

На правах рукописи

Макаров Алексей Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД
ЩЕКОВЫМИ ДРОБИЛЬНЫМИ МАШИНАМИ И РАЗРАБОТКА
МЕТОДОВ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИХ КОНСТРУКЦИЙ**

Специальность 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск- 2004

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Сибирский Государственный Индустриальный Университет”

Научный руководитель заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук,
профессор Дворников Л. Т.

Официальные оппоненты доктор технических наук, профессор
Каледин В.О.
кандидат технических наук
Гудимов С.Н.

Ведущая организация: Восточный Научно-Исследовательский
Горно-Рудный Институт
(ОАО “ВостНИГРИ”), г. Новокузнецк

Защита состоится 15 декабря 2004 в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.01 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Томский политехнический университет” по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина 30, корп.4, ауд. 210

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования “Томский политехнический университет” по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 53-а.

Автореферат разослан 12 ноября 2004г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.269.01,
кандидат технических наук,
доцент

_____ Костюченко Т.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Проблема дробления твердых материалов и, прежде всего минерального сырья в виде горных пород различного состава и прочности, является насущной на протяжении всей истории человечества. Измельченные материалы лежат в основе всей строительной промышленности, дорожного строительства, горной промышленности. На дробление горных пород используются огромные энергетические ресурсы. Известно, что ежегодно, начиная с 1980-х годов, из недр Земли извлекается около 20 млрд.т. минерального сырья и десятки миллиардов тонн пустой породы. Вся эта горная масса в той или иной степени подлежит измельчению, дроблению на обогатительных фабриках, в строительной индустрии, на что расходуются десятки ГВт часов энергии. Все, что связано с совершенствованием процессов дробления, с созданием высокопроизводительных и малоэнергоемких дробильных машин относится к проблеме государственной значимости. Актуальными являются практически все научные и технические решения в этом направлении.

В настоящей работе ставятся и решаются задачи, связанные с осмыслением поведения кусков горных пород в камере дробления щековых дробильных машин, рассматриваются стадии разрушения камней, задача сводится к известной классической задаче теории упругости, к задаче Нейбера. Использование решений этой задачи позволяет находить предельные силы воздействия на разрушаемые объекты через универсальную характеристику - коэффициент крепости М.М. Протодяконова. Решается задача о суммировании действующих сил и определения общей нагрузки на ведущие звенья дробилок. Теоретические выводы проверяются физическим экспериментом на макете дробилки.

Далее, в работе ставится задача о конструировании нового поколения дробильных машин, заключающаяся в использовании в их кинематических схемах замкнутых изменяемых контуров, позволяющих увеличивать жесткость воздействия на дробимый материал, обосновываются новые конструкции дробилок, защищенные патентами Российской Федерации, и методы кинематического и динамического исследования таких машин.

Целью работы является установление основных характеристик процесса движения, взаимодействия и разрушения кусков горной породы в камере дробления, разработка метода поиска кинематических схем щековых дробилок нового поколения.

Идея работы заключается в широком использовании эффекта одновременного нагружения с целью приближения математической модели к реальным условиям, структурной теории механических систем к описанию взаимодействия разрушаемых кусков в камере дробления и синтезу принципиально новых кинематических схем щековых дробиль

ных машин.

Задачи исследования:

- Изучить процесс взаимодействия между щеками дробильной машины и объектом разрушения, обосновать математическую модель процесса нагружения куска горной породы в камере дробления. Найти качественные и количественные взаимосвязи, определяющие энергетические затраты, потребные на дробление камней.
- Установить математическую модель расположения камней в камере дробления.
- Разработать метод синтеза кинематических схем щековых дробильных машин, удовлетворяющих заданным условиям.
- Разработать и обосновать направление поиска кинематических схем щековых дробилок нового поколения.
- Найти способы кинематического и динамического исследования, а также уравнивания дробильных машин, включающих в свой состав замкнутый изменяемый контур.
- Установить закономерности, по которым осуществляется нагружение щек дробильной машины, найти количественные показатели этих нагружений.

Методы исследования основаны на использовании

- известных положений механики разрушения;
- решений задач теории упругости для осесимметричного нагружения тел вращения;
- принципов математической статистики;
- приемов теории машин и механизмов.

Научные положения, выносимые на защиту:

- Любой кусок горной породы, находящийся в камере дробления щековой дробилки, может быть представлен в виде трехопорного- трехшарового твердого тела. Взаимное расположение кусков в камере и их совместное движение при заданном движении подвижной щеки дробилки в кинематическом смысле вполне адекватно описывается структурными формулами и законами движения механических систем.
- Силовое воздействие кусков горной массы, их частичное локальное разрушение в местах контактов приводит к основному разрушающему их нагружению, как фиктивных канонических областей, в частности в виде шаров, напряженно-деформированное состояние которых может быть описано известной задачей Нейбера теории упругости. Величины усилий, приводящих к разрушению в центре кусков, могут находиться на основании известных показателей крепости горных пород.

- Моделирование сил взаимодействия щек дробильной машины с кусками горных пород в пространстве камеры дробления позволяет вполне доказательно судить о суммарных воздействиях на подвижную щеку машины и прогнозировать затраты энергии на разрушение всего объема горной массы. Суждения о затратах энергии на разрушение породы подтверждаются результатами физического эксперимента.
- Наиболее рациональным путем совершенствования кинематических схем щековых дробилок является путь механического усиления и ужесточения связи между приводом машины и подвижной ее щекой. Новым поколением щековых дробилок могут являться машины, содержащие в своей кинематической схеме подвижные замкнутые изменяемые контуры. Нахождение новых кинематических схем дробильных машин достигается через специально разработанные приемы и процедуры.
- Щековые дробильные машины, включающие в свой состав замкнутые изменяемые контуры, кинематически и динамически могут исследоваться по методикам, разработанным автором и изложенным в диссертации.

Достоверность и обоснованность научных положений и результатов обеспечена тем, что выполненные теоретические исследования основываются на классических положениях теории упругости, на известных законах механики разрушения и законах теоретической механики. При решении частных задач в работе используются широко применяемые методы теории машин и механизмов, методы математической статистики и обоснованный физический эксперимент.

Научная новизна работы заключается в

- обосновании новой модели взаимодействия куска горной породы со щеками дробилки;
- определении взаимосвязей, позволяющих описывать расположение кусков горной породы в камере дробления;
- установлении закономерности, связывающей усилия сопротивления разрушению с размерами и количеством кусков горной породы в камере дробления;
- обосновании закономерности, позволяющей определять все многообразие кинематических схем щековых дробильных машин при заданных структурных условиях;
- разработке нового поколения кинематических схем щековых дробилок, в состав которых входит замкнутый изменяемый контур.

Практическая полезность. На основе метода синтеза были разработаны новые кинематические схемы щековых дробилок, на которые получены три патента РФ на изобретения. Разработанная методика соз

дания кинематических схем и анