



# ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621.926

**П.Е. ВАЙТЕХОВИЧ**, д-р техн. наук, проф.

заведующий кафедрой машин и аппаратов химических и силикатных производств<sup>1</sup>

E-mail: vpe51@mail.ru

**Г.М. ХВЕСЬКО**, канд. техн. наук

доцент кафедры теоретической механики<sup>1</sup>

E-mail: hveskog@belstu.by

**Д.Н. БОРОВСКИЙ**, канд. техн. наук

ассистент кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств<sup>1</sup>

E-mail: dzianis23@rambler.ru

**Е.О. ИЛЬЯШЕНКО**

аспирант кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств<sup>1</sup>

E-mail: iyashenko@tut.by

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 19.09.2016.

## ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ В ЭЛЕМЕНТАХ ПЛАНЕТАРНОЙ МЕЛЬНИЦЫ С РЕМЕННЫМ ПРИВОДОМ

*Рассмотрены вопросы, связанные с определением динамических нагрузок, возникающих в подвижных узлах планетарной мельницы с ременным приводом. Проведен анализ влияния конструктивных и технологических параметров на их величину. Для проведения исследования была выбрана горизонтальная планетарная мельница, так как она обладает большим потенциалом для организации замкнутого цикла измельчения при непрерывной загрузке и выгрузке материала. Была составлена расчетная схема, анализ которой показал, что задачу можно решать в одной плоскости. Так как на характер движения загрузки в помольных барабанах планетарной мельницы большое влияние оказывают геометрические параметры отдельных узлов агрегата, были выведены геометрические критерии, отражающие соотношение между этими параметрами. В ходе силового расчета привода планетарной мельницы были определены инерционные силы, оказывающие существенное влияние на движение. С учетом ранее определенных сил составлялись уравнения кинестатики. Из этих уравнений были получены выражения для определения конечной искомой величины — реакции на оси барабана. Апробация методики расчета этой реакции проводилась на планетарной мельнице с размерами реального промышленного объекта. В ходе исследования варьировались такие параметры, как угловая скорость водила, соотношение геометрических параметров и степень загрузки барабанов. Изменения искомых параметров анализировались на протяжении одного полного оборота водила. В результате проведенного исследования был получен ряд зависимостей. Произведя оценку полученных результатов можно отметить, что изменение опорной реакции происходит по косинусоидальному закону в небольшом диапазоне. Также установлено, что увеличение угловой скорости и коэффициента загрузки приводит к значительному повышению динамических нагрузок. Кроме того, исследовалось влияние соотношения размеров отдельных узлов агрегата на величину динамических нагрузок. Общим итогом работы является разработка метода расчета динамических нагрузок на опорные узлы планетарной мельницы с учетом влияния максимального количества параметров.*

**Ключевые слова:** планетарная мельница, частота вращения, загрузка мельницы, подшипниковый узел, объем барабана, ременной привод, зубчатый привод, динамические нагрузки, реакция опоры

**Введение.** Интерес к планетарным машинам, проявляемый на протяжении нескольких десятков лет, не ослабевает и по нынешнее время, что подтверждается многочисленными публикациями в отечественных и зарубежных изданиях [1–6]. Более того, в последние годы в связи с организацией масштабного производства тонкодисперсных и наноструктурированных порошков он значительно вырос. И этому есть аргументированное объяснение, поскольку планетарная мельница представляет собой компактный энергонапряженный агрегат. Материал, загружаемый в помольные барабаны, подвергается интенсивному воздействию со стороны измельчающих тел. Причем основными силовыми факторами, способствующими разрушению частиц материала, становятся инерционные силы, превосходящие в десятки и даже сотни раз силу тяжести.

Возвращаясь к упомянутым публикациям, следует отметить, что они в большей степени имеют прикладную технологическую направленность. В них рассматриваются результаты измельчения различных материалов в планетарных мельницах, преимущественно циклического действия. Но даже по этим исследованиям видно, насколько широки возможности практического использования этих агрегатов. Это порошковая металлургия, производство катализаторов, пигментов, медицинских препаратов и многое другое.

Вместе с тем публикаций по исследованию самой планетарной мельницы как механической системы достаточно мало. Определенный вклад в ликвидацию этого пробела внесли авторы данной работы. Нами изучена механика движения загрузки в планетарной мельнице [7], причем с учетом взаимодействия между ее элементами [8], сделана попытка оценить разрушающие напряжения в измельчаемом материале [9], проведен комплекс экспериментальных исследований по помолу различных материалов, подтверждающий высокую эффективность этого агрегата [10]. Все это позволило приступить к созданию промышленной планетарной мельницы, причем непрерывного действия.

