

УДК 621.926

П. Е. Вайтехович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой (БГТУ);
Г. М. Хвесько, кандидат технических наук, доцент (БГТУ);
П. С. Козлов, магистрант (БГТУ)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗРУШАЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МЕЛЮЩИХ ТЕЛ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛАНЕТАРНОЙ МЕЛЬНИЦЕ

В статье представлены методы расчета разрушающей способности мелющих тел, содержащихся в планетарной мельнице с внешней обкаткой барабанов, при основных видах деформации, таких как сжатие, удар и истирание. Приведены результаты расчета за один полный оборот водила при различных угловых скоростях размольного барабана. Установлено, что разрушающие напряжения при всех видах нагружения превышают предел прочности материала.

The paper presents methods for calculating the destructive capacity of grinding media contained in a planetary mill, the main types of deformation such as compression, impact and abrasion. The results of calculation for one complete revolution drove at different angular speeds grinding drum. Found that the breaking strength of all types of loading exceeds the tensile strength of the material.

Введение. Планетарные мельницы являются высокоэффективными измельчающими агрегатами. Их исследования проводятся во многих странах, в том числе и авторами данной работы [1]. Изучена механика и установлены основные режимы движения мелющих тел в помольном барабане. Определены границы характерных зон загрузки в целом. Они распределяется в виде сегмента, смещенного относительно водила на некоторый угол [2]. В пределах сегмента можно выделить зоны безотрывного движения, скольжения и отрыва, каждая из которых характеризуется преимущественным способом разрушающего воздействия на материал: раздавливанием, истиранием и ударом.

Влияние каждого из указанных способов воздействия на эффективность измельчения оценивалось только косвенно, без расчета разрушающих напряжений. В связи с этим целью данной работы является количественная оценка разрушающего воздействия мелющих тел на измельчаемый материал.

Основная часть. В качестве объекта для аналитических исследований выбрана горизонтальная планетарная мельница с внешней обкаткой. Как и в большинстве исследованных ранее вариантов конструкций, радиус барабана принят $r = 0,1$ м, геометрический критерий $k = r/R = 0,5$, степень загрузки 50%. Поскольку экспериментальные исследования показали, что наибольшая эффективность достигается при центрифугальном режиме движения загрузки, то анализу подвергался только этот режим. Изменение границ помольных зон для него представлено на рис. 1. Видно, что для устойчивого центрифугального режима основной зоной является безотрывное движение, но ближе к центру барабана имеет место скольжение и даже отрыв мелющих тел с последующим их падением.

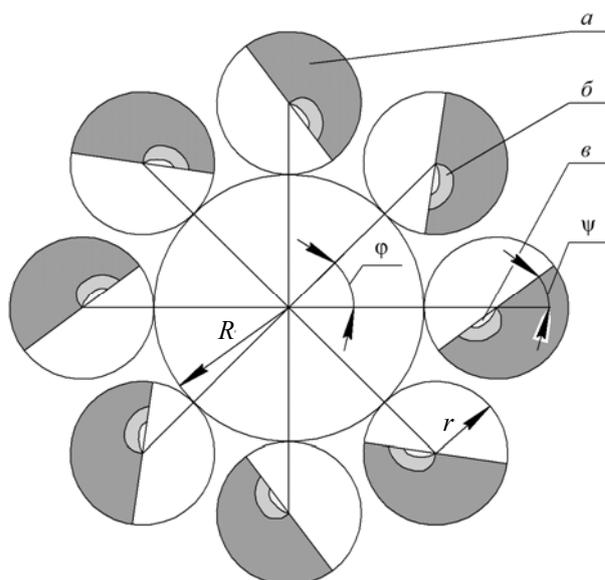


Рис. 1. Изменение границ помольных зон:
 а – сжатие; б – удар; в – истирание

Ввиду того что разрушающие напряжения в планетарной мельнице ранее не рассчитывались, принято решение по возможности установить их максимальные значения в характерных точках сегмента загрузки. Таковыми являются точки зоны безотрывного движения, соприкасающиеся со стенкой барабана, и точки по внешней границе двух других зон. Причем в зонах скольжения и отрыва напряжения в разрушаемом материале определялись только в одной точке, находящейся на пересечении границы зоны и прямой, проведенной через центр барабана, перпендикулярно водилу. Руководствуясь принципом достижения максимальных напряжений, в качестве основного технологического параметра принята максимальная угловая скорость барабана $\omega = 180$ рад/с. С целью сравнения расчеты проводились и для уг-

