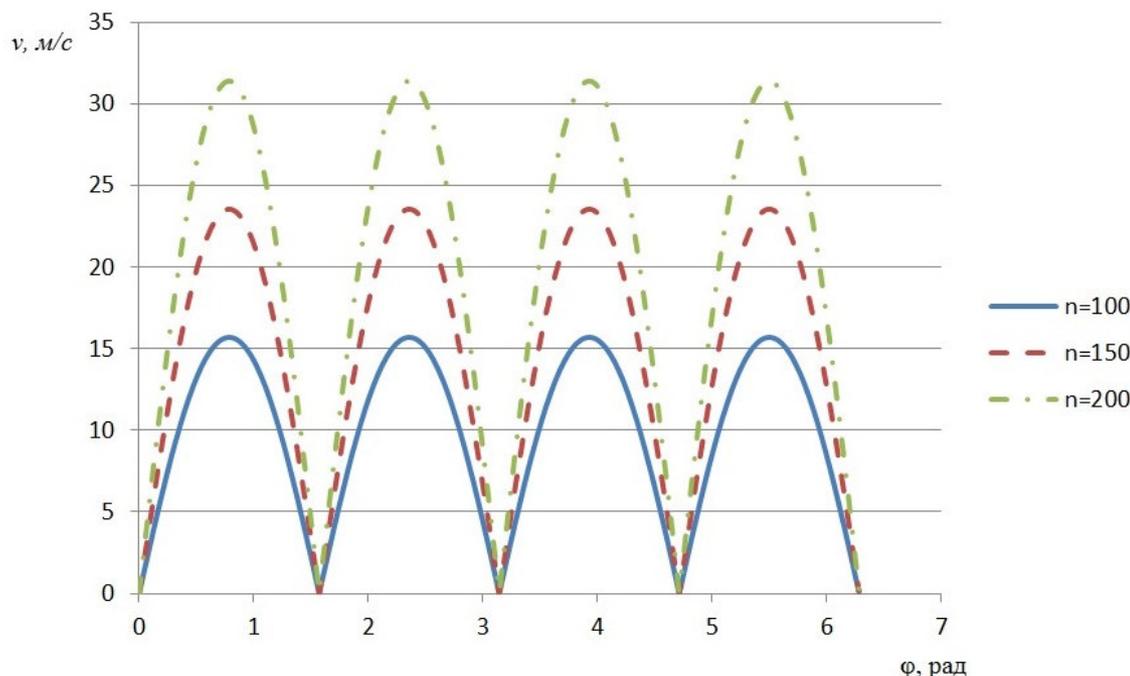


Рис. 6. Зависимость скорости от угла поворота при различных n

При наличии в перемешиваемой среде нескольких компонентов эффективность процесса обычно оценивается по одному из них – ключевому. По степени его распределения судят о качестве перемешивания. Для этого в разных местах смесителя отбирают пробы и определяют долю ключевого компонента. Ее равенство во всех точках свидетельствует об идеальном перемешивании. Однако в реальных условиях это равенство не достигается. Его нарушение оценивается среднеквадратичным отклонением по ключевому компоненту. Делением среднеквадратичного отклонения на долю ключевого компонента в исходном состоянии получают коэффициент вариации, который используется в качестве показателя эффективности перемешивания. К сожалению в этом показателе совершенно не учитываются ни геометрические, ни технологические параметры самого перемешивающего агрегата. В этой связи мы были вынуждены обратиться к альтернативным источникам [16], предлагающим другие методы оценки качества перемешивания.

Эффективность перемешивания в смесителе, в том числе и планетарном [17], оценивается критерием λ, c^{-1} , определяемым по следующей формуле:

$$\lambda = \frac{v \cdot S}{V}, \tag{12}$$

где v – средняя скорость лопасти, м/с; S – активная площадь лопасти, м²; V – объем смесителя, м³.

Важные численные параметры, характеризующие работу смесителя, зависят от скорости движения лопастей. Для ее определения рассмотрим расчетную схему (рис. 7).