Однако на этом пути могут возникнуть существенные трудности, обусловленные большими инерционными силами, возникающими в планетарных мельницах. Эти силы связаны с переносным движением помольных барабанов и свободно перемещающейся внутри них загрузки. Их направление может изменяться в пределах полного оборота водила в разных фазах, что приведет к пульсационному изменению общей динамической нагрузки на конструктивные узлы мельницы.

Поэтому целью данной работы является разработка и апробация методики расчета динамических нагрузок на элементы планетарной мельницы и анализ влияния конструктивных и технологических параметров на их величину.

**Анализ изменения динамических нагрузок в узлах планетарной мельницы.** В качестве объекта исследования была выбрана горизонтальная планетарная мельница как наиболее перспективная с точки зрения организации замкнутого цикла измельчения при непрерывной загрузке и выгрузке материала. Для привода помольных барабанов решено использовать ременные передачи, обладающие хорошими амортизирующими и демпфирующими свойствами и способные компенсировать изменяющиеся в широком диапазоне динамические нагрузки. Одна ременная передача применена для приведения во вращение центрального шкива, выполняющего одновременно функцию водила. Две другие, симметрично расположенные относительно оси водила, обеспечивают вращение барабанов вокруг собственных осей. Их ремни охватывают шкив, закрепленный неподвижно на оси водила, со шкивами, скрепленными жестко с размольными барабанами.

Предварительный анализ расчетной схемы показал, что задачу по определению динамических нагрузок можно рассматривать в одной плоскости, так как здесь нет осевых сил. Наиболее нагруженным элементом конструкции является ось размольных барабанов. Динамическая нагрузка на центральную ось за счет их симметричного расположения уравнивается. Поэтому основной динамической составляющей, а, соответственно, и анализируемым в данной работе параметром будет реакция на оси барабана  $R_A$ .

Для ее определения составлено две расчетные схемы, на первой из которой (рисунок 1) представлены геометрические и кинематические параметры, а на второй (рисунок 2) — все силовые факторы, действующие на элементы конструкции планетарной мельницы.

Для определения всех силовых факторов, представленных на расчетной схеме (см. рисунок 2), необходимо рассчитать ряд промежуточных параметров.

Поскольку движение размольных барабанов при выбранной схеме привода плоскопараллельное, то для расчета можно воспользоваться правилом мгновенного центра скоростей. В данном случае он находится в точке  $D$  (см. рисунок 1). Тогда угловая скорость барабана вычисляется по формуле (1):

$$\omega = \frac{v_A}{l_{AD}}, \quad (1)$$

где  $v_A$  — линейная скорость перемещения оси барабана (точка  $A$ ), м/с;  $l_{AD}$  — мгновенный радиус точки  $A$ , м.

В свою очередь, линейная скорость перемещения оси барабана может быть вычислена из угловой скорости водила по формуле (2):

$$v_A = \Omega \cdot l_{OA}, \quad (2)$$

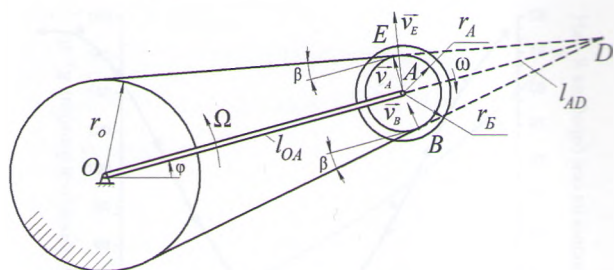


Рисунок 1 — Геометрические и кинематические параметры планетарной мельницы с ременным приводом

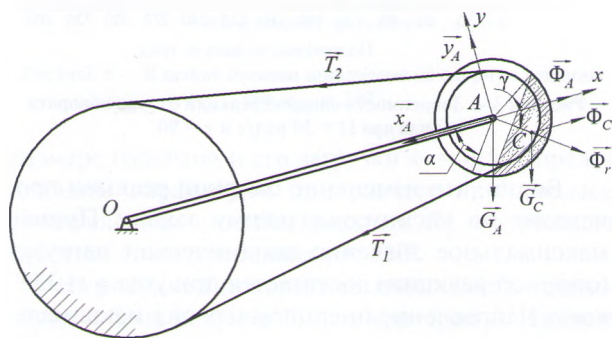


Рисунок 2 — Силовая схема мельницы с ременным приводом

где  $\Omega$  — угловая скорость водила,  $c^{-1}$ ;  $l_{OA}$  — длина водила, м.

