

К.А.Ногаев, С.Ж.Кыдырбаева, А.С. Авилкин

*Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан
(E-mail: s.kydyrbayeva@ttu.edu.kz)*

Исследование динамических процессов в одновалковой зубчатой дробилке с ударным воздействием

В данной статье рассмотрены вопросы совершенствования конструкции одновалковой зубчатой дробилки, используемой для дробления агломерационного спека в металлургическом производстве. Исследование направлено на повышение эффективности дробления путем внедрения механизма ударного воздействия, обеспечивающего более интенсивное разрушение материала при сниженных энергозатратах.

Предложена новая конструкция дробилки, в которой реализован механизм накопления и высвобождения кинетической энергии посредством упругих элементов. Данный подход позволяет обеспечить динамическое изменение силы воздействия на дробимый материал, что способствует более равномерному распределению энергии удара и улучшению гранулометрического состава конечного продукта. Для анализа динамических процессов дробления проведено компьютерное моделирование в среде Autodesk Inventor, включающее разработку электронной геометрической модели, задание кинематических связей, определение силового взаимодействия элементов конструкции и проведение динамического анализа системы. В ходе исследования выявлены закономерности изменения угловой скорости и ускорения вращения звездочек, а также оценено влияние параметров упругих элементов на интенсивность ударного воздействия. Результаты моделирования показали, что предложенная конструкция обеспечивает повышение эффективности дробления за счет импульсной передачи энергии, сокращает энергозатраты по сравнению с традиционными схемами дробления и позволяет регулировать параметры работы дробилки в зависимости от свойств агломерата. Полученные данные могут быть использованы при проектировании новых и модернизации существующих дробильных установок для металлургической и горнодобывающей промышленности.

Ключевые слова: дробление агломерата, одновалковая зубчатая дробилка, ударное воздействие, упругие элементы, компьютерное моделирование, Autodesk Inventor, динамический анализ.

Введение

Процесс дробления агломерационного спека играет ключевую роль в металлургическом производстве, обеспечивая получение фракций оптимального размера для последующих технологических операций. Одновалковые зубчатые дробилки широко применяются в промышленности благодаря своей компактности, высокой производительности и простоте эксплуатации. Однако существующие конструкции обладают рядом недостатков, таких как неравномерное распределение нагрузки на зубья, повышенный износ рабочих органов и высокие энергетические затраты [1, 2].

Совершенствование конструкции одновалковой зубчатой дробилки направлено на увеличение эффективности дробления за счет оптимизации геометрии зубьев, изменения кинематики взаимодействия рабочих органов с материалом и применения современных методов компьютерного моделирования. В последние годы активно используются системы инженерного анализа среднего уровня, такие как Autodesk Inventor, позволяющие проводить детальные исследования силового взаимодействия дробимого материала с рабочими поверхностями дробилки [3]. Данный метод моделирования обеспечивает достаточно точные характеристики нагрузки, что подтверждено результатами компьютерных и аналитических расчетов [4].

Одним из перспективных подходов к анализу рабочих процессов является метод дискретных элементов (МДЭ), который позволяет моделировать разрушение материала и определять оптимальные параметры дробящих элементов [5, 6]. Однако высокая вычислительная сложность МДЭ ограничивает его широкое применение, что делает актуальным использование альтернативных методов моделирования, сочетающих достаточную точность с доступностью реализации на инженерных рабочих станциях [7].

Таким образом, целью данной работы является совершенствование конструкции и рабочих процессов одновалковой зубчатой дробилки с использованием современных методов инженерного анализа для повышения эффективности дробления агломерационного спека. В ходе исследования будут рассмотрены

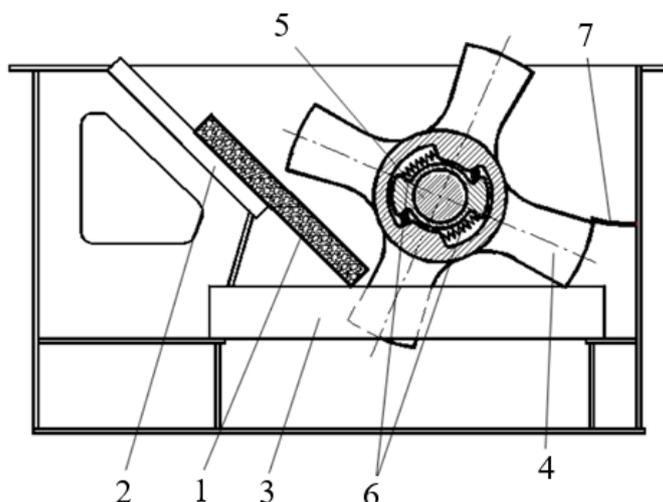
новые конструктивные решения, выполнено компьютерное моделирование силового взаимодействия и предложены рекомендации по повышению эксплуатационной надежности дробилки.

Методы и материалы

На базе кинематической схемы распространенной на сегодняшний день одновалковой зубчатой дробилки, можно предложить ее новую конструкцию, разрушающую агломерационный пирог, преимущественно ударным импульсом, при достаточно небольшой постоянной частоте вращения вала ротора, равной частоте вращения при обычной работе дробилки. Например, одна из таких схем показана на рисунке 1.