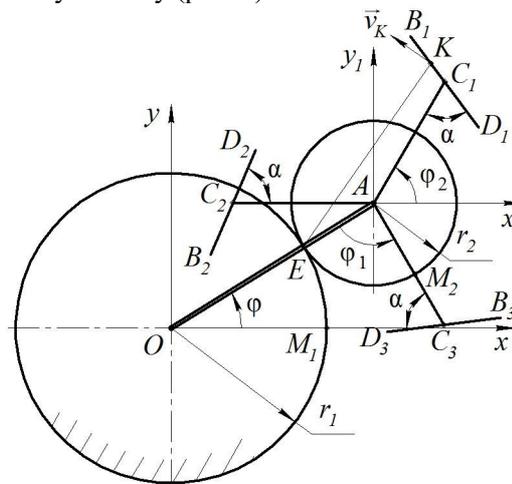


Рис. 7. Схема расположения лопастей

Если предположить, что один перемешивающий орган содержит три лопасти, то каждая из них жестко скреплена с колесом стержнем AC . При этом за один цикл водила OA все лопасти совершают одинаковые движения. В этой связи расчет скорости, а затем и мощности можно выполнять для одной лопасти с последующим увеличением на их количество.

При известной угловой скорости водила ω в зафиксированном положении механизма $\varphi = \omega \cdot t$ определим скорость в произвольной точке K лопасти. Примем, что в начальный момент движения $\varphi = 0$, стержень AC_3 совпадал с осью Ox . По-

сле поворота водила на угол φ стержень AC_3 повернется по отношению к водилу на угол φ_1 . Тогда формула примет вид:

$$\cup EM_1 = \cup EM_2; \varphi \cdot r_1 = \varphi_1 \cdot r_2; \varphi_1 = \varphi \cdot \frac{r_1}{r_2} = \varphi \cdot k. \quad (13)$$

$$\varphi \cdot OA = \varphi_2 \cdot EA; \varphi \cdot (r_1 + r_2) = \varphi_2 \cdot r_2; \varphi_2 = \varphi \cdot \frac{r_1 + r_2}{r_2} = \varphi \cdot (k + 1). \quad (14)$$

Аналогичная связь будет между угловыми скоростями водила и колеса, которая находится по формуле:

$$\omega_2 = \omega \cdot (k + 1). \quad (15)$$

С учетом этого скорость в точке K определяется по формуле:

$$v_K = \omega_2 \cdot l_{EK}, \quad (16)$$

где l_{EK} – длина линии EK .

В результате геометрических преобразований получена формула длины l_{EK} :

$$v_K = \omega(k + 1) \sqrt{r_2^2 + l^2 + a_K^2 + 2l \cdot a_K \cdot \cos \alpha + \left(2r_2 \sqrt{l^2 + a_K^2 + 2l \cdot a_K \cdot \cos \alpha}\right) \cos(k\varphi + \alpha)}. \quad (18)$$

При фиксированных значениях угловой скорости водила $\omega = 1$ рад/с и геометрическом критерии $k = 3$ по формуле (18) произведем расчет и анализ изменения скорости по ширине лопасти за один полный оборот водила ($\varphi = 360^\circ$).

где k – геометрический критерий, равный $k = r_1/r_2$.

Угол поворота колеса вместе с лопастями в абсолютном движении равен углу поворота вокруг мгновенного центра скоростей E и находится согласно выражениям:

$$l_{EK} = \sqrt{l_{EA}^2 + l_{AK}^2 - 2 \cdot l_{EA} \cdot l_{AK} \cdot \cos(k \cdot \varphi)}. \quad (17)$$

Для упрощения дальнейших преобразований переменную l_{CK} обозначим через a_K : $l_{CK} = a_K$. По расчетной схеме (рис. 7) видно, что $l_{EA} = r_2$. Неизменяемую длину стержня l_{AC} обозначим $l_{AC} = l$.

После введения новых обозначений и преобразования формулы (17) для l_{EK} , скорость лопасти в произвольной точке примет вид:

Результаты расчета представлены в виде трехмерной графической зависимости (рис. 8).