Мгновенный радиус  $l_{AD}$  (см. рисунок 1) находится из соотношений (3):

$$\frac{r_0}{r_A} = \frac{l_{OD}}{l_{AD}} = \frac{l_{OA} + l_{AD}}{l_{AD}}, \quad (3)$$

откуда

$$l_{AD} = \frac{r_A \cdot l_{OA}}{|r_0 - r_A|}. \quad (4)$$

Угол  $\beta$ , необходимый в дальнейших расчетах, определяется из условия (5):

$$\sin \beta = \frac{|r_0 - r_A|}{l_{OA}}. \quad (5)$$

Ранее было установлено, что на характер движения загрузки в помольных барабанах планетарной мельницы существенно влияют геометрические параметры и соотношения размеров отдельных узлов планетарной мельницы [11]. Естественно, что эти соотношения будут влиять и на скорости движения и величину динамических нагрузок элементов привода. Для оценки этого влияния по аналогии с предыдущими работами введем несколько геометрических критериев.

Первый из них ранее устанавливал соотношение между размерами приводного элемента и поверхности, по которой он обкатывается. В данном случае этот критерий будет иметь следующий вид:

$$k = \frac{r_A}{l_{OA} + r_A}. \quad (6)$$

Приводной элемент (шків) не всегда будет иметь одинаковый диаметр с барабаном. Поэтому

второй критерий (7) устанавливает соотношение между ними:

$$b = \frac{r_B}{r_A}. \quad (7)$$

Для ременной передачи всегда определяющим фактором является соотношение размеров двух шкивов, которое характеризуется третьим геометрическим критерием (8):

$$c = \frac{r_A}{r_0}. \quad (8)$$

После предварительного анализа можно приступить к силовому расчету привода планетарной мельницы. Поскольку кроме активных существенное влияние на движение оказывают инерционные силы, то при решении поставленной задачи более предпочтительным будет использование принципа Даламбера. При этом весь комплекс силовых факторов (см. рисунок 2) действующих на барабан планетарной мельницы включает:  $G_A$  и  $G_C$  — силы тяжести барабана и загрузки;  $T_1$  и  $T_2$  — силы натяжения ремня;  $X_A$  и  $Y_A$  — проекции реакции связи;  $\Phi_A$ ,  $\Phi_C$ ,  $\Phi_r$  — силы инерции.

Инерционные силы определяются по следующим формулам:

$$\Phi_A = m_A \cdot \Omega^2 \cdot l_{OA}, \quad (9)$$

$$\Phi_C = m_C \cdot \Omega^2 \cdot l_{OA}, \quad (10)$$

$$\Phi_r = m_C \cdot \omega^2 \cdot l_{AC}, \quad (11)$$

где  $m_A$ ,  $m_C$  — масса барабана и загрузки соответственно, кг;  $l_{AC}$  — расстояние от центра масс загрузки до оси барабана, м.

Расстояние  $l_{AC}$  можно рассчитать из предположения, что загрузка в барабане планетарной мельницы распределяется в виде сегмента. Причем в работе Кима [12] установлено, что этот сегмент занимает стабильное положение относительно водила. Он отстает от водила на угол  $\alpha = 40 \div 60^\circ$  (см. рисунок 2).

Координаты центра тяжести сегмента, измеряемые расстоянием  $l_{AC}$ , можно определить по следующей формуле [13]:

$$l_{AC} = \frac{4 \cdot r_B \cdot (\sin \gamma)^3}{3(2\gamma - \sin(2\gamma))}, \quad (12)$$

где  $\gamma$  — половина угла сектора, ограничивающего сегмент, рад.

Через этот же угол определяется и площадь сегмента:

$$S = 0,5r_B^2(2\gamma - \sin(2\gamma)). \quad (13)$$

Зная площадь сегмента, занимаемого загрузкой, можно оценить степень заполнения барабана. По аналогии с обычными барабанными мельницами назовем его коэффициентом заполнения —  $k_s = S / S_B$ , где  $S_B$  — площадь поперечного

сечения барабана. Таким образом, угол  $\gamma$  является параметром, характеризующим степень заполнения барабана материалом и измельчающими телами. При расчете силы тяжести барабана учитывалась масса корпуса с крышками и масса шкива, жестко соединенного с ним.

Поскольку ветвь ремня, где приложена сила  $T_1$  (см. рисунок 2), является ведущей, то  $T_1 = 2 \cdot T_2$ . После анализа всех силовых факторов можно приступить к составлению уравнений кинестатики. Для плоской произвольной системы сил, находящейся в равновесии, они имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^n F_{kx} = 0; & \Phi_A + \Phi_C + \Phi_r \cdot \sin \alpha - (G_A + G_C) \cdot \sin \varphi - \\ & - (T_1 + T_2) \cdot \cos \beta - X_A = 0; \\ \sum_{k=1}^n F_{ky} = 0; & -\Phi_r \cdot \cos \alpha - (G_A + G_C) \cdot \cos \varphi + \\ & + (T_2 - T_1) \cdot \sin \beta + Y_A = 0; \\ \sum_{k=1}^n m_A \left( \vec{F}_k \right) = 0; & \Phi_C \cdot l_{AC} \cdot \cos \alpha - G_C \cdot l_{AC} \cdot \sin \varphi + \\ & + (T_2 - T_1) \cdot r_A = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Из уравнений кинестатики (14) получаем выражения для расчета неизвестных параметров:

$$T_2 = \frac{1}{r_A} (\Phi_C \cdot l_{AC} \cdot \cos \alpha - G_C \cdot l_{AC} \cdot \sin \varphi); \quad (15)$$

$$X_A = \Phi_A + \Phi_C + \Phi_r \cdot \sin \alpha - (G_A + G_C) \cdot \sin \varphi - 3 \cdot T_2 \cdot \cos \beta; \quad (16)$$

$$Y_A = \Phi_r \cdot \cos \alpha + (G_A + G_C) \cdot \cos \varphi - T_2 \cdot \sin \beta; \quad (17)$$

$$R_A = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2}. \quad (18)$$

Как указывалось ранее, конечной искомой величиной является реакция на оси барабана  $R_A$ .

Апробация методики расчета реакции  $R_A$  как основной динамической нагрузки на элементы конструкции производилась на планетарной мельнице с габаритами реального промышленного объекта: диаметр барабанов — 0,2 м; длина — 1 м. Угловая скорость водила изменялась в пределах 30÷80 рад/с. Варьировались также соотношение геометрических параметров мельницы в диапазоне критериев  $k = 0,1 \div 0,4$ ;  $b = 0,6 \div 1,4$ ;  $c = 0,2 \div 1,0$  и степень загрузки барабанов по углу  $\gamma = 30 \div 120^\circ$ . Изменения всех параметров анализировались на протяжении одного оборота водила при  $\varphi = 0 \div 360^\circ$ .

Первая важная зависимость получена для опорной реакции как функции угла поворота водила (рисунок 3) при фиксированных значениях угловой скорости  $\Omega = 30$  рад/с и угле  $\gamma = 90^\circ$ . При этом геометрические критерии составляют  $k = 0,1$ ;  $b = 1,0$ ;  $c = 0,5$ .

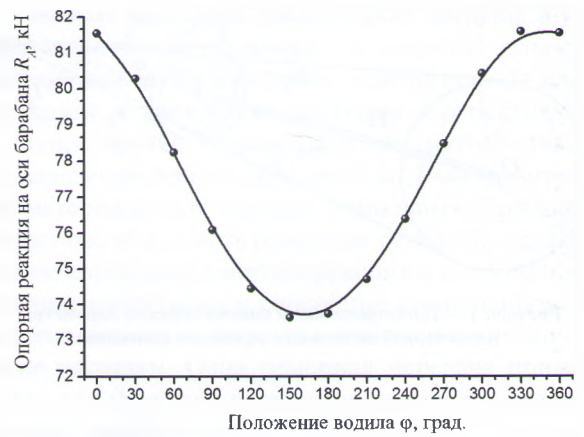


Рисунок 3 — Зависимость опорной реакции от угла поворота водила при  $\Omega = 30$  рад/с и  $\gamma = 90^\circ$

Видно, что изменение опорной реакции происходит по косинусоидальному закону. Причем максимальное значение динамической нагрузки (опорной реакции) достигается при угле  $\varphi = 330^\circ$ , когда направление инерционных сил максимально сближается с направлением силы тяжести. Но положительным фактом следует считать то, что диапазон ее изменения в пределах одного оборота водила не очень большой (73–82 кН).

При других угловых скоростях характер изменения опорной реакции идентичен. Естественно, увеличение угловой скорости и коэффициента загрузки приводит к значительному повышению динамических нагрузок. Это подтверждается графическими зависимостями  $R_A = f(\Omega)$  (рисунок 4) и  $R_A = f(k)$  (рисунок 5), построенными для ее максимальных значений при угле поворота водила  $\varphi = 330^\circ$ . В исследуемом диапазоне реакции  $R_A$  увеличивается в 6–8 раз.