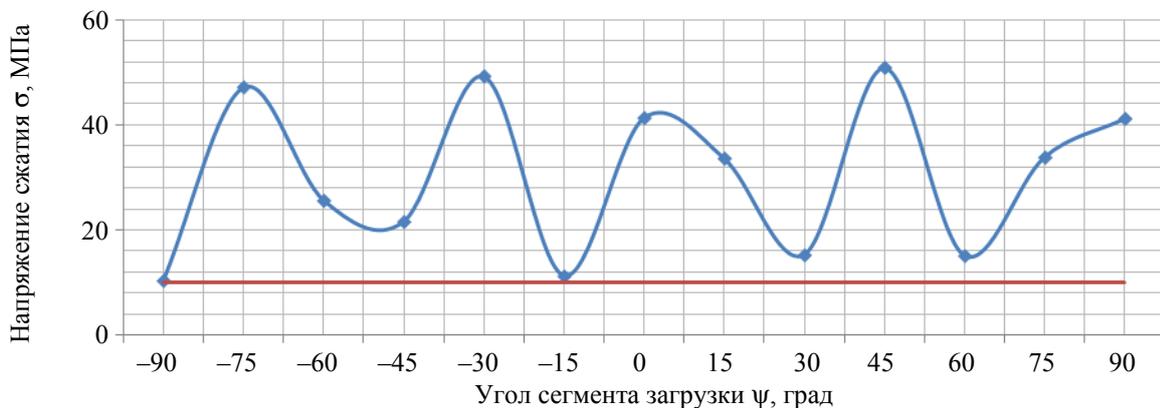
ловой скорости $\omega = 90$ рад/с. Диаметр мелющих тел (стальных шаров) принят $d = 18,5$ мм, частиц измельчаемого материала – 3 мм. В качестве измельчаемого материала при аналитических исследованиях использовался гипсовый камень с пределом прочности на сжатие $\sigma_{сж} = 10$ МПа. На начальном этапе исследовалась преобладающая в данном случае зона сжимающего воздействия. Сила давления мелющих тел на частицу материала, находящегося на поверхности барабана, рассчитывалась по предложенной ранее модели [3] с учетом взаимодействия мелющих тел:

$$F_{pi} = 2r_{ш}^2\rho \left(\omega^2 \frac{(r_i + r_{ш})^2 - r_0^2}{2} + (r_i + r_{ш} - r_0) \times \left(\frac{\omega^2 k^2 R}{1+k} \cos(\psi - \varphi) - g \sin \psi \right) \right), \quad (1)$$

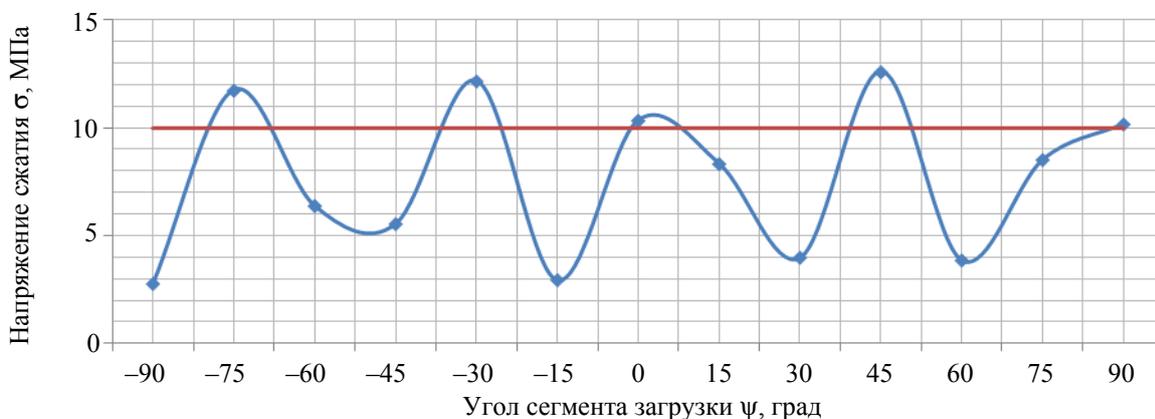
где $r_{ш}$ – радиус мелющего тела, м; ρ – плотность измельчаемого материала, кг/м³; r_i – текущий радиус, м; r_0 – нулевой радиус, м; ω – угловая скорость барабана, рад/с; ψ , φ – текущий угол и угол поворота водила соответственно, град.