Агломерат, подвергающийся дроблению по направляющей поверхности подается на колосниковую решетку. Отдельные звездочки ротора имеют упругие связи с валом ротора с помощью пружин. При медленном вращении ротора, зубья звездочек захватываются упругими пластинами и накапливают кинетическую энергию, например, за счет сжатия пружин.

Когда деформация пружин достигает величины соответствующей жесткости упругих пластин, происходит скоростное освобождение энергии отдельных звездочек, и они получают дополнительное вращение вокруг оси ротора с повышенной переменной частотой, при этом происходит удар зуба о поверхность агломерационного пирога. Некоторые конструктивные проработки упругих элементов звездочек показаны на рисунке 2.



1 – агломерационный пирог; 2 – направляющая; 3 – колосники;
4 – звездочки; 5 – ротор; 6 – пружины; 7 – упругий элемент

Рисунок 1 – Схема одновалковой зубчатой дробилки ударного действия

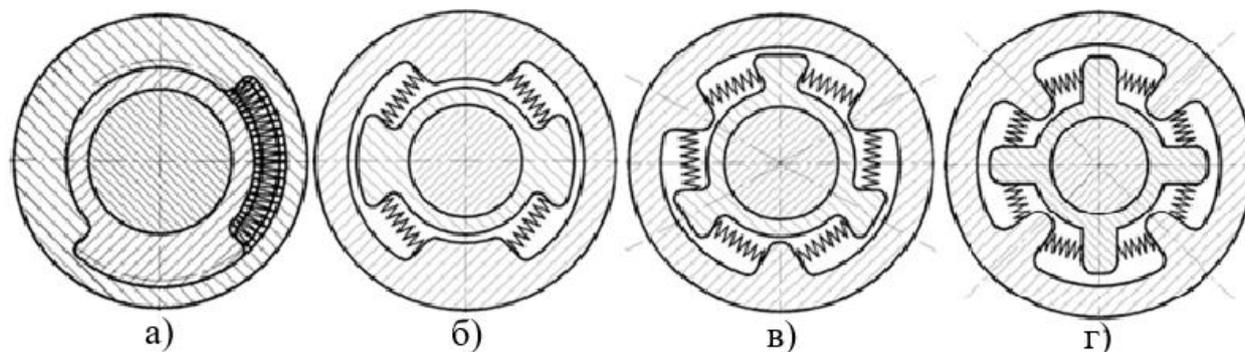


Рисунок 2 – Некоторые варианты конструктивных проработок упругих элементов в ступице звездочек

Наложение ударного действия на агломерат значительно увеличивает концентрацию нагружения материала, что приводит к более интенсивному разрушению и снижению величины кусков продуктов дробления. Менее энергоемкий процесс удара требует меньших энергозатрат на дробление, при этом улучшается гранулометрический состав готового продукта. Сила удара может регулироваться как жесткостью пружин, так и длиной упругих пластин.

При конструктивной простоте технических решений по реализации ударных нагрузок в одновалковых зубчатых дробилках их динамика и динамика ударных процессов в них оказываются весьма сложными. Для успешной работы такого оборудования необходимо изучение с единой точки зрения определенного

комплекса теоретических методов анализа, практических сведений и рекомендаций. Современное развитие информационных технологий и систем инженерного анализа позволяет эффективно проводить исследование ударных процессов в дробилках путем имитационного моделирования их работ.

В качестве основного инструмента моделирования в данной работе выбран программный комплекс Autodesk Inventor, который предоставляет широкие возможности для анализа динамических процессов и силового взаимодействия рабочих элементов дробилки [3].

Процесс моделирования включает несколько этапов: создание электронной геометрической модели дробилки, задание кинематических связей между деталями, определение силового взаимодействия, а также проведение динамического анализа системы. В Autodesk Inventor реализована методика, позволяющая проводить исследование рабочих характеристик дробилки с учетом воздействия ударных нагрузок и параметров упругих элементов. Данная методика включает операции построения 3D-моделей, назначение кинематических пар, задание внешних сил и выполнение динамического анализа системы [3].

Для исследования динамических процессов в одновалковой зубчатой дробилке была создана электронная геометрическая модель в программном комплексе Autodesk Inventor. Основным этапом включал моделирование 3D-объектов путем построения эскизов и их последующего преобразования с использованием булевых операций. Были разработаны 3D-модели ключевых деталей, включая ротор, звездочку (рисунок 3) и неподвижные элементы дробилки.