Существенное влияние на величину динамических нагрузок оказывает изменение соотношения размеров отдельных узлов планетарной мельницы, выраженное через геометрические критерии. Эта серия вычислительных экспериментов реализовывалась при более высокой угловой скорости  $\Omega = 60$  рад/с и при фиксированном

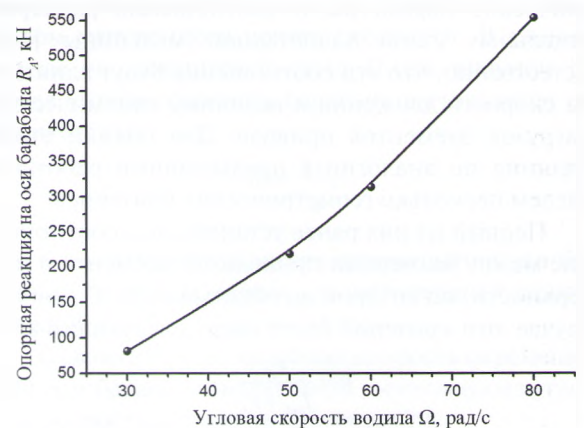


Рисунок 4 — Зависимость опорной реакции от угловой скорости водила при  $\varphi_{\max} = 330^\circ$

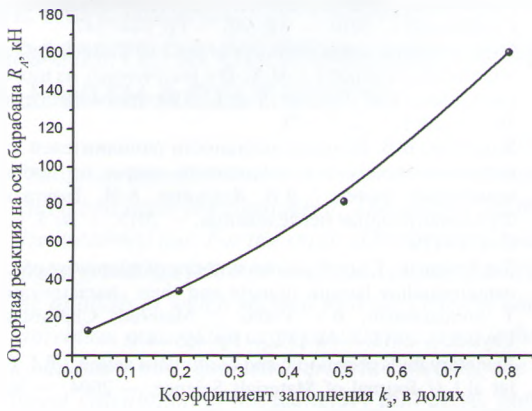


Рисунок 5 — Влияние степени заполнения на опорную реакцию при  $\varphi_{max} = 330^\circ$

размере барабана и его загрузки  $k_3 = 0,5$ . Определяющим параметром при расчете принималась максимальная опорная реакция  $R_A$ , полученная при угле поворота водила  $\varphi = 330^\circ$ .

На рисунке 6 показана ее зависимость от критерия  $k$ , а на рисунке 7 — от критерия  $b$ . Причем в дополнение к уже указанным параметрам в первом случае фиксировались другие геометрические критерии:  $b = 1,0$ ;  $c = 0,5$ , а во втором —  $k = 0,4$ ;  $c = 0,5$ .

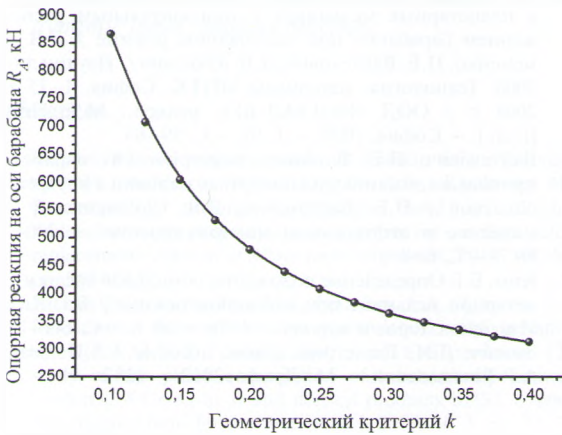


Рисунок 6 — Зависимость опорной реакции от геометрического критерия  $k$  при  $b = 1,0$ ;  $c = 0,5$

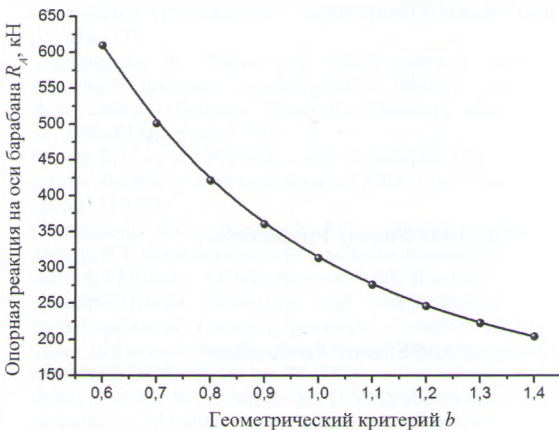


Рисунок 7 — Зависимость опорной реакции от геометрического критерия  $b$  при  $k = 0,4$ ;  $c = 0,5$

Увеличение критерия  $k$  в данном случае эквивалентно уменьшению длины водила (6). Это неизбежно приводит к уменьшению инерционных сил  $\Phi_A$ ,  $\Phi_C$ , рассчитываемых по формулам (9) и (10). В результате динамические нагрузки, характеризующиеся опорной реакцией  $R_A$ , снижаются (см. рисунок 6).

При фиксированном радиусе барабана критерий  $b$  изменяется обратно пропорционально радиусу приводного шкива  $r_A$  — его увеличение сопровождается уменьшением  $r_A$ . И, несмотря на некоторое увеличение радиуса центра масс загрузки  $l_{AC}$ , все инерционные силы, а, соответственно, и опорная реакция уменьшаются (см. рисунок 7). Это обусловлено тем, что при сохранении постоянными других критериев, изменяются геометрические соотношения ременной передачи. Например, неизменность критерия  $k$  обеспечивается уменьшением длины водила  $l_{OA}$ .