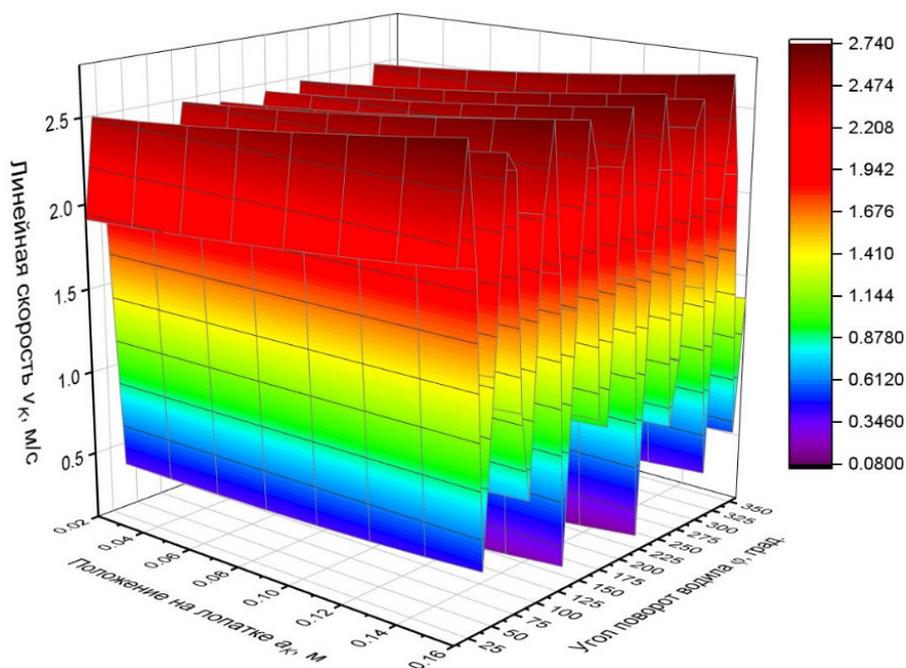


Рис. 8. Изменение скорости по ширине лопасти за один полный оборот водила

Из графика видно, что скорость v_K равномерно повышается с увеличением ширины лопасти (a_K). А вот в процессе вращения (угол φ) изменение скорости носит синусоидальный характер.

Причем, экстремальные значения на соседних пиках графика разные. Максимальные значения скорости достигают $v_K = 2,74$ м/с.

В дальнейшем был проведен расчет мощности, затрачиваемой на перемешивание, которая

напрямую зависит от скорости перемещения лопастей. Расчет показал, что, несмотря на локальные пульсации скорости, мощность в зависимости от угловой скорости изменяется по линейному закону.

Выводы. Подводя итог, можно отметить, что в работе представлены методы расчета кинематических и динамических характеристик трех разных видов технологических машин планетарного типа. Причем как конструкции агрегатов, так и методики расчета имеют существенные отличия. Это свидетельствует о том, что процесс их исследования находится в постоянном развитии и у него есть хорошие перспективы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вайтехович П.Е. Интенсификация и моделирование процессов диспергирования в поле инерционных сил. Минск: БГТУ. 2008. 220 с.
2. Бушуев Л.П. Многорежимная планетарная мельница // Изв. вузов. Горный журнал. 1965. № 10. С. 148–154.
3. Звавич Л.И., Рязановский А.Р. Геометрия. Справочное пособие. Москва. 2012. 128 с.
4. Марков В.Г. Планетарные механизмы: учеб. пособие по курсу «Теория механизмов и машин». Л.: ЛТХП. 1969. 28 с.
5. Болотный А.В. Теория и процессы заглаживания бетонных поверхностей. Л.: Строиздат. 1975. 127 с.
6. Ким Б.Г. Относительное движение мелющих тел в барабане планетарной мельницы при водопадном режиме ее работы // Изв. вузов. Горный журнал. 1975. № 9. С. 81–86.
7. Бушуев Л.П. Экспериментальные исследования и вопросы теории планетарных центробежных мельниц // Науч. докл. высшей школы. Горное дело. 1959. № 2. С. 220–226.
8. Доброборский Г.А., Лянсберг Л.М., Рабин А.Н. Определение основных режимов движения загрузки в барабанах многобарабанной планетарно-центробежной мельницы с вертикальными осями // Изв. вузов. Горный журнал. 1993. № 1. С. 85–89.
9. Семененко Д.В. Влияние конструктивных и технологических параметров горизонтальной планетарной мельницы на эффективность процесса измельчения: автореф. дис. ... канд. техн. наук; Белорус. гос. технол. ун-т. Минск. 2014. 20 с.
10. Зубко И.Ю., Пермяков П.В., Трусов П.В. Динамика многих соударяющихся тел: приложение к механическому легированию // Известия вузов. Северо-кавказский регион. Естественные науки. 2008. № 2. С. 29–35.
11. Зубко И.Ю., Зайцев А.В. Моделирование движения мелющих тел в процессе механического легирования // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмические техника. 2017. № 2. С. 34–43.
12. Feng Y.T., Han K., Owen D.R.J. Discrete element simulation of the dynamics of high energy planetary ball milling processes // Materials Science and Engineering A. 2004. Vol. 375–377. P. 815–819.
13. Вайтехович П.Е., Боровский Д.Н. Разрушающее воздействие мелющих тел в горизонтальной планетарной мельнице при различных способах обкатки помольных барабанов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2019. № 2. С. 3–6.
14. Рысс-Березарк С.А. Определение параметров заглаживающих машин с дисковым рабочим органом с простым и сложным движением. Л.: Строиздат. 1999. 167 с.
15. Вайтехович П.Е., Сидоров Н.Н. Определение скорости движения технологичных машин планетарного типа // Труды БГТУ. Сер. химии и технологии неорганич. Вып. 12. 2004. С. 28–35.
16. Вайцяховіч П.Я., Францкевіч В.С., Грэбянчук П.С. Машыны і абсталяванне прадпрыемстваў будаўнічых матэрыялаў: вучэб. дапам. Мінск: БДТУ. 2018. 297 с.
17. Вайтехович П.Е., Хвесько Г.М., Боровский Д.Н., Семененко Д.В. Определение основных параметров эффективного планетарного смесителя / Труды БГТУ. Серия 2. Химические технологии, биотехнология и геоэкология. 2019. №2 (223). С. 114–119.

