

Э. И. Левданский, профессор; А. Э. Левданский, доцент; П. С. Гребенчук, студент

ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ УДАРОМ И НЕКОТОРЫЕ ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

In the given work the description of a new design of a centrifugal percussion mill is produced. Researches have shown, that this construction allows to receive more homogenous product and to lower energy consumption compared to other constructions. The technique of calculation of a drive power of a given mill is offered.

Вопрос энергопотребления с каждым годом становится все острее, так как цены на энергоресурсы постоянно возрастают. Энергоемкость является основным из показателей любого технологического процесса. Одним из наиболее энергоемких является процесс измельчения материалов и особенно тонкого, то есть процесс помола. Мощность привода барабанной шаровой мельницы в ряде производств в настоящее время достигает 15 тыс. кВт, а расход электроэнергии на измельчение составляет около 10% ее мирового производства [1]. Такой расход энергии обусловлен не только большими объемами материала, подвергаемого измельчению, но и низкой эффективностью машин, применяемых для этих целей. Например, барабанные шаровые мельницы, которые с незначительными усовершенствованиями эксплуатируются в производстве более ста лет, и сегодня продолжают оставаться основным мельничным агрегатом в большинстве производств, имеют КПД около 1%, а остальные 99% энергии в конечном итоге безвозвратно теряются в виде тепла в окружающую среду [2]. В то же время, несмотря на большое количество ежегодно патентуемых новых конструкций мельниц, более простой и надежной в эксплуатации, особенно в крупнотоннажном производстве, мельницы, чем барабанная, на сегодня не существует, этим и объясняется ее долгожительство.

Для измельчения материалов используются в основном механические способы, такие, как раздавливание, удар, раскалывание, разламывание, истирание и т. д. Зачастую в одном агрегате измельчение может одновременно осуществляться несколькими способами, что и происходит, например, в барабанной шаровой мельнице. Помимо механических, предложены и другие способы измельчения, однако они пока находятся на стадии лабораторных исследований и, видимо, широкого внедрения их в производство в ближайшее время ожидать не приходится.

Теоретические и экспериментальные исследования по теории удара, ударному нагружению и разрушению [2, 3], проведенные в последние десятилетия, показывают, что

наименьший расход энергии требуется на измельчение ударом. Опытами установлено, что работа измельчения ударом составляет не более половины от работы измельчения раздавливанием и это объясняется тем, что высокоскоростное приложение ударной нагрузки способствует хрупкому разрушению материала (при низких температурах наблюдаются то же) [4]. Другие исследователи [5] указывают, что при ударном нагружении измельчаемого материала возникающие в нем напряжения как минимум в 2 раза больше, чем при статическом нагружении.

Таким образом, динамическое нагружение при высокоскоростном ударе, возможность свободного разрушения единичных кусков, а также немедленный вывод продуктов разрушения из рабочей зоны создают предпосылки для рациональной организации процесса измельчения материалов за счет ударного их нагружения.

Наряду с исследованиями по ударному разрушению создавались машины, основанные на этом способе измельчения. В настоящее время разработано большое количество таких измельчителей, но наибольшее практическое применение нашли молотковые и роторные дробилки. Видимо, и в данном случае широкое их применение обусловлено простотой конструкции и надежностью в эксплуатации. Эти машины обеспечивают высокую степень дробления, которая достигает $i = 50$, отличаются большой удельной производительностью и высоким качеством готового продукта, форма которого близка к кубической, а удельный расход энергии на дробление значительно ниже, чем в дробилках, в которых используется другой способ измельчения.

Рабочим органом молотковых дробилок являются молотки, закрепленные на роторе шарнирно, а роторных – била, которые жестко закреплены на роторе. Однако было бы неправильно думать, что в этих машинах материал измельчается только при ударе по нему молотков или бил. Материал на измельчение подается сплошным потоком и поэтому вращающиеся била или молотки не могут по каждому отдельному куску нанести разрушающий удар, а следовательно, значительная

часть материала измельчается при ударе об отражательные плиты боковой стенки корпуса, а также за счет столкновения кусков материала между собой.