Аналогичная ситуация наблюдается и при увеличении критерия  $c$  (рисунок 8). В этом случае при малых его значениях динамические нагрузки самые большие и достигают 2300 кН. Но по мере увеличения анализируемого критерия происходит их резкое снижение, которое при приближении к единице стабилизируется на низком уровне порядка 100–200 кН.

На зависимости опорной реакции от критерия  $c$  отмечается разрыв вблизи значения  $c = 1$ . Это своеобразная зона неопределенности. При таком значении критерия радиусы шкивов  $r_0 = r_A$ . В этом случае мгновенный центр скоростей уходит в бесконечность  $l_{OD} = \infty$ . Угловая скорость барабана, определяемая по формуле (1), принимает нулевое значение  $\omega = 0$ . Барабан перестает вращаться, и процесс измельчения в нем прекращается.

Таким образом, анализ изменения динамических нагрузок и представленный материал дают возможность оценить влияние различных факторов на их величину. Установлено, что эти нагрузки на протяжении одного оборота водила изменяются по косинусоидальному закону, но их амплитуда при этом не очень велика. Величина динамических

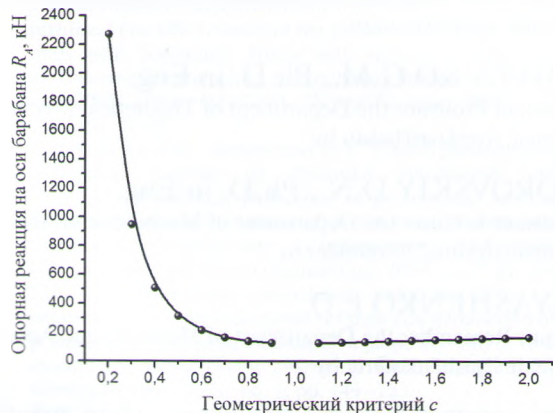


Рисунок 8 — Зависимость опорной реакции от геометрического критерия  $c$  при  $k = 0,4$ ;  $b = 1,0$

нагрузок существенно зависит от угловой скорости водила и степени загрузки барабана. В довольно широком диапазоне на динамические нагрузки можно влиять изменением геометрических соотношений элементов ременного привода. Но здесь нужно быть очень осторожным, так как снижение этих нагрузок достигается за счет уменьшения инерционных сил. При этом ослабляется инерционное воздействие на разрушаемый материал и эффективность измельчения может резко снижаться. По этой причине между двумя указанными процессами необходимо находить компромисс. Конечно, определяющей является эффективность измельчения и уже при ее стабильно высоких значениях можно, варьируя параметрами, пытаться снизить динамические нагрузки на элементы конструкции планетарной мельницы.

Основную динамическую нагрузку в планетарной мельнице воспринимают опорные узлы помольных барабанов. Для агрегатов непрерывного действия — это полые цапфы и подшипники. Что касается центральной оси, то при симметричном расположении барабанов эти нагрузки уравновешиваются и их величина незначительна.

**Заключение.** В работе приведен анализ изменения динамических нагрузок на узлы планетарной мельницы с ременным приводом, основанный на решении уравнений кинестатики. Установлены факторы, влияющие на эти нагрузки, дана их оценка. Основными из них являются частота вращения, степень загрузки, геометрические параметры мельницы и привода. Методика расчета и результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы при конструировании промышленных образцов планетарных мельниц.