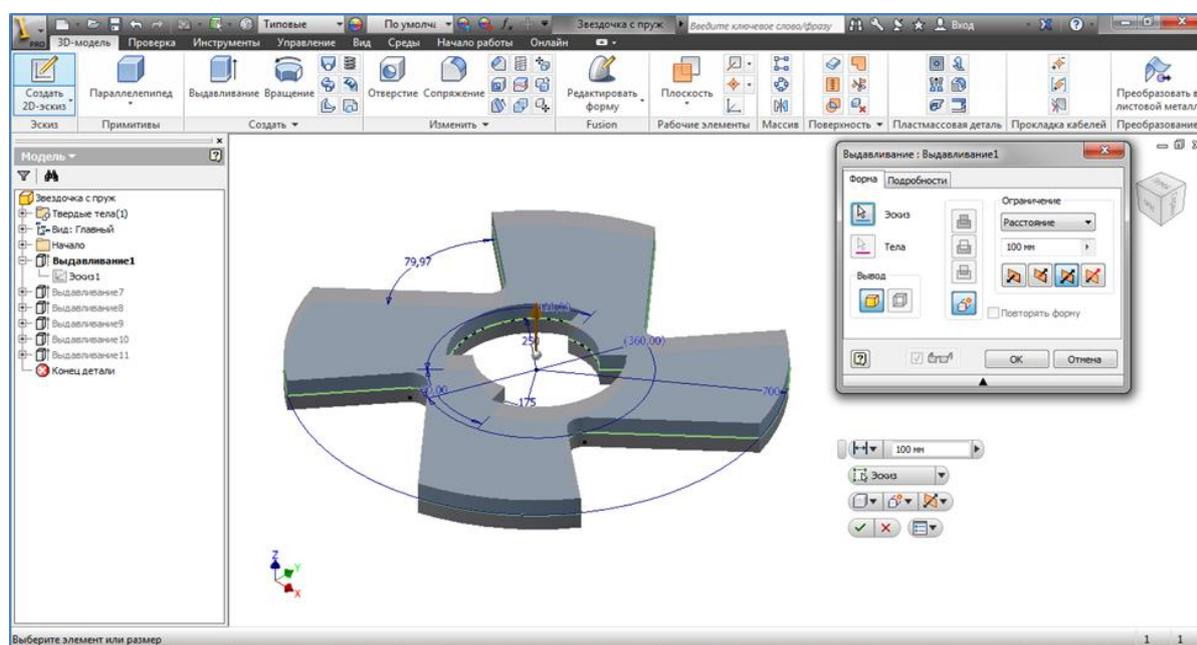


Рисунок 3 – Создание 3D модели звездочки

На следующем этапе осуществлено сборочное моделирование с назначением кинематических связей, определением параметров соединений и наложением внешних нагрузок (рисунок 4).

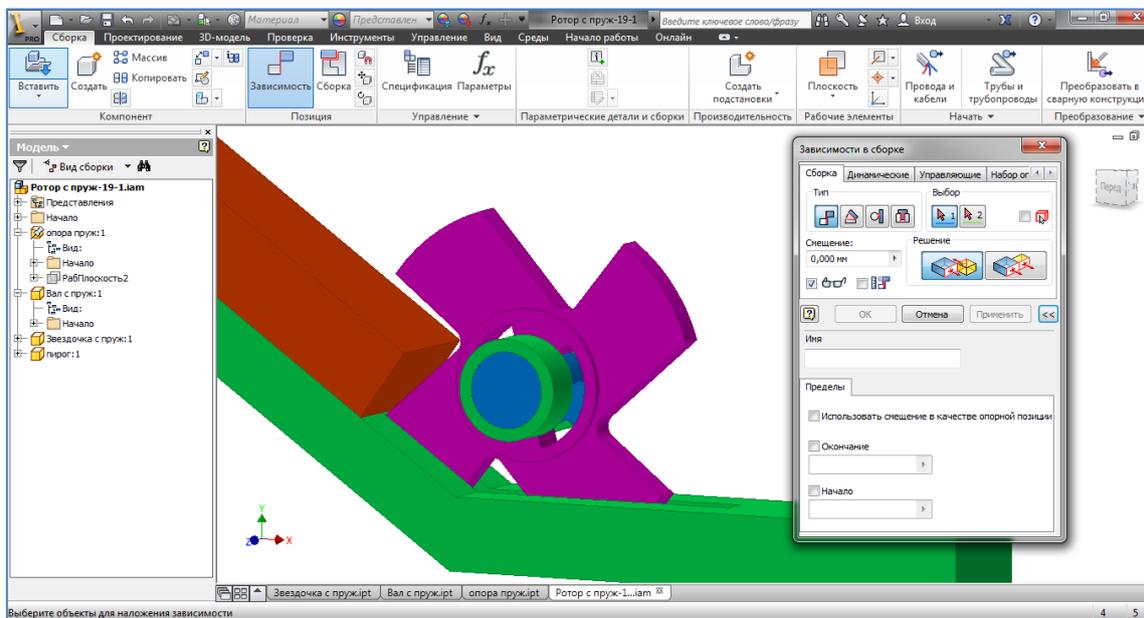


Рисунок 4 – Создание электронной геометрической модели одновалковой зубчатой дробилки

В динамическом анализе использовались кинематические пары («Вращение», «Скольжение»), а также силовые соединения для имитации упругих элементов. Для оценки рабочих нагрузок задавалось вынужденное движение ротора и внешнее воздействие на зубья звездочки, моделируемое переменной силой по заданному закону изменения (рисунок 5).