Существенным недостатком обеих конструкций ударных измельчителей является большой разброс измельченного продукта по дисперсному составу. Для получения более тонкого продукта однородного состава в молотковых измельчителях с боковой поверхности была удалена значительная часть отражательных плит, а вместо них установлена перфорированная обечайка (колосниковая решетка, металлический лист с отверстиями). Назначение такой обечайки – задерживать крупную фракцию в измельчителе, а через отверстия должен проходить готовый продукт требуемого размера. Такие машины нашли широкое применение и ими практически полностью оснащены комбикормовые заводы, сельскохозяйственные предприятия, многие электростанции, работающие на угле и т. д.

Поскольку количество отражательных плит уменьшилось, естественно, качество измельчения ухудшилось, а так как через отверстия перфорации могут проходить частицы определенной величины, то недоизмельченный материал накапливается в мельнице, и, в зависимости от нагрузки, образуется вращающийся кольцевой слой материала, который мешает прохождению через отверстия частицам готового продукта. Вследствие этого за счет истирания происходит переизмельчение части готового продукта, а другая, недоизмельченная часть, центробежной силой вращающегося слоя продавливается через отверстия и уходит с готовым продуктом. В результате получается продукт неоднородного состава, а перфорированная обечайка быстро выходит из строя.

Опытами установлено [4, 5], что при измельчении зерна в молотковых измельчителях с перфорированной решеткой на измельчение ударом тратится не более 17% энергии, а остальная часть – на измельчение истиранием, что ведет к неоправданному перерасходу электроэнергии и быстрому выходу из строя решетки. Аналогичная картина наблюдается и в других конструкциях мельниц ударного измельчения с отводом готового продукта через отверстия решетки.

Таким образом, при всех положительных факторах измельчения ударом, для мельниц вопрос непрерывного отвода мелкой фракции (готового продукта) из зоны помола остается нерешенным.

Чтобы определить пути решения данной проблемы, рассмотрим механизм измельчения единичного зерна материала при ударе его о неподвижную стенку. Характер разрушения

зерна за счет удара дает упрощенная модель, предложенная И. Примером [6], которая в дальнейшем подтверждена экспериментальными исследованиями [6, 7, 8]. И. Пример разделил поперечное сечение измельчаемого шарообразного куска на зоны в зависимости от дисперсности полученных при разрушении осколков: в зоне контактирования со стенкой образуется конус из тонкодисперсных частиц; с противоположной стороны куска образуется остаточный конус, который в основном не разрушается; кроме того, образуется зона боковых осколков. При этом мелкие частицы не отскакивают от стенки в произвольном направлении, а разлетаются от центра удара вдоль стенки в радиальном направлении. Следовательно, в конструкции мельницы ударного измельчения необходимо создать условия, при которых мелкие частицы, как готовый продукт, двигаясь вдоль стенки, удалялись бы из зоны помола, а крупные, отскакивая от стенки, подвергались повторному удару.

Одна из конструкций мельниц, где в определенной степени выполняются эти условия, разработана нами и представлена на рис. 1. Ударно-центробежная мельница состоит из вертикального цилиндрического корпуса 1, который внутри футерован отражательными стержнями 2. Сверху к корпусу крепится крышка 3, по центру которой для подачи исходного материала установлена воронка 4. Снизу к корпусу мельницы с помощью фланцевого соединения крепится плоское днище 5. К днищу снаружи по центру крепится электродвигатель 6, вал которого через отверстие проходит внутрь мельницы. Для выгрузки продуктов измельчения из мельницы по краю днища проделан полукольцевой канал, к которому крепится спиралеобразный патрубок 7. Внутри мельницы на вал электродвигателя насажен диск 8, на котором по радиусу жестко закреплены сверху разгонные 9, а снизу отбойные 10 лопатки.

При работе мельницы от электродвигателя 6 приводится во вращение диск 8 с лопатками 9 и 10, и через воронку 4 подается на измельчение материал. При вращении диска с лопатками в центре будет создаваться разрежение, за счет чего в мельницу через воронку 4 будет поступать и воздух, который, проходя через каналы между разгонными лопатками, достигает стенки, далее двигаясь по спирали, опускается вниз и через полукольцевой спиралеобразный патрубок 7 вместе с измельченным материалом удаляется из мельницы. Чтобы в мельницу поступало ограниченное количество воздуха, и тем самым уменьшался расход энергии на работу мельницы как вентилятора, разгонные лопатки 9 выполняются небольшой высоты.