Расчеты сжимающих напряжений проводились при фиксированном положении барабана с углом поворота водила $\varphi = 45^\circ$ (рис. 1). При этом определялось их значение по всему сегменту загрузки с интервалом $\psi = 15^\circ$. Результаты расчета, представленные на рис. 2, свидетельствуют о том, что в пределах сегмента загрузки сжимающие напряжения изменяются циклически. Таким образом, даже в одном фиксированном положении процесс воздействия мелющих тел на материал не статичен. Естественно, в каждом новом положении силовое воздействие будет изменяться, и за счет этого обеспечится нестационарное динамическое разрушение материала. О том, что разрушение происходило бы даже при статическом приложении нагрузки, свидетельствует величина сжимающих напряжений (рис. 2), которая при угловой скорости барабана $\omega = 180$ рад/с в пределах всего сегмента загрузки превышает предел прочности гипсового камня на сжатие.

С уменьшением угловой скорости до 90 рад/с разрушение материала будет происходить только в отдельных местах сегмента, где отмечаются пиковые значения напряжений.



а



б

Рис. 2. Изменение сжимающих напряжений в сегменте загрузки:
а – $\omega = 180$ рад/с, $\varphi = 45^\circ$; б – $\omega = 90$ рад/с, $\varphi = 45^\circ$

Но с учетом динамизма процесса можно утверждать, что даже при такой угловой скорости материал будет разрушаться, хотя и менее эффективно. Этот факт, кстати, подтверждается экспериментальными данными [4].

Оценить ударное воздействие гораздо сложнее, чем раздавливающее. Здесь необходимо определить силу удара мелющего тела о частицу материала и площадь их контакта в момент удара. Силу удара можно определить через ударный импульс:

$$mv = F_y \tau, \quad (2)$$

где m – масса мелющего тела, кг; v – скорость тела в момент удара, м/с; τ – время разрушения, с.

Время деформации $\tau = 2L / c$, где L – характерный размер разрушаемой частицы, м; c – скорость звука в твердом теле, м/с.

Неизвестной остается скорость соударения. Скорость полета мелющего тела после отрыва можно определить, трансформировав разработанную и опробованную нами методику расчета высоты его падения [5].

Уравнения движения мелющего тела по криволинейной траектории имеют вид:

$$x = R(1+k)\sin\varphi_0 + r\sin\psi_0 + \omega kR(\cos\varphi_0 + \cos\psi_0)t; \quad (3)$$

$$y = -R(1+k)\cos\varphi_0 - r\cos\psi_0 + \omega kR(\sin\varphi_0 + \sin\psi_0)t - \frac{gt^2}{2}. \quad (4)$$

Совместное решение этих уравнений с уравнением окружности барабана позволяет определить координаты соприкосновения мелющего тела с ним и время полета:

$$t = \frac{x - R(1+k)\sin\varphi_0 + r\sin\psi_0}{\omega kR(\cos\varphi_0 + \cos\psi_0)}. \quad (5)$$

Продифференцировав уравнения (3) и (4), получим расчетные зависимости для определения составляющих скорости движения мелющего тела по криволинейной траектории:

$$x' = \omega kR(\cos\varphi_0 + \cos\psi_0); \quad (6)$$

$$y' = \omega kR(\sin\varphi_0 + \sin\psi_0) - gt. \quad (7)$$

Подставив в уравнения (6) и (7) значение времени падения, рассчитанное по формуле (5), определим составляющие x' и y' и полную скорость во время удара $v = \sqrt{(x')^2 + (y')^2}$.