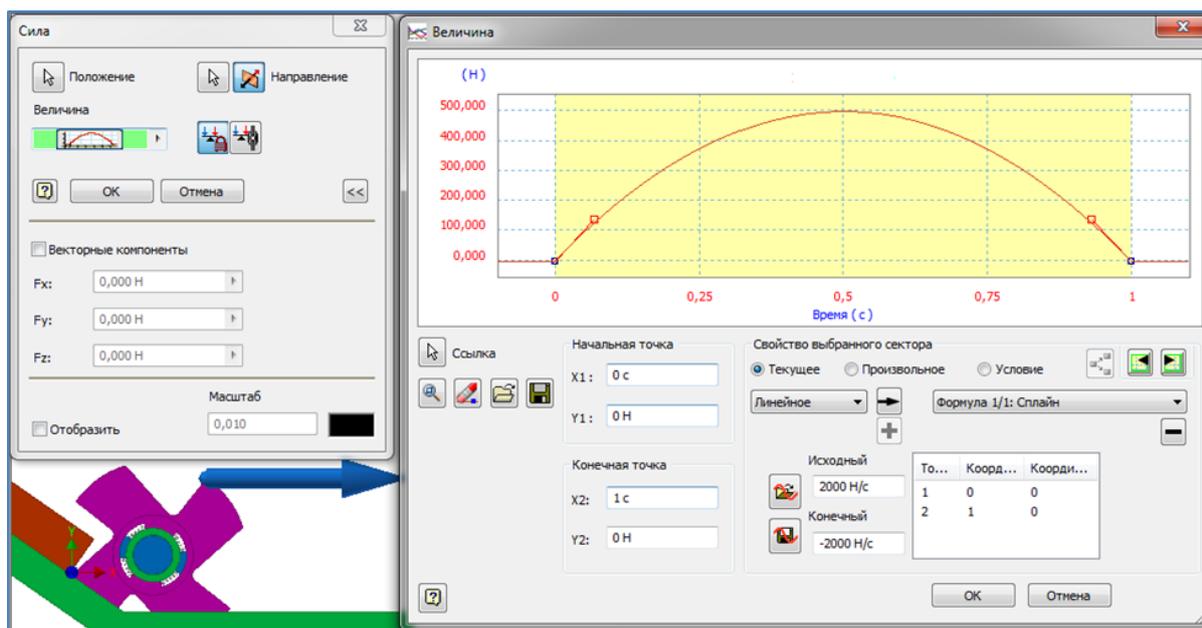


Рисунок 5 – Моделирование захвата зубьев звездочки упругими пластинами внешней силой

Продолжительность симуляции работы одновалковой зубчатой дробилки задали 30 секунд, что соответствует 1 обороту ротора при скорости его вращения 2 об/мин. На звездочке и вале ротора назначили точки трассировки, по значениям скоростей которых устанавливали моменты сжатия пружин и последующее реализация ими ударных нагрузок. После запуска расчета результаты моделирования отображается в устройстве графического вывода (рисунок 6).

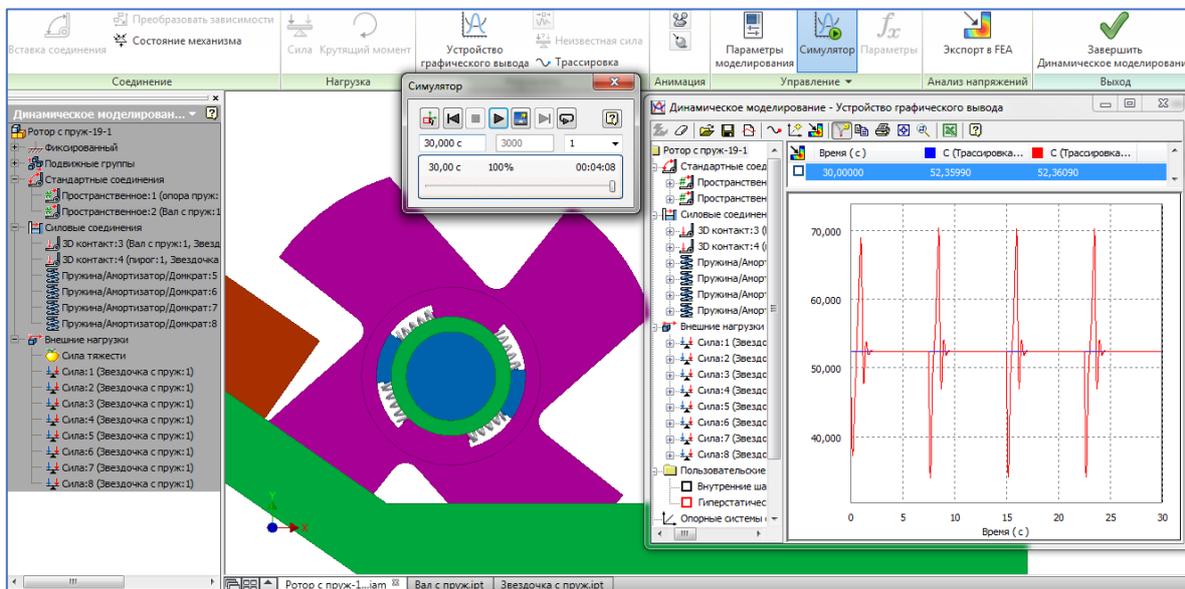


Рисунок 6 – Моделирование работы однозубчатой зубчатой дробилки в модуле «Динамическое моделирование» программы Autodesk Inventor

Основные результаты исследования и их обсуждение

В ходе моделирования вычислены значения скорости и ускорения подвижных компонентов, длины пружин и реактивных сил в пружинах, внешней силы в каждом зубе звездочки.

В процессе вращения ротора зубья звездочек входят в контакт с упругими пластинами, установленными в конструкции дробилки (рисунок 1). В результате захвата каждого из зубьев звездочки упругой пластиной, реализованной в модели внешней силой (рисунок 7), происходит постепенное сжатие пружин, соединяющих звездочки с валом ротора. В этот момент наблюдается снижение скорости вращения звездочек (рисунок 8), так как часть кинетической энергии системы преобразуется в потенциальную энергию упругих элементов (рисунок 9).