Информация об авторах

Вайтехович Петр Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств. E-mail: vpe51@mail.ru. Белорусский государственный технологический университет. Республика Беларусь, 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а.

Боровский Денис Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств. E-mail: dzianis23@rambler.ru. Белорусский государственный технологический университет. Республика Беларусь, 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а.

Поступила 27.05.2022 г.

© Вайтехович П.Е., Боровский Д.Н. 2022

Vaytekhovich P.E., *Borovskiy D.N.
Belarusian State Technological University
 *E-mail: dzianis23@rambler.ru

DETERMINATION OF KINEMATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF TECHNOLOGICAL MACHINES OF PLANETARY TYPE

Abstract. *The article deals with issues related to the study of planetary machines. It is demonstrated that they are able to significantly intensify most of the processes applicable to them. This is due to the complication of the trajectory of the movement of the working body and the increase in inertial forces. In addition, planetary units are energy efficient. The influence of the mutual action of grinding bodies on their power characteristics in a planetary mill with external and internal running of the drums is presented. The dependence of destructive forces on the angular velocity, the degree of filling of the grinding drums, the geometric ratios of the mill itself is shown. Sufficiently simple dependences have been obtained for calculating the total speed at any point of the planetary working body of the smoothing machine. Their use makes it possible to analyze the change in speed over a wide range, depending on a number of design and technological parameters. The proposed method allows to calculate the speeds of the working bodies that make planetary motion. Using the methods of classical mechanics, using the instantaneous center of velocities, a formula is obtained for calculating the speed at any point of the mixing blade. It is established that the speed of the blade changes in time according to a sinusoidal law. The total power gradually increases with increasing angular velocity. The results obtained in this article can be applied in the design and operation of planetary units.*

Keywords: *planetary mill, working body, smoothing, mixer, mixing, rotation, carrier.*

