

УДК 621.926.9

Власенко Д. А.,
Долгих В. П.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ С ДРОБИМЫМ МАТЕРИАЛОМ В МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКЕ

Приводится модель и результаты моделирования взаимодействия ударных рабочих органов с материалом в роторной молотковой дробилке в программном комплексе ANSYS Workbench. При моделировании процесса соударения молотка с материалом конечно-элементным методом определяются основные параметры кинематики системы и проводится сравнительный анализ соответствия основных аналитических зависимостей и предложенной закономерности для определения угла его отклонения.

Ключевые слова: эксперимент, молотковая дробилка, молоток, соударение, угол отклонения, моделирование, ANSYS Workbench.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. В последнее время в доменном производстве всё более широко применяется офлюсованный агломерат. Флюсы вводятся в шихту в виде известняка, извести, известкового молока, мела и доломита. Каждая из этих добавок по-разному интенсифицирует процесс спекания и требует своих требований к подготовке по крупности. Для условий агломерации шихтовых материалов, обеспечивающих требуемые прочностные свойства и стойкость агломерата, рекомендуется использование флюсов крупностью 0–3 мм.

На металлургические предприятия известняк и доломит поступают в виде кусков фракцией 40–80 мм, поэтому перед введением в шихту для них требуется предварительная фракционная подготовка. Одним из самых распространённых типов дробильного оборудования при этом являются молотковые дробилки, однако данный вид дробильных машин не позволяет в полной мере достигать требуемой технико-экономической эффективности их работы, что объясняется наличием ряда недостатков.

Наряду с интенсивным износом (эксплуатация отдельных рабочих органов составляет 72–530 часов), основная доля затрачиваемой энергии расходуется на измельчение именно за счёт истирания (до 83 %), а не удара, что

приводит к излишнему росту удельных энергозатрат, достигающих 50–60 кВт·час/т.

Одним из приоритетных направлений повышения технико-экономических показателей молотковых дробилок является повышение эффективности процесса дробления материалов за счёт наложения ударной нагрузки [1, 2].

При соударении с куском материала молоток теряет часть кинетической энергии, направленной на деформацию, за счёт отклонения от своего радиального положения [3, 4]. Это негативно сказывается на основных технологических показателях дробилки, таких как степень измельчения материала и износ молотков.

Существует ряд методик, позволяющих теоретически определить угол отклонения [3, 5], в том числе и предлагаемая методика [6]. Из их анализа следует, что отношение массы молотка к массе материала (коэффициент масс) оказывает существенное влияние на динамику ударного элемента дробилки.

Вместе с тем отсутствует экспериментальное подтверждение математической модели процесса ударного контакта молотков и материала при его дроблении.

Постановка задачи. Задачей работы является разработка модели молотковой дробилки для исследования кинематики удар-

ного органа при соударении с материалом, а также анализ и обоснование адекватности существующих зависимостей для определения угла отклонения молотка при компьютерном моделировании механической системы на основе анализа её свойств [7].

Изложение материала и его результаты. Поставленные задачи решаются путём сопоставления значений угла отклонения, полученных по известным методикам, с результатами моделирования процесса соударения с использованием программного комплекса ANSYS Workbench [8].

Для сравнительного анализа используем известные методики:

– Гернета М. М., в основу которой легло определение работы молотка в его относительном движении [5]:

$$\gamma = \arccos \left(1 - \frac{D_1 (v_m - v'_m)^2}{4v_m^2 (D_1 - R)} \right), \quad (1)$$

где v_m — скорость молотка до удара; v'_m — скорость молотка после удара; D_1 — диаметр окружности, в зоне которой происходит соударение; R — радиус окружности осей подвеса молотка;

– Сидашенко А. И. [3], полученную из закона сохранения моментов количества движения до и после удара:

$$\gamma = \frac{R+l-a}{(l-a) \left(1 + \frac{m_m(l-a)^2 - a^2}{m_c(l-a)^2} \right) \sqrt{\frac{3(R+r)^2}{(l-a)^2 - a^2}}}, \quad (2)$$

где m_m — масса молотка, сосредоточенная в точке соударения (приведённая масса); m_c — масса частицы материала; l — длина молотка; a — длина участка ножки ниже оси подвеса; r — расстояние до внешней грани;

– математическую модель, полученную на основании статического закона Герца и законов сохранения импульса и кинетической энергии, обоснованную в работе [6]:

$$\gamma_2 = \left(1 + \frac{R}{r-c} \right) \frac{4r_u}{(k_m + 1) \sqrt{(r-c)(R+r-c)}}, \quad (3)$$

где c — расстояние, на которое проникает материал в рабочую зону молотков; r_u — радиус инерции молотков относительно оси подвеса; k_m — коэффициент масс.