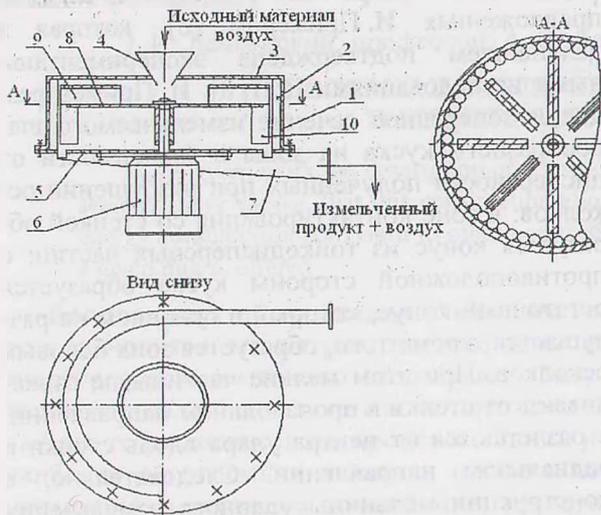


Рис. 1. Роторная мельница многократного ударного нагружения материала:

- 1 – корпус; 2 – отражательные стержни; 3 – крышка;
4 – воронка; 5 – днище; 6 – электродвигатель;
7 – спиралеобразный патрубкок; 8 – диск;
9 – разгонные лопатки; 10 – отбойные лопатки

Куски материала, подаваемого на измельчение через воронку 4, могут попадать на диск 8 или под воздействием воздушного потока сразу на лопатки 9, но в конечном итоге все они быстро достигнут лопаток. Двигаясь по лопаткам, материал разгоняется до высоких скоростей и, срываясь с них, ударяется об отражательные стержни 2. Естественно, частота вращения диска с лопатками должна быть достаточной, чтобы обеспечить скорость кускам материала, при которой они за счет удара будут разрушаться.

Согласно ранее рассмотренной модели, при ударном разрушении будут образовываться как мелкие, так и более крупные частицы. Мелкие частицы разлетаются вдоль отражательной поверхности, и в нашем случае они будут подхватываться нисходящим вихревым потоком воздуха и вместе с ним, вращаясь, опускаться вниз. Более крупные частицы будут отскакивать от отражательной поверхности и попадать под удар лопаток. Но при полете от отражательной поверхности к лопаткам они за счет силы тяжести и воздействия воздушного потока несколько опустятся вниз и уже попадут под удар отбойных лопаток. При ударе об отбойные лопатки частицы будут частично разрушаться и далее, двигаясь по ним, разгоняться и отбрасываться на отражательные стержни, где снова дополнительно будут разрушаться. Дополнительное ударное разрушение может происходить многократно, пока частицы не опустятся вниз и вместе с воздухом через спиралеобразный патрубкок не удалятся из мельницы.

Таким образом, в данной мельнице материал не задерживается и не накапливается в рабочей зоне, измельчение происходит только за счет ударов, причем ударному нагружению подвергаются крупные частицы, так как только они при ударе отскакивают от стенки и попадают под удар лопаток. Следовательно, измельченный продукт должен получаться более однородным, чем в молотковой мельнице, а удельный расход энергии на измельчение должен быть значительно ниже.

Для расчета мощности привода мельницы рассмотрим основные статьи расхода энергии при ее работе. На холостом ходу, то есть без подачи материала, мельницу можно рассматривать как вентилятор, и тогда мощность привода определяется по известной зависимости, Вт:

$$N_{\text{хол}} = \frac{QH}{\eta_{\text{вент}}} \quad (1)$$

Производительность по воздуху Q определим через коэффициент производительности φ , диаметр ротора D и окружную скорость ротора по концам лопаток ω_r , м³/с:

$$Q = \varphi \frac{\pi D^2}{4} \omega_r \quad (2)$$

Полный напор, создаваемый вентилятором, вычислим через коэффициент полного напора ψ , плотность воздуха ρ_v и окружную скорость по концам лопаток ω_r , Па.