Для упрощения примем, что измельчаемый материал в момент удара остается неподвижным и при соприкосновении мелющего тела с частицей реализуется прямой удар. Ситуация, конечно,

несколько идеализирована, но на начальной стадии исследований это вполне допустимо, и, главное, такое допущение дает возможность по уравнению (2) сразу рассчитать силу удара F_y .

Для определения площади контакта используем методику, основанную на теории Герца и опробованную Шаратовым [6].

Площадь контакта предлагается рассчитывать по формуле

$$S = 2\pi R_2^2 - \pi R_2 \times \sqrt{4R_2^2 - R_2^2[(2R_1 - h)h] \frac{4R_1R_2 - 2R_1h + 4R_2^2 - 4R_2h + h^2}{R_2^2(R_1 + R_2 - h)^2}}, \quad (8)$$

где R_1 , R_2 – соответственно радиус шара и материала, м; h – глубина проникновения мелющего тела сферической формы в измельчаемый материал, м.

Значение h определялось исходя из выражения

$$h = \left(\frac{15m_1m_2(v_1 - v_2)^2 \sqrt{R_1 + R_2}}{16(m_1 + m_2)\sqrt{R_1R_2}} \right)^{2/5} \times \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^{2/5}, \quad (9)$$

где m_1 , m_2 – соответственно масса шара и измельчаемой частицы, кг; E_1 , E_2 – модуль Юнга мелющего тела и материала; μ_1 , μ_2 – коэффициенты Пуассона для шара и материала; v_1 , v_2 – скорости, с которыми двигаются соответственно шар и материал, м/с.

Еще одним проблемным вопросом является определение предела прочности материала при ударе, связь которого с пределом прочности на сжатие ($\sigma_y = 1,2\sigma_{сж}$) удалось установить косвенно из работ Черепанова [7].

Предложенный алгоритм расчета ударных напряжений был реализован для всех восьми положений размольного барабана (рис. 3).

Расчетные зависимости (рис. 3) показывают, что ударные напряжения значительно выше сжимающих и на несколько порядков превышают предел прочности материала при таком виде нагружения. Причем изменение угловой скорости от 180 до 90 рад/с не существенно влияет на величину напряжений. Интересным фактом является и то, что ударное разрушающее воздействие проявляется только в диапазоне углов поворота водила $\varphi = 90 - 270^\circ$. Объяснение этому кроется в относительном движении барабана и мелющих тел в остальных трех положениях $\varphi = 315^\circ$; 0° ; 45° . Здесь барабан поднимается вверх и догоняет оторвавшееся и падающее мелющее тело.