При разработке технического решения, направленного на определение параметров динамики молотка при соударении с материалом конечно-элементным методом, предполагаем, что происходит одиночный упругий центральный удар молотка. Силы тяжести и трения в шарнирах не учитываются.

На первом этапе построена трёхмерная модель ротора дробилки в масштабе 1:1, состоящая из вала, двух дисков и шарнирно подвешенного молотка, установленного на оси подвеса ротора (рис. 1). Затем модель экспортирована в среду ANSYS Workbench (рис. 2). После этого нанесена конечно-элементная сетка (рис. 3).

Основной задачей исследования является моделирование кинематики системы «ротор–молоток–частица» в программном комплексе ANSYS Workbench. Для этого принимались следующие исходные параметры системы: угловая скорость вращения ротора — $78,54 \text{ с}^{-1}$; диаметр подвеса молотков — $0,43 \text{ м}$; радиус внешней грани молотка — $0,295 \text{ м}$; расстояние внедрения в рабочую зону — $0,02 \text{ м}$; масса молотка — $15,06 \text{ кг}$; радиус инерции молотка — $0,168 \text{ м}$; диаметр частицы — $0,04\text{--}0,08 \text{ м}$; плотность материала частицы — 2700 кг/м^3 , при этом частица находилась неподвижно в точке соударения.

Модель предназначена для оценки параметров ударного взаимодействия частицы материала и молотка, а также для ориентировочного определения угла отклонения молотка при их соударении.

Для определения угла отклонения молотка после соударения обрабатывались полученные результаты линейного перемещения узловых точек на роторе и на внешней грани молотка по соответствующим радиусам (рис. 4).