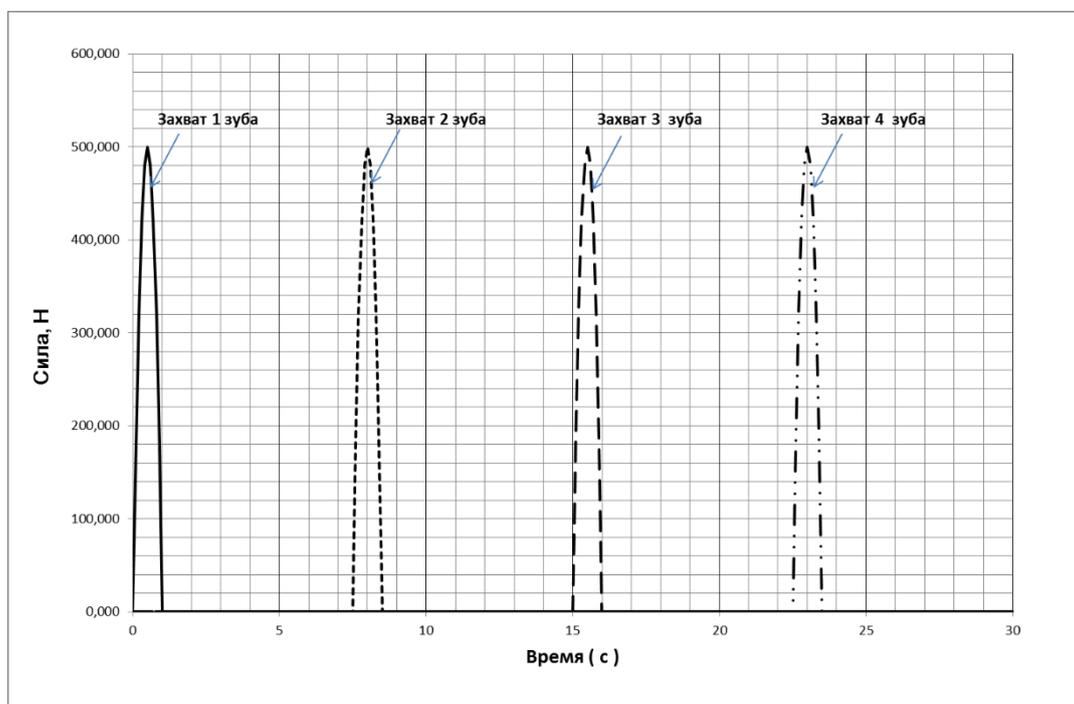


Рисунок 7 – Действие внешней силы, моделирующая действие упругой пластины на зубья звездочки