REFERENCES

1. Vaytekhovich P.E. Intensification and modeling of dispersion processes in the field of inertial forces [Intensifikatsiya i modelirovanie processov dispergirovaniya v pole inercionnyh sil]. Minsk: BSTU. 2008. 220 p. (rus)
2. Bushuev L.P. Multimode planetary mill [Mnogorezhimnaya planetarnaya mel'nicy]. Izv. universities. Mining magazine. 1965. No 10. Pp 148–154. (rus)
3. Zvavich L.I., Ryazanovskij A.R. Geometry. Reference manua. [Geometriya. Spravochnoe posobie]. M.: Drofa. 2012. 128 p. (rus)
4. Markov V.G. Planetary mechanisms: textbook. manual for the course "Theory of mechanisms and machines" [Planetarnye mekhanizmy: ucheb. posobie po kursu «Teoriya mekhanizmov i mashin»]. L.: LTHP. 1969. p. 28. (rus)
5. Bolotnyj A.V. Theory and processes of smoothing concrete surfaces [Teoriya i processy zaglzhivaniya betonnyh poverhnostej]. L: Stroizdat. 1975. 127 p. (rus)
6. Kim B.G. Relative motion of grinding bodies in the drum of a planetary mill in the waterfall mode of its operation [Otnositel'noe dvizhenie melyushchih tel v barabane planetarnoj mel'nicy pri vodorodnom rezhime ee raboty]. Izv. universities. Mining magazine. 1975. No. 9. Pp. 81–86. (rus)
7. Bushuev L.P. Experimental research and questions of the theory of planetary centrifugal mills [Eksperimental'nye issledovaniya i voprosy teorii planetarnyh centrobezhnyh mel'nic]. Scientific report high school. Mining. 1959. No 2. Pp. 220–226. (rus)
8. Dobroborskij G.A., Lyansberg L.M., Rabin A.N. Determination of the main modes of movement of the load in the drums of a multi-drum planetary centrifugal mill with vertical axes [Opredelenie osnovnyh rezhimov dvizheniya zagruzki v barabanah mnogobarabannoj planetarno-centrobezhnoj mel'nicy s vertikal'nymi osyami]. Izv. universities. Mining magazine. 1993. No 1. Pp. 85–89. (rus)
9. Semenenko D.V. Influence of design and technological parameters of a horizontal planetary mill on the efficiency of the grinding process: abstract of the thesis. dis. ... cand. tech. sciences; BSTU. Minsk. 2014. 20 p. (rus)
10. Zubko I. YU., Permyakov P.V., Trusov P.V. Dynamics of many colliding bodies: application to mechanical alloying [Dinamika mnogih soudaryayushchihysya tel: prilozhenie k mekhanicheskomu legirovaniyu]. Izv. universities. North Caucasian region. Natural Sciences. 2008. No. 2. Pp. 29–35. (rus)
11. Zubko I.YU., Zajcev A.V. Simulation of milling balls motion within mechanical alloying process [Modelirovanie dvizheniya melyushchih tel v processe mekhanicheskogo legirovaniya]. Bulletin of PNRPU. Aerospace engineering. 2017. No. 2. Pp. 34–43.
12. Feng Y.T., Han K., Owen D.R.J. Discrete element simulation of the dynamics of high energy planetary ball milling processes. Materials Science and Engineering A. 2004. Vol. 375–377. Pp. 815–819.
13. Vaytekhovich P.E., Borovskiy D.N. Destructive effect of grinding media in a horizontal planetary mill with different methods of running in grinding drums [Razrushayushchee vozdeystvie melyushchih tel v gorizontальной planetarnoj mel'nice pri razlichnyh sposobah obkatki pomol'nyh barabanov]. Chemical and petroleum engineering. 2019. No 2. Pp. 3–6. (rus)

14. Ryss-Berezark S.A. Determination of the parameters of smoothing machines with a disk working body with a simple and complex movement [Opredelenie parametrov zaglzhivayushchih mashin s diskovym rabochim organom s prostym i slozhnym dvizheniem]. L: Stroizdat. 1999. 167 p. (rus)

15. Vajtekovich P.E., Sidorov N.N. Determination of the speed of movement of technological machines of planetary type [Opredelenie skorosti dvizheniya tekhnologichnyh mashin planetarnogo tipa]. Trudy BGTU. Ser. himii i tekhnologii neorgan. 2004. No 12. Pp. 28–35.

16. Vajtekovich P.E., Franckevich V.S., Hrebanchuk P.S. Machinery and equipment for construction materials companies: a textbook [Mashyny i abstalyavanne prapryemstvaŭ budaŭnichykh materyyalaŭ: vucheb. dapam.]. Minsk: BSTU. 2018. 297 p. (rus)

17. Vajtekovich P.E., Hves'ko G.M., Borovskij D.N., Semenenko D.V. Determination of the main parameters of an efficient planetary mixer [Opredelenie osnovnyh parametrov effektivnogo planetarnogo smesitelya]. Trudy BGTU. Series 2. Chemical technologies, biotechnology and geoecology. 2019. No. 2 (223). Pp. 114–119. (rus)

Information about the authors

Vaytekovich, Petr E. DSc (Engineering), Professor. E-mail: vpe51@mail.ru. Belarusian State Technological University. Republic of Belarus, 220006, Minsk, str. Sverdlova, 13a.

Borovskiy, Denis N. PhD (Engineering). E-mail: dzianis23@rambler.ru. Belarusian State Technological University. Republic of Belarus, 220006, Minsk, str. Sverdlova, 13a.

Received 27.05.2022

Для цитирования:

Вайтехович П.Е., Боровский Д.Н. Определение кинематических и динамических характеристик технологических машин планетарного типа // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 8. С. 103–111. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-103-111

For citation:

Vaytekovich P.E., Borovskiy D.N. Determination of kinematic and dynamic characteristics of technological machines of planetary type. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 8. Pp. 103–111. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-8-103-111