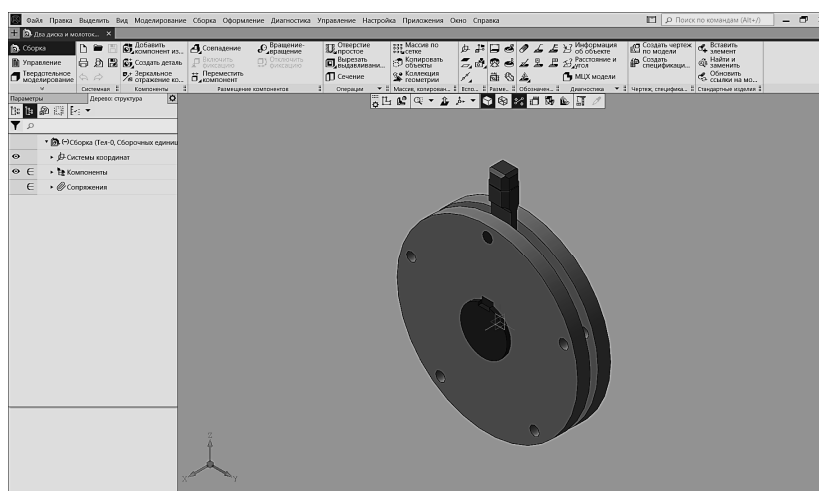


Рисунок 1 Трёхмерная модель участка ротора молотковой дробилки

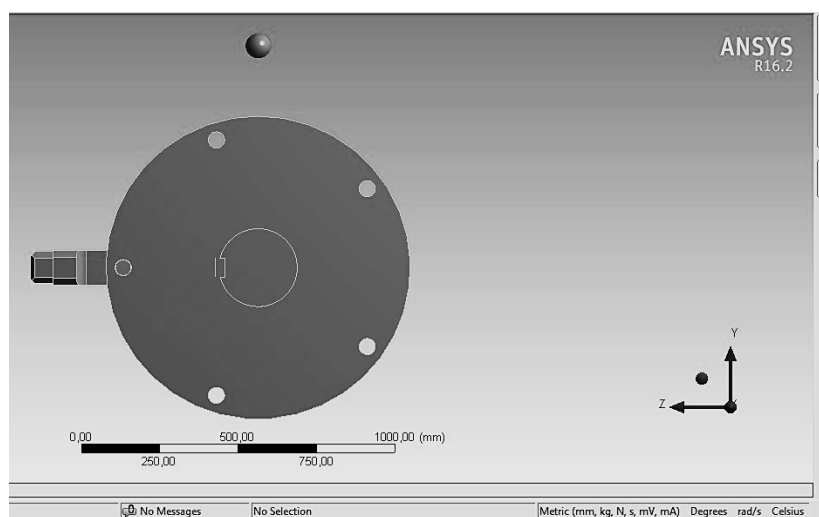


Рисунок 2 Трёхмерная модель ротора молотковой дробилки в среде ANSYS Workbench

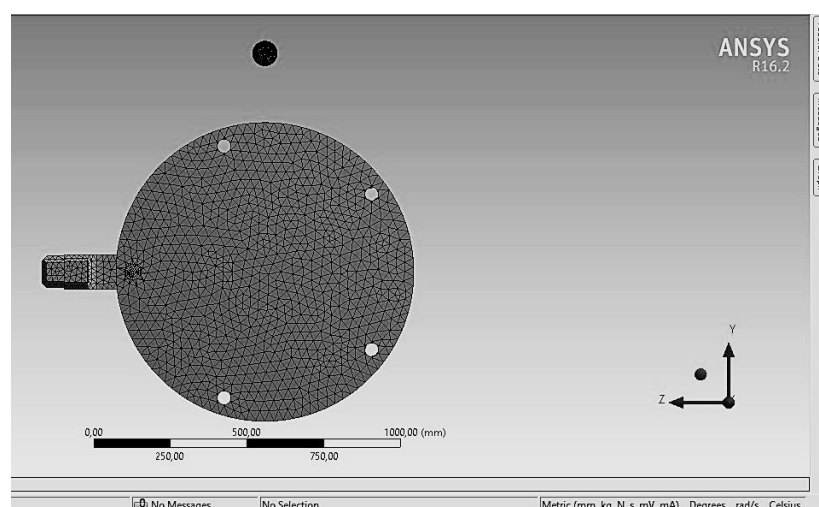


Рисунок 3 Конечно-элементная сетка модели ротора

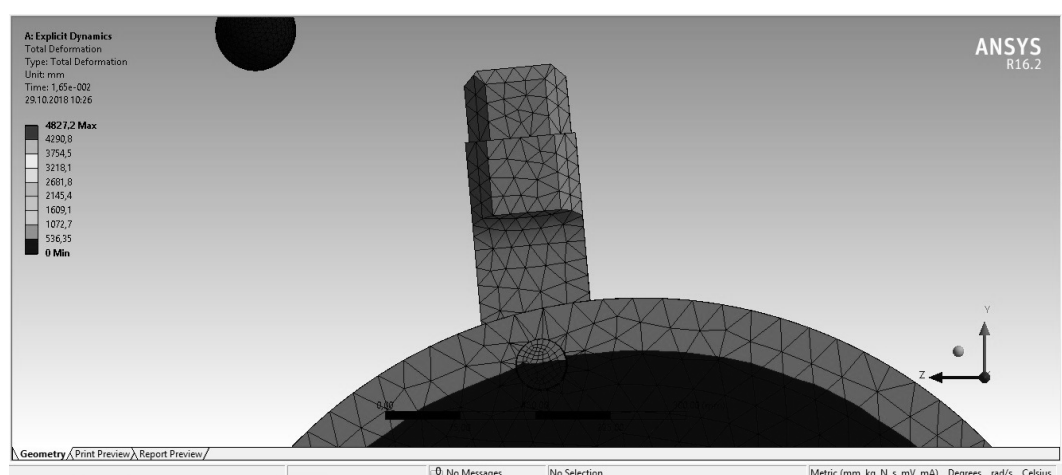


Рисунок 4 Положение молотка и частицы после соударения

В этом случае угол отклонения определяется из соотношения скоростей молотка до и после соударения или разницы расстояний, пройденных узловой точкой молотка и точкой на наружном радиусе вала ротора от начала отсчёта, отображённых на графике зависимостей расстояний характерных точек элементов (рис. 5).

Так как точка на роторе перемещается без ускорения (масса дисков ротора на несколько порядков больше массы частицы, а значит, влияние на параметры кинематики ротора дробилки будет незначительным), применив теорию подобия [9], угол

отклонения точки на внешней грани относительно оси вращения ротора приближённо определим как

$$\phi_3 \approx \arcsin\left(\frac{S_{\max} - k_s S_{\min}}{R + r}\right), \quad (4)$$

где S_{\max} — расстояние, преодоленное точкой на внешней грани молотка от начала отсчёта; k_s — отношение радиусов узловых точек на внешней грани молотка и роторе; S_{\min} — расстояние, преодолеваемое узловой точкой на роторе (рис. 5).