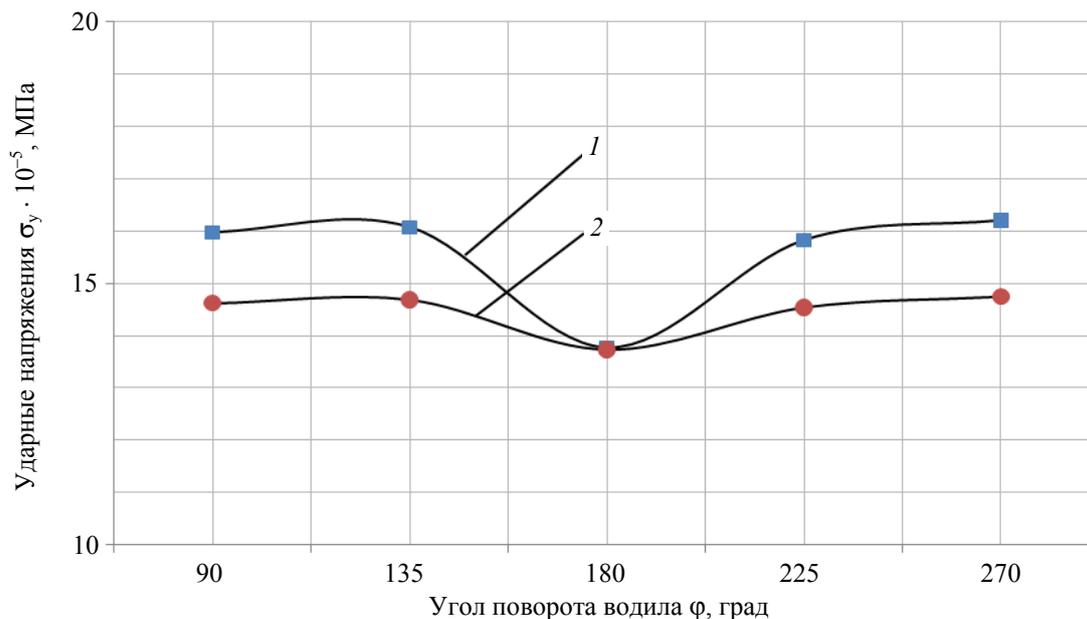


Рис. 3. Изменение ударных напряжений за один оборот водила: 1 – $\omega = 180$ рад/с; 2 – $\omega = 90$ рад/с

Эти рассуждения подтверждаются расчетными значениями высоты падения мелющих тел, представленными в работе [5]. Она приближается к нулевому значению. Некоторое снижение ударных напряжений при $\varphi = 180^\circ$ объясняется уменьшением воздействия на траекторию падения мелющего тела переносной инерционной силы, направленной горизонтально вдоль водила.

С определенными трудностями авторы столкнулись при определении истирающих напряжений. Процесс истирающего разрушения изучен слабо, нет его надежных и адекватных физических и математических моделей. Поэтому воспользуемся одной из них, предложенной ведущим специалистом по теории измельчения Ходаковым [8]. Она основана на аналогии процессов истирающего разрушения при шлифовании (рис. 4).

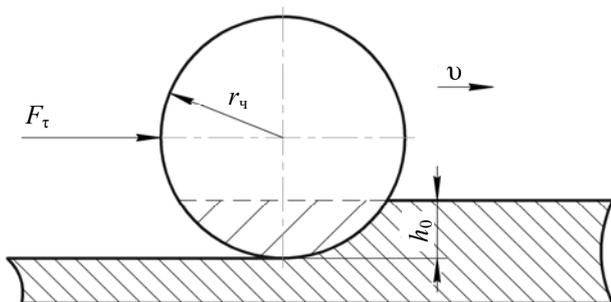


Рис. 4. Расчетная схема определения площади сегмента

Предположим, что мелющее тело за счет силы давления внедряется в материал на глубину h_0 и под действием тангенциального усилия F_τ срезает слой материала.

Тангенциальное усилие определим из условия скольжения мелющих тел в сегменте загрузки $F_\tau \geq fN$, где N – нормальная реакция связи; f – коэффициент трения скольжения. Нормальная реакция связи противоположно направлена и равна по модулю силе давления $|N| = |F_p|$, рассчитываемой по формуле (1).

Площадь контакта S_c мелющего тела с частицей материала при истирании является сегментом, ограниченным радиусом шара $r_\text{ч}$ и глубиной его проникновения h_0 в материал (рис. 4), и рассчитывается по формуле

$$S_c = \frac{1}{2(r_\text{ч}l - c(r_\text{ч} - h_0))}, \quad (10)$$

где

$$c = 2\sqrt{h_0(2r_\text{ч} - h_0)}, \quad (11)$$

$$l = 0,01745r_\text{ч}\alpha, \quad (12)$$

здесь α – угол, в который заключен искомый сегмент, град.

Глубина проникновения мелющего тела в частицу материала h_0 согласно с теорией Герца определялась из уравнения

$$h_0 = \left[\frac{3N(1-\mu^2)}{4E} \right]^{2/3} r_0^{-1/3}, \quad (13)$$

где μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости измельчаемого материала, МПа.

Предел прочности при срезе согласно модели Прандтля [8] $\tau_{\text{ср}} = \sigma_\tau / 2$, где σ_τ – предел текучести, составляющий 0,65 от предела прочности на сжатие.