#### Список литературы

1. Biocompatible polymer composites based on ultrahigh molecular weight polyethylene perspective for cartilage defects

- replacement / F.S. Sanatov [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. — 2014. — Vol. 586. — Pp. 544–547.
2. Исследование фазового состава механически активированных смесей Cr-Al-Si-V и полученных из них СВС-продуктов / Е.И. Пацера [и др.] // Цветная металлургия. — 2015. — № 1. — С. 73–78.
3. Ядыкина, В.В. Влияние активности наполнителей из техногенного кремнеземсодержащего сырья на прочность цементных систем / В.В. Ядыкина, А.И. Траутвайн // Фундаментальные исследования. — 2015. — № 5, ч. 1. — С. 174–179.
4. Sundararajan, T. Spark plasma sintering of microwave processed nanocrystalline barium titanate and their characterizations / T. Sundararajan, B.S. Prabu // Materials Chemistry and Physics. — 2013. — № 139. — Pp. 465–470.
5. Planetary mills of periodic and continuous action / E.I. Fokina [et al.] // Journal of Materials Science. — 2004. — Vol. 39, № 16–17. — Pp. 5217–5221.
6. Структурно-морфологические изменения в системе гидрооксид титана — кремнезем-натриевая щелочь в условиях ультраизмельчения / Л.Г. Герасимова [и др.] // Перспективные материалы. — 2014. — № 10. — С. 72–78.
7. Вайтехович, П.Е. Особенности движения загрузки в планетарных мельницах с внутренней обкаткой / П.Е. Вайтехович, Д.В. Семенов // Теоретические основы хим. технологии. — 2005. — Т. 39, № 5. — С. 568–572.
8. Вайтехович, П.Е. Влияние взаимодействия между мелющими телами на характер их движения в планетарной мельнице / П.Е. Вайтехович, Д.В. Семенов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2010. — № 9. — С. 13–15.
9. Вайтехович, П.Е. Эффективность разрушающего воздействия мелющих тел в горизонтальной планетарной мельнице / П.Е. Вайтехович, Г.М. Хвесько, П.С. Козлов // Тр. БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорганич. в-в. — 2013. — Вып. III. — С. 182–187.
10. Семенов, Д.В. Эффективность процесса помола в планетарных мельницах с горизонтальным расположением барабанов при водопадном режиме / Д.В. Семенов, П.Е. Вайтехович, Д.В. Юхневич // Научни дни — 2008. Технология: материалы МНТК, София, 1–15 апр. 2008 г. / ООД «БялГРАД-БГ»; редкол.: М.Т. Петков [и др.]. — София, 2008. — Т. 16. — С. 59–63.
11. Вайтехович, П.Е. Влияние геометрических параметров привода на динамику планетарных мельниц с внутренней обкаткой / П.Е. Вайтехович, Д.В. Семенов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2004. — № 7. — С. 6–8.
12. Ким, Б.Г. Определение положения помольной среды в планетарной мельнице при каскадном режиме / Б.Г. Ким // Изв. вузов. Горный журнал. — 1976. — № 1. — С. 149–153.
13. Звевич, Л.И. Геометрия: справ. пособие / Л.И. Звевич, А.Р. Рязановский. — М.: Дрофа, 2012. — 128 с.

**VAITEKHOVICH P.E., D.Sc. in Eng., Prof.**

Head of the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Productions<sup>1</sup>

E-mail: vpe51@mail.ru

**KHVES'KO G.M., Ph.D. in Eng.**

Assistant Professor the Department of Theoretical Mechanics<sup>1</sup>

E-mail: hveskog@belstu.by

**BOROVSKIY D.N., Ph.D. in Eng.**

Assistant Lecturer the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Productions<sup>1</sup>

E-mail: dzianis23@rambler.ru

**ILYASHENKO E.O.**

Junior Researcher the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Productions<sup>1</sup>

E-mail: ilyashenko@tut.by

<sup>1</sup>Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus

## THE INFLUENCE OF CONSTRUCTIVE AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON DYNAMIC LOADS IN ELEMENTS OF A PLANETARY MILL WITH A BELT DRIVE

The issues associated with determination of dynamic loads encountered in moving the nodes of the planetary mill with a belt drive are considered. The analysis of the influence of constructive and technological parameters on their size is carried out. For the study, a horizontal planetary mill was chosen, since it has great potential for organizing a closed grinding cycle with continuous loading and unloading of the material. A computational scheme was compiled, the analysis of which showed that the problem can be solved in the same plane. Since the geometric parameters of individual units of the aggregate exert a great influence on the nature of the feeding motion in the grinding drums of a planetary mill, geometric criteria reflecting the relationship between these parameters were derived. During the power calculation of the planetary mill drive, inertial forces were determined that exert a significant influence on the motion. Taking into account previously determined forces, the equations of kinetostatics were compiled. From these equations, expressions were obtained for determining the final sought-for value-reaction on the drum axis. Approbation of the methodology for calculating this reaction was carried out on a planetary mill with the dimensions of a real industrial facility. In the course of the study, parameters such as the angular velocity of the carrier, the ratio of the geometric parameters and the degree of loading of the drums varied. Changes in the required parameters were analyzed during one complete rotation of the carrier. As a result of the study, a number of dependencies were obtained. Having made an assessment of the results obtained, it can be noted that the change in the reference reaction occurs according to the cosine law in a small range. It is also established that an increase in the angular velocity and the loading factor leads to a significant increase in dynamic loads. In addition, the influence of the ratio of the dimensions of individual units of the aggregate on the magnitude of dynamic loads was investigated. The overall result of the work is the development of a method for calculating dynamic loads on the support nodes of a planetary mill, taking into account the effect of the maximum number of parameters.