$$H = \psi \rho_v \omega_r^2 \quad (3)$$

Коэффициент производительности φ и коэффициент полного напора ψ можно определить по справочной литературе [9] как для вентилятора с радиальными лопатками. При подаче в мельницу материала дополнительный расход энергии будет затрачиваться на трение при движении частиц по диску и лопаткам, а также на разгон частиц при срыве с лопаток. Мощность, затрачиваемая на трение частиц, рассчитывается по формуле, Вт:

$$N_{\text{тр}} = flm(g + 2\omega V_{\text{ср}}) \quad (4)$$

где f – коэффициент трения;
 l – длина лопатки, м;
 m – массовая производительность, кг/с;
 g – ускорение свободного падения, м/с²;
 ω – угловая скорость вращения ротора, с⁻¹;
 $V_{\text{ср}}$ – средняя скорость движения частицы по лопатке, м/с.

Мощность, затрачиваемая на придание кинетической энергии частицам при срыве с концов лопаток, определяется по известной зависимости, Вт:

$$N_{\text{раз}} = \frac{mV_{\text{пол}}^2}{2} \quad (5)$$

Полная скорость частицы $V_{\text{пол}}$ при срыве с лопатки будет состоять из окружной V_{τ} и радиальной V_r и определяться из следующей зависимости, м/с:

$$V_{\text{пол}} = \sqrt{V_{\tau}^2 + V_r^2} \quad (6)$$

Окружную скорость V_{τ} принимаем равной скорости ротора по концам лопаток. Величину радиальной скорости при сходе частицы с лопатки можно рассчитать путем решения квадратичного дифференциального уравнения движения:

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = m\omega^2 r - 2mf\omega \frac{dr}{dt} \quad (7)$$

Методика расчета уравнения (7) подробно изложена в литературе [10].

Поскольку при срыве частиц повышенной твердости и их ударе об отражательные стержни они с первого раза могут не разрушиться или разрушиться на крупные осколки, то эти частицы будут отскакивать от стенки и снова попадать под воздействие лопаток. Естественно, на удар лопаток и повторный разгон частиц будет затрачиваться энергия, которую учтем коэффициентом K . Тогда в окончательном виде зависимость (5) будет иметь вид, Вт:

$$N_{\text{раз}} = K \frac{mV_{\text{пол}}^2}{2} \quad (8)$$

Тогда полная зависимость для расчета мощности на привод мельницы будет равна:

$$N_{\text{мел}} = \left[\frac{\frac{QH}{\eta_{\text{всц}}} + f(m + 2m\omega V_{\text{ср}}) + \frac{K m V_{\text{пол}}^2}{2}}{\eta_{\text{пр}}} \right] \quad (9)$$

где $\eta_{\text{пр}}$ – КПД привода мельницы.

Для определения качества измельчения в разработанной конструкции мельницы, а также сравнения расчетной мощности с реальной были проведены экспериментальные исследования на полупромышленной установке. Исследуемая мельница имела ротор с диаметром лопастей по концам 0,45 метра. Исследо-

вания проводились при скорости вращения ротора $n = 970, 1450$ и 2900 об/мин. В качестве измельчаемого материала использовались сильвинитовая руда с размером исходных частиц менее 15 мм, гранулы извести с размером менее 8 мм и зерно ячменя. Производительность по измельчаемому материалу регулировалась скоростью вращения шнека питателя и во всех опытах поддерживалась близкой к 1000 кг/ч.

На графиках (рис. 2) приведены результаты исследований потребляемой мельницей мощности для различной скорости вращения ротора при холостом ходу и измельчении различных материалов. Кривая 1 описывает работу мельницы на холостом ходу, то есть как вентилятора, и полученные данные очень хорошо согласуются с расчетными по зависимостям (1, 2, 3). На графике нанесена для сравнения кривая 2, полученная расчетным путем для случая, когда материал подается в мельницу в количестве 1000 кг/ч, и после удара полностью измельчается в мелкий порошок, и, естественно, не отражается от стержней, и не попадает под повторный удар лопаток.