Результаты расчета истирающих напряжений в тех же самых восьми положениях барабана, что и ударные, представлены на рис. 5.

Здесь можно отметить несколько особенностей.

Во-первых, истирающие напряжения соизмеримы с ударными и значительно выше сжимающих, а также предела прочности на срез. Во-вторых, при меньшей угловой скорости $\omega = 90$ рад/с истирающие напряжения имеют большие значения и характеризуются явным экстремумом при $\varphi = 180^\circ$.

Этот факт скорее всего обусловлен более высокой подвижностью скользящих мелющих тел (скоростью скольжения) из-за уменьшения силы давления. Пиковое значение напряжения проявляется в тот момент, когда переносная инерционная сила максимально способствует повышению этой подвижности. При значительном увеличении угловой скорости барабана (до 180 рад/с) скольжение мелющих тел уменьшается. Зона с таким движением постепенно трансформируется в безотрывную. Поэтому истирающие напряжения уменьшаются и стабилизируются по величине.

Полученные результаты можно считать первым шагом в изучении разрушающего воздействия мелющих тел в планетарной мельнице. Они требуют детального анализа, дополнительных расчетов, экспериментальной проверки.

Пока нельзя делать скорополительных выводов о преимуществах какого-то способа воздействия с точки зрения эффективности измельчения. Несмотря на то, что сжимающие напряжения значительно ниже ударных и истирающих, цикличность их изменения существенно выше. Кроме того, площадь зоны безотрывного движения намного превышает две другие.

Поэтому для адекватной оценки каждого из способов необходимо развивать исследования в направлении совершенствования физической и математической моделей разрушения материалов в планетарной мельнице. Важным является и определение пределов прочности измельчаемых материалов при различных способах нагружения. Весь этот комплекс работ предстоит решить в будущем.