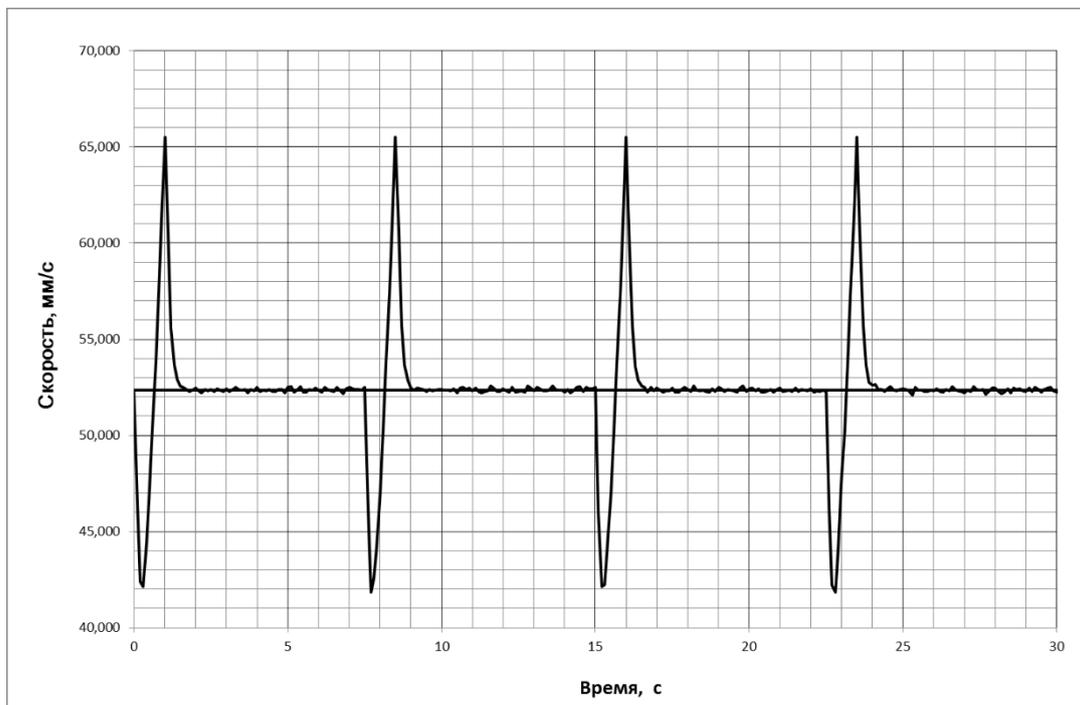


Рисунок 8 – Изменение скорости в точках трассировки звездочки и вала ротора

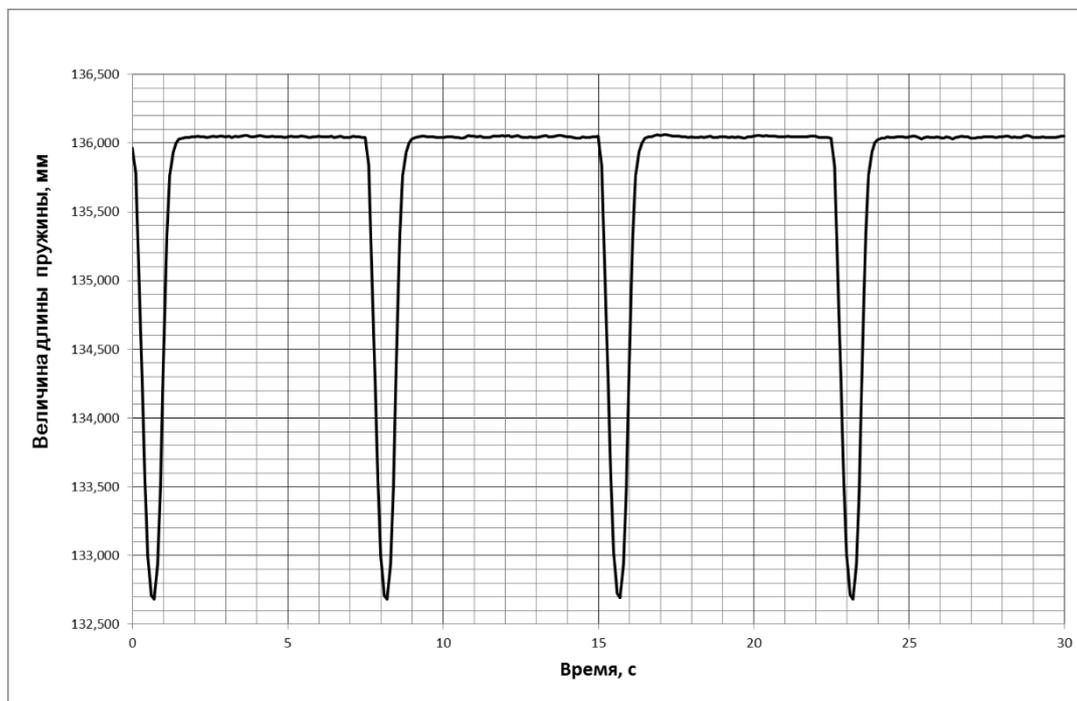


Рисунок 9 – Изменение величины длины пружины в результате действия внешней силы, моделирующее действие упругой пластины на зубья звездочки

По мере увеличения деформации пружин их упругие силы нарастают, пока не достигается предельное значение, соответствующее жесткости пластин. В этот момент пружины начинают разжиматься, высвобождая накопленную энергию. Это приводит к резкому увеличению угловой скорости звездочек, что сопровождается скачкообразным ускорением их вращения (Рисунок 10). Таким образом, в механизме дробилки реализуется периодическая цикличность замедления и резкого ускорения звездочек, что создает условия для формирования ударных нагрузок на агломерат.

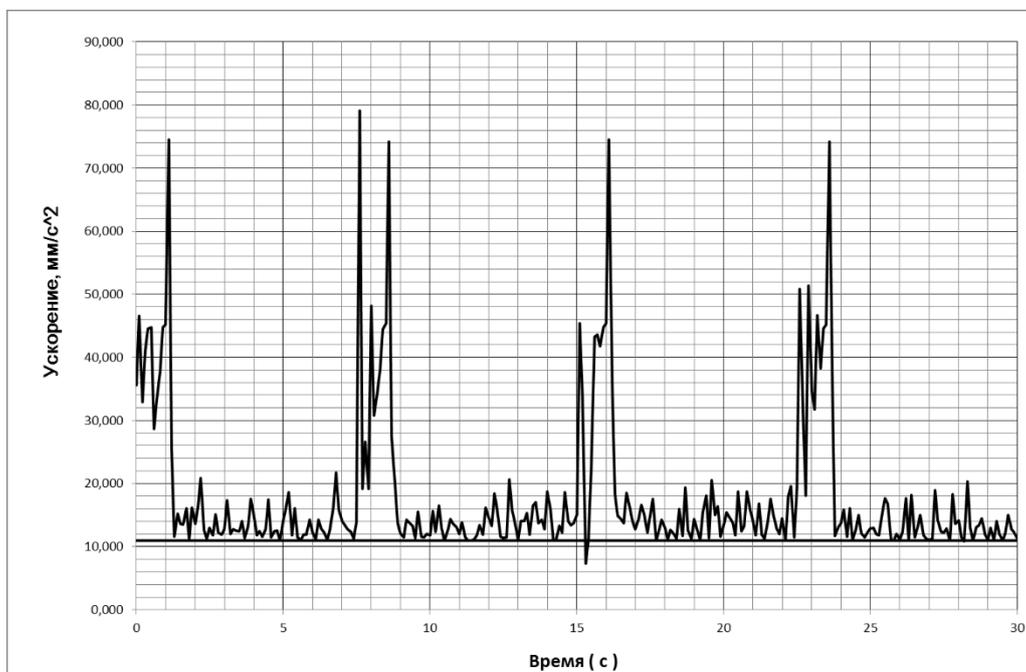


Рисунок 10 – Изменение ускорения в точках трассировки звездочки и вала ротора

Возникающая в результате разжатия пружин импульсная передача энергии приводит к интенсивному механическому воздействию на агломерат. При достижении критического уровня накопленной энергии происходит резкое вращение звездочек, сопровождающееся ударом их зубьев о поверхность агломерационного пирога.