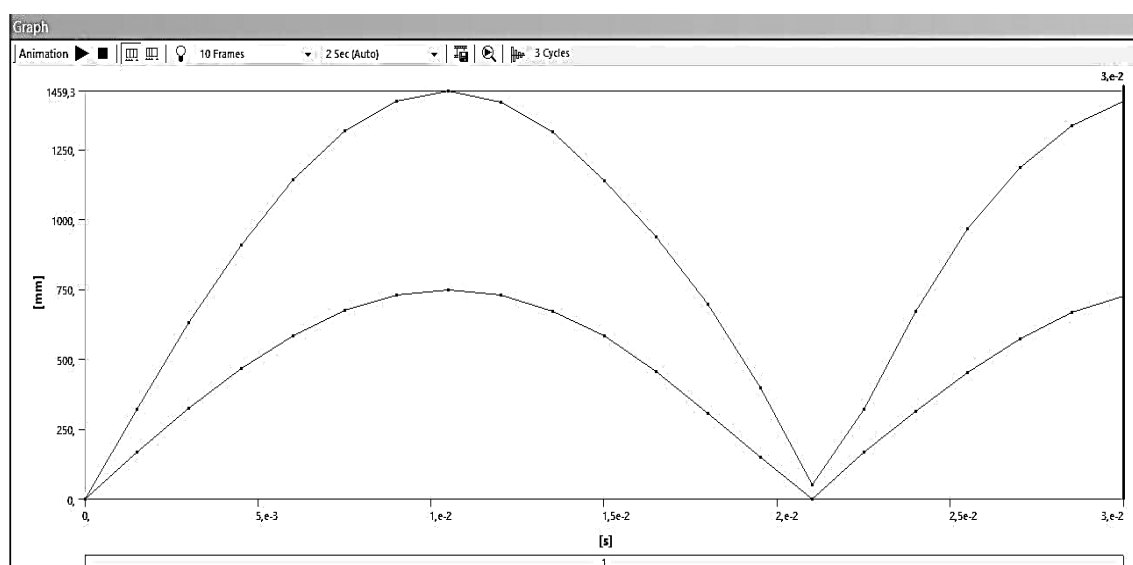


Рисунок 5 Графики траекторий движения характерных точек на роторе и молотке в процессе соударения с частицей известняка диаметром 0,08 м

На основании метода подобия выражение для определения угла отклонения молотка относительно оси подвеса принимает вид

$$\gamma_3 \approx \phi_3 \frac{R + r_u}{R}. \quad (5)$$

По результатам исследований получены значения углов отклонения с использованием аналитических зависимостей (1–3) и их соответствие аналогичным параметрам при моделировании в программном комплексе ANSYS Workbench, представленные в таблице.

Таблица

Значения угла отклонения молотка при ударном взаимодействии с материалом

№ п/п	Диаметр куска материала, м	Результаты моделирования, рад	По формуле Герца М. М., рад	Относительная погрешность, %	По зависимости Сидашенко А. И., рад	Относительная погрешность, %	По предложенной методике, рад	Относительная погрешность, %
1	0,04	0,037	0,039	6	0,003	62	0,027	21
2	0,06	0,099	0,125	26	0,012	75	0,086	15
3	0,08	0,212	0,277	31	0,027	81	0,198	9

Из анализа полученных результатов следует, что математическая модель (1) не подходит для условий контакта ударного элемента и сырья в молотковой дробилке, а наиболее достоверно описывает данный процесс при дроблении материала свободным ударом закономерность (3). При значениях угла отклонения от 0,05 до 0,2 рад степень соответствия данной зависимости результатам моделирования процесса соударения конечно-элементным методом составляет 87,5 %.

При этом выявлено, что крупность материала существенно влияет на показатели кинематики молотка — укрупнение фракции с 0,06 м до 0,08 м увеличивает угол отклонения в 2,1 раза.

Выводы и направление дальнейших исследований. Разработана конечно-элементная модель молотковой дробилки для исследования кинематики молотка при соударении с материалом в процессе дробления, проанализированы существующие зависимости для определения угла отклонения молотка и обоснована их адекватность при сравнении с экспериментальными данными моделирования.

При анализе результатов выявлено, что зависимость, полученная на основании статического закона Герца и законов сохранения импульса и кинетической энергии, наиболее достоверно описывает процесс ударного контакта материала с молотком. В дальнейшем она может служить теоретической основой при разработке и обосновании математической модели, предназначенной для определения основных технико-эксплуатационных характеристик процесса дробления в молотковой дробилке, таких как степень дробления материала и износ молотков.