**Keywords:** planetary mill, rotational speed, mill loading, bearing assembly, drum volume, belt drive, gear drive, dynamic loads, support reaction

### References

- Sanatov F.S., Gorshenkov M.V., Kaloshkin S.D., Tcherdyntsev V.V., Anisimova N.Yu., Kopylov A.N., Kiselevsky M.V. Biocompatible polymer composites based on ultrahigh molecular weight polyethylene perspective for cartilage defects replacement. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, vol. 586, pp. 544–547.
- Patsera E.I., Kurbatkina V.V., Levashov E.A., Umarov L.M. Issledovanie fazovogo sostava mehanicheski aktivirovannyh smesey Cr-Al-Si-B i poluchennyh iz nih SVS-produktov [The study of the phase composition of mechanically activated mixtures of Cr-Al-Si-B and derived products SHS]. *Cvetnaja metallurgiya* [Non-ferrous metallurgy], 2015, no. 1, pp. 73–78.
- Yadykina V.V., Trautvain A.I. Vliyanie aktivnosti napolnitel'ey iz tehnogennogo kremnezemsoederzhashhego syr'ya na prochnost cementnyh sistem [The impact of anthropogenic activity fillers siliceous raw strength of cement systems]. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental research], 2015, no. 5, vol. 1, pp. 174–179.
- Sundararajan T., Prabu B.S. Spark plasma sintering of microwave processed nanocrystalline barium titanate and their characterizations. *Materials Chemistry and Physics*, no. 139(2013), pp. 465–470.
- Fokina E.I. [et al.] Planetary mills of periodic and continuous action. *Journal of Materials Science*, 2004, vol. 39, no. 16–17, pp. 5217–5221.
- Gerasimova L.G., Kuzmich U.V., Shchukin E.S., Semushin V.V. Strukturno-morfologicheskie izmeneniya v sisteme gidrooksid titana – kremnezem-natrievaya shheloch v usloviyah ultraizmelcheniya [Structural and morphological changes in the system of titanium hydroxide – sodium alkali-silica under ultraizmelcheniya]. *Perspektivnye materialy* [Advanced materials], 2014, no. 10, pp. 72–78.
- Vaytekhovich P.Ye., Semenenko D.V. Osobennosti dvizheniya zagruzki v planetarnykh melnicah s vnutrennej obkatkoj [Features motion download in planetary mills with internal running-in]. *Teoreticheskie osnovy khim. tekhnologii* [Theoretical Foundation of Chemical Engineering], 2005, vol. 39, no. 5, pp. 568–572.
- Vaytekhovich P.Ye., Semenenko D.V. Vliyanie vzaimodejstviya mezhdu meljushhimi telami na karakter ih dvizheniya v planetarnoj melnice [Influence of interaction between the grinding bodies on the character of their motion in a planetary mill]. *Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie* [Chemical and petroleum engineering], 2010, no. 9, pp. 13–15.
- Vaytekhovich P.Ye., Khvesko G.M., Kozlov P.S. Jefferktivnost razrushajushhego vozdeystviya meljushhih tel v gorizontальной planetarnoj melnice [The effectiveness of the damaging effects of grinding media in the horizontal planetary mill]. *Trudy BGTU. "Himija i tekhnologija neorgan. v-v."* [Proceedings of BSTU "Chemistry and Technology of Inorganic Substances"], 2013, vol. 3, pp. 182–187.
- Semenenko D.V., Vaytekhovich P.Ye., Yukhnevich D.V. Jefferktivnost processa pomola v planetarnykh melnicah s gorizontальnym raspolozheniem barabanov pri vodopadnom rezhime [The effectiveness of the grinding process in planetary mills with horizontal drums with waterfall mode]. *Trudy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Nauchni dni–2008"* [Proc. Int. Conf. "Scientific days–2008"]. Sofia, 2008, pp. 59–63.
- Vaytekhovich P.Ye., Semenenko D.V. Vliyanie geometricheskikh parametrov privoda na dinamiku planetarnykh melnic s vnutrennej obkatkoj [Influence of geometrical parameters of the drive on the dynamics of planetary mills with internal running-in]. *Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie* [Chemical and petroleum engineering], 2004, no. 7, pp. 6–8.
- Kim B.G. Opredelenie polozheniya pomolnoj sredy v planetarnoj melnice pri kaskadnom rezhime [Determination of the position of the grinding medium in a planetary mill in cascade mode]. *Izv. vuzov. Gornyj zhurnal* [Higher Education News. Mining Journal], 1976, no. 1, pp. 149–153.
- Zvavich L.I., Riasanovsky A.R. *Geometrija. Spravochnoe posobie* [Geometry. A Reference Guide]. Moscow, Drofa, 2012. 128 p.