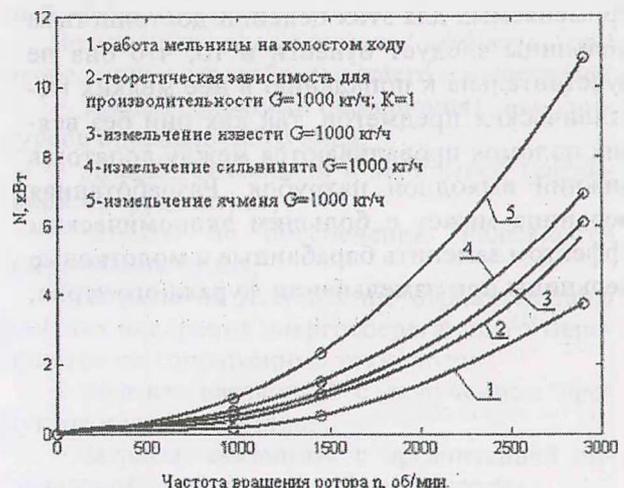


Рис. 2. Зависимость потребляемой мельницей мощности от скорости вращения ротора

При измельчении гранул извести (кривая 3) установлено, что они имеют низкую прочность и практически от первого удара рассыпаются на мельчайшие кристаллы размером не более 63 мкм. Для этого материала получено значение $K=1,2$.

Сильвинит (кривая 4) также довольно хорошо измельчается на отдельные кристаллы и при обработке опытных данных получено значение коэффициента $K=1,8$.

Значительно труднее поддаются ударному измельчению зерна ячменя. Из литературных источников [4] известно, что из всех зерно-

бобовых культур это самая трудно измельчаемая культура, и трудность измельчения объясняется тем, что снаружи зерно имеет 5 очень прочных оболочек. На рис. 2 затраты мощности на измельчение ячменя представлены кривой 5, и для этого материала значение $K = 4,9$.

Анализ продуктов измельчения показывает, что достичь очень высокой тонины помола на этой мельнице сложно, однако продукт измельчения получается весьма однородным, в нем содержится очень небольшое количество мелкой переизмельченной фракции и практически отсутствуют крупные осколки. Во многих случаях, например измельчение зерна на фуражные цели или сальвинита перед флотацией, такое качество измельчения как раз и является главным требованием.

Таким образом, наши опыты подтверждают результаты исследований, изложенные в работах [7, 8], а сделанные выводы позволили создать высокоэффективную, простую и надежную в эксплуатации мельницу, где измельчение материалов осуществляется за счет удара.

Удельный расход энергии на измельчение в данном измельчителе значительно ниже (не менее чем на 40%), чем в других мельницах, применяемых для этих целей. К достоинствам мельницы следует отнести и то, что она не чувствительна к попаданию в нее мелких металлических предметов, так как они без всяких поломок проваливаются между лопаток в нижний выходной патрубок. Разработанная мельница может с большим экономическим эффектом заменить барабанные и молотковые мельницы при измельчении фуражного зерна,

сальвинита и других материалов, если не требуется получать продукт очень высокой тонины помола.

Литература

1. Ходаков Г. С. Физика измельчения. – М.: Наука, 1972.
2. Ревнивцев В. И. Селективное разделение материалов. – М.: Недра, 1988.
3. Материалы 7^{го} международного конгресса по измельчению. – Париж, 1980.
4. Глебов Л. А. Интенсификация процесса измельчения сырья в производстве комбикормов: Дис... д-ра техн. наук: 05.18.12. – М.: МТИПП, 1990. – 305 с.
5. Демидов А. П., Чирков С. Е. Измельчающие машины ударного действия: Обзор. информ. – 1969. – 70 с.
6. Труды Европейского совещания по измельчению: Сб. ст. / Сост. А. В. Подкоцкий – М.: Стройиздат, 1966. – 592 с.
7. Reiners E. Der Mechanismus der Prallzerkleinerung beim geraden zentralen Stob und die Anwendung diesen Beanspruchungsart bei der Lerkleinerung, insbesondere bei der selektiven Lerkleinerung von spoden stoffen. – Westdeutsche Verlag, Koln und Opladen, 1977. – 649 с.
8. Бауман В. А. и др. Роторные дробилки. – М.: Машиностроение, 1973. – 272 с.
9. Соломахова Т. С., Чебышева К. В. Центробежные вентиляторы: Справ. – М.: Машиностроение, 1980. – 175 с.
10. Клепов Н. С. Расчет движения частиц топлива по размольной лопатке мельницы-вентилятора / Труды ЦКТИ. – 1989. – Вып. 253. – С. 71–76.