Также доказано, что укрупнение фракции дробимого материала приводит к резкому увеличению угла отклонения молотка, а значит, и к потере его кинетической энергии, направленной на дробление.

Таким образом, для дальнейших исследований перспективным направлением является разработка и обоснование новых, направленных на повышение массы, конструкций молотков, вступающих в ударное взаимодействие с материалом, что позволит повысить эффективность работы ударного органа и увеличить производительность процесса дробления свободным ударом.

Библиографический список

1. Барабашкин, В. П. Исследования параметров молотковых дробилок на примере дробления газового угля [Текст] / В. П. Барабашкин // Изд-во института горных ископаемых. — М. : ИГИ, 1971. — С. 41–49.
2. Хлынин, П. П. Совершенствование конструктивно-режимных параметров дробилки молоткового типа [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01, 05.20.03 / Хлынин Пётр Петрович. — Оренбург : НОГАУ, 2003. — 20 с.
3. Сидашенко, А. И. Теоретическое и экспериментальное определение угла отклонения молотка в момент удара о материал [Текст] / А. И. Сидашенко // Прогрессивные технологические способы и процессы восстановления деталей сельскохозяйственной техники. — 1984. — № 14. — С. 37–42.
4. Власенко, Д. А. Энергозатраты ударных дробилок с жёстким и шарнирным креплением бил к ротору [Текст] / Д. А. Власенко, О. И. Павлиненко, Э. П. Левченко // Вестник ДонНТУ. — 2016. — № 3. — С. 21–26.
5. Шестопалов, А. А. Строительные и дорожные машины и оборудование. Машины для переработки каменных материалов [Текст] : учебное пособие для вузов / А. А. Шестопалов, В. В. Бадалов. — М. : Издательство Юрайт, 2018. — 115 с.
6. Власенко, Д. А. Влияние крупности сырья на кинематику рабочих органов и материала в молотковой дробилке [Текст] / Д. А. Власенко, Э. П. Левченко // Вестник ДонНТУ. — 2018. — № 3. — С. 9–15.
7. Ковалёв, Р. В. Моделирование динамики механических систем [Текст] / Р. В. Ковалёв, А. Л. Сотников // Вибрация машин, измерение, снижение, защита. — 2012. — № 3 (30). — С. 44–49.
8. Бруяка, В. А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench [Текст] : учеб. пособ. / В. А. Бруяка, В. Г. Фокин, Е. А. Солдусова. — Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2010. — 271 с.
9. Веников, В. А. Теория подобия и моделирования [Текст] : учебное пособие для вузов / В. А. Веников. — [2-е изд., доп. и перераб.]. — М. : Наука, 1976. — 479 с.

© Власенко Д. А.

© Долгих В. П.

Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульяниціким В. Н.,
д.т.н., проф. каф. МОЗЧМ, нач. НИЧ ДонНТУ Сотниковым А. Л.

Статья поступила в редакцию 08.02.19.

Власенко Д. О., Долгих В. П. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

МОДЕЛЮВАННЯ УДАРНОЇ ВЗАЄМОДІЇ РОБОЧИХ ОРГАНІВ З МАТЕРІАЛОМ, ЩО ПОДРІБНЮЄТЬСЯ, В МОЛОТКОВІЙ ДРОБАРЦІ

Наводиться модель і результати моделювання взаємодії ударних робочих органів з матеріалом в роторній молотковій дробарці в програмному комплексі ANSYS Workbench. При моделюванні процесу зіткнення молотка з матеріалом кінцево-елементним методом визначаються основні параметри кінематики системи і проводиться порівняльний аналіз відповідності основних аналітичних залежностей і запропонованої закономірності для визначення кута його відхилення.

Ключові слова: експеримент, молоткова дробарка, молоток, зіткнення, кут відхилення, моделювання, ANSYS Workbench.

Vlasenko D. A., Dolgikh V. P. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

MODELING OF IMPACT INTERACTION BETWEEN THE OPERATING ELEMENTS AND CRUSHING MATERIAL IN HAMMER CRUSHER

The model and results of modeling of the interaction between the impact operating elements and material in the rotary hammer crusher are given in the software environment ANSYS Workbench. When modeling the process of hammer collision with the material by the finite element method, the main system kinematics parameters are determined and a comparative analysis of the correspondence of the main analytical dependences and the proposed regularity is carried out to determine its deflection angle.

Key words: experiment, hammer crusher, hammer, collision, deflection angle, modeling, ANSYS Workbench.