В отличие от традиционных способов дробления, использующих постоянное механическое давление, предложенная методика позволяет добиться динамического изменения силы воздействия. Ударные нагрузки способствуют не только разрушению крупных фрагментов агломерата, но и обеспечивают более равномерное распределение энергии по всей зоне контакта. Это позволяет уменьшить вероятность образования крупных недроблённых частиц и улучшить фракционный состав конечного продукта.

Дополнительно анализ результатов моделирования показывает, что распределение энергий в системе влияет на амплитуду и частоту возникающих ударных нагрузок. За счет варьирования параметров упругих элементов можно регулировать интенсивность дробления, адаптируя конструкцию для различных типов агломератов.

Динамическое моделирование позволило детально проанализировать закономерности движения звездочек в процессе дробления. При взаимодействии зубьев с упругими пластинами скорость вращения звездочек изменяется нелинейно (Рисунок 8). В момент сжатия пружин наблюдается замедление, а в момент их разжатия – резкое ускорение (Рисунок 10).

Кинематические характеристики звездочек показывают, что процесс сопровождается значительными изменениями углового ускорения, что подтверждает импульсный характер движения. Данное поведение обусловлено особенностями конструкции, в которой используется комбинация упругих элементов и внешнего силового воздействия.

Также анализ динамических параметров системы позволяет прогнозировать величины нагрузок, действующих на конструктивные элементы дробилки. Это важно с точки зрения оценки ресурса деталей и выбора оптимальных материалов, обладающих необходимыми прочностными

Выводы

1. Предложена новая конструкция одновалковой зубчатой дробилки с механизмом накопления и высвобождения кинетической энергии посредством упругих элементов. В отличие от традиционных дробильных установок, данное техническое решение позволяет реализовать ударное воздействие на агломерат, что способствует более эффективному разрушению материала при сниженных энергозатратах.

2. Выполнено компьютерное моделирование динамических процессов дробления в программном комплексе Autodesk Inventor. В ходе исследования проанализированы кинематические и динамические характеристики подвижных элементов дробилки, определены закономерности изменения угловых скоростей и ускорений звездочек, а также выявлено влияние параметров упругих элементов на интенсивность ударных нагрузок.

3. Показано, что применение ударного механизма способствует более равномерному распределению энергии разрушения, снижению вероятности образования крупных недроблённых частиц и улучшению гранулометрического состава конечного продукта. Кроме того, регулирование жесткости пружин и длины упругих пластин позволяет адаптировать работу дробилки к различным свойствам агломерата, повышая универсальность установки.

4. Выявлены закономерности взаимодействия зубьев звездочек с упругими пластинами, определены критические параметры сжатия пружин и их влияние на импульсную передачу энергии. Доказано, что циклическое изменение угловой скорости звездочек приводит к формированию периодических ударных нагрузок, повышающих эффективность разрушения агломерационного спека.

5. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и модернизации дробильных установок для металлургической и горнодобывающей промышленности. Применение современных методов инженерного анализа позволяет повысить надежность оборудования, уменьшить износ рабочих элементов и сократить эксплуатационные затраты.

Список литературы

1. Johansson, M., Bengtsson, M., Evertsson, M., & Hulthén, E. A fundamental model of an industrial-scale jaw crusher. // *Minerals Engineering*, 2017, 105, pp. 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.01.012>.
2. Legendre, D., & Zevenhoven, R. Assessing the energy efficiency of a jaw crusher. // *Energy*, 2014, 74, pp. 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.036>.
3. Younis, W. The Dynamic Simulation Environment. Up and Running with Autodesk Inventor Simulation 2011, 2010, pp. 1–96. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382102-7.10001-7>.
4. Beloglazov, I. I., & Ikonnikov, D. A. Computer Simulation Methods for Crushing Process in a Jaw Crusher. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, 142, 012074. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/142/1/012074>.
5. Refahi, A., Aghazadeh Mohandesi, J., & Rezai, B. Discrete element modeling for predicting breakage behavior and fracture energy of a single particle in a jaw crusher. // *International Journal of Mineral Processing*, 2010, 94(1-2), pp. 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.12.002>.
6. Белоглазов И. И., Иконников Д. А. Применение метода дискретных элементов для моделирования процесса измельчения горных пород в щековой дробилке. // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. – 2016. – №9 – С.780-786.
7. Dowding, C. H., & Lytwynshyn, G. Point load—deformation relationships and design of jaw crusher plates. *Powder Technology*, 1982, 31(2), 277–286.
8. Younis, W. The Dynamic Simulation Environment. Up and Running with Autodesk Inventor Simulation 2011, 2010, pp. 1–96. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382102-7.10001-7>.