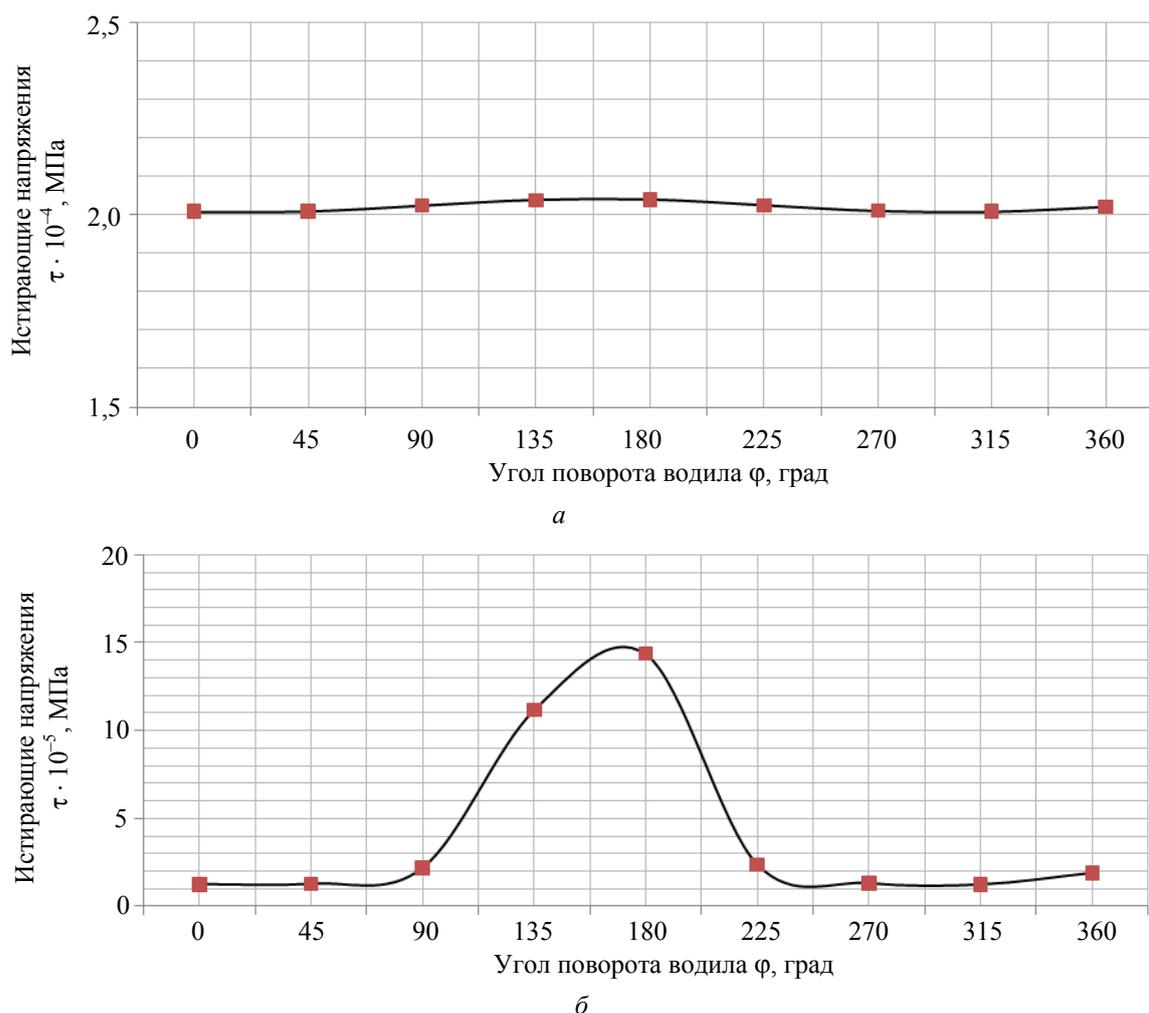


Рис. 5. Изменение истирающих напряжений за один оборот водила:
 $a - \omega = 180$ рад/с; $b - \omega = 90$ рад/с

Заключение. В представленной работе сделана попытка увязать механику движения мелющих тел с их разрушающим воздействием на измельчаемый материал. Предложена методика и алгоритм расчета разрушающих напряжений при раздавливающем, ударном и истирающем воздействиях. Показано, что при всех видах нагружения разрушающие напряжения превышают предел прочности материала.

Работу можно считать начальным этапом в новом направлении исследования планетарной мельницы. Она имеет хорошие перспективы как в научном, так и в практическом плане.

Литература

1. Вайтехович, П. Е. Интенсификация и моделирование процессов диспергирования в поле инерционных сил / П. Е. Вайтехович. – Минск: БГТУ, 2008. – 220 с.

2. 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.

3. Вайтехович, П. Е. Анализ моделей относительного движения мелющих тел в планетарной мельнице / П. Е. Вайтехович, Д. В. Семенов, Г. М. Хвесько // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорганич. в-в. – 2010. – Вып. XVIII. – С. 167–171.

4. 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 IV Междунар. науч.-практ. конф., София, 1–15 апр. 2008 г. / ООД «БялГРАД-БГ»; редкол.: М. Т. Петков [и др.]. – София, 2008. – Т. 16. – С. 59–63.

5. Хвесько, Г. М. Методика определения высоты и времени падения мелющего тела в планетарной мельнице с внешней обкаткой барабанов / Г. М. Хвесько, П. Е. Вайтехович, Д. В. Семенов // Новината за напредна наука – 2012: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф., София, 17–25 мая 2012 г. / ООД «БялГРАД-БГ»; редкол.: М. Т. Петков [и др.]. – София, 2012. – Т. 25. – С. 36–38.

6. Шарапов, Р. Р. Научные основы создания технологических систем помола цемента на основе шаровых мельниц замкнутого цикла: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.13 / Р. Р. Шарапов; Белгород. гос. технол. ун-т. – 2009. – 38 с.

7. Черепанов, Г. П. Механика хрупкого разрушения / Г. П. Черепанов. – М.: Наука, 1974. – 640 с.

8. Ходаков, Г. С. Механизм абразивного шлифования стекла / Г. С. Ходаков // Оптико-механическая пром-сть. – 1985. – № 5. – С. 31–36.

Поступила 25.02.2013