К.А.Ногаев, С.Ж., Кыдырбаева, А.С.Авилкин

Бір білікті соққылы ұсатқыштағы динамикалық процестерді зерттеу

Бұл мақалада металлургиялық өндірісте агломерациялық агломерацияны ұсақтау үшін қолданылатын бір білікті тісті ұсатқыштың конструкциясын жетілдіру мәселелері қарастырылды. Зерттеу энергия шығынын азайта отырып, материалды неғұрлым қарқынды жоюды қамтамасыз ететін әсер ету механизмін енгізу арқылы ұсақтау тиімділігін арттыруға бағытталған. Серпімді элементтерді пайдалана отырып кинетикалық энергияны жинақтау және босату механизмін жүзеге асыратын жаңа ұсатқыш конструкциясы ұсынылады. Бұл тәсіл ұнтақталған материалға әсер ету күшінің динамикалық өзгеруіне мүмкіндік береді, бұл соққы энергиясын біркелкі бөлуге және соңғы өнімнің гранулометриялық құрамын жақсартуға ықпал етеді. Ұсақтау процестерін динамикалық талдау үшін Autodesk Inventor ортасында компьютерлік модельдеу орындалды, оның ішінде электронды геометриялық модельді жасау, кинематикалық байланыстарды тағайындау, құрылымдық элементтердің күш әсерлесуін анықтау және жүйенің динамикалық талдау жүзеге асырылды. Зерттеу барысында бұрыштық жылдамдықтың өзгеру заңдылықтары және жұлдызшалардың айналуының үдеулері анықталды, серпімді элементтердің параметрлерінің әсер ету қарқындылығына әсері бағаланды. Модельдеу нәтижелері ұсынылған жобаның импульстік энергияны беру есебінен ұсату тиімділігін арттыруды қамтамасыз ететінін, дәстүрлі ұсақтау схемаларымен салыстырғанда энергия шығындарын азайтатынын және агломераттың қасиеттеріне байланысты ұсатқыштың жұмыс параметрлерін реттеуге мүмкіндік беретінін көрсетті. Алынған мәліметтерді металлургия және тау-кен өнеркәсібі үшін жаңа

ұсақтау қондырғыларын жобалау және жұмыс істеп тұрғандарын жаңғырту кезінде пайдалануға болады.

Түйін сөздер: агломератты ұсақтау, бір орамды тісті уатқыш, сокқы әрекеті, серпімді элементтер, компьютерлік модельдеу, Autodesk Inventor, динамикалық талдау.

K.A.Nogayev, S.Zh Kydyrbayeva., A.S.Avilkin

Study of Dynamic Processes in a Single-Roll Gear Crusher with Impact Action

This paper addresses the improvement of the design of a single-roll gear crusher used for crushing agglomerate sinter in metallurgical production. The study aims to enhance the crushing efficiency by implementing an impact mechanism that enables more intense material fragmentation while reducing energy consumption.

A novel crusher design is proposed, incorporating a mechanism for accumulating and releasing kinetic energy through elastic elements. This approach allows for dynamic variation in the applied impact force, ensuring a more uniform energy distribution and improving the granulometric composition of the final product.

To analyze the dynamic crushing processes, computer modeling was performed in the Autodesk Inventor environment. The study included the development of a digital geometric model, the definition of kinematic constraints, the determination of force interactions between structural elements, and a dynamic system analysis. The investigation identified patterns in the variation of angular velocity and acceleration of the crusher's star wheels and evaluated the influence of elastic element parameters on impact intensity.

The simulation results demonstrate that the proposed design improves crushing efficiency by utilizing impulse energy transmission, reduces energy consumption compared to conventional crushing schemes, and allows for the adjustment of crusher operation parameters based on agglomerate properties. The obtained data can be applied in the design of new and modernization of existing crushing equipment for the metallurgical and mining industries.

Key words: agglomerate crushing, single-roll gear crusher, impact action, elastic elements, computer modeling, Autodesk Inventor, dynamic analysis.

References

1. Johansson, M., Bengtsson, M., Evertsson, M., & Hulthén, E. A fundamental model of an industrial-scale jaw crusher. // *Minerals Engineering*, 2017, 105, pp. 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.01.012>.
2. Legendre, D., & Zevenhoven, R. Assessing the energy efficiency of a jaw crusher. // *Energy*, 2014, 74, pp. 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.036>.
3. Younis, W. The Dynamic Simulation Environment. Up and Running with Autodesk Inventor Simulation 2011, 2010, pp. 1–96. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382102-7.10001-7>.
4. Beloglazov, I. I., & Ikonnikov, D. A. Computer Simulation Methods for Crushing Process in a Jaw Crusher. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, 142, 012074. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/142/1/012074>.
5. Refahi, A., Aghazadeh Mohandesi, J., & Rezai, B. Discrete element modeling for predicting breakage behavior and fracture energy of a single particle in a jaw crusher. // *International Journal of Mineral Processing*, 2010, 94(1-2), pp. 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.12.002>.
6. Beloglazov I. I., Ikonnikov D. A. Primenenie metoda diskretny`x e`lementov dlya modelirovaniya processa izmel`cheniya gorny`x porod v shhekovej drobilke. // *Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Priborostroenie*. – 2016. – №9 – S.780-786.
7. Dowding, C. H., & Lytwynshyn, G. Point load—deformation relationships and design of jaw crusher plates. *Powder Technology*, 1982, 31(2), 277–286.
8. Younis, W. The Dynamic Simulation Environment. Up and running with Autodesk Inventor Simulation 2011, 2010, pp. 1–96. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382102-7.10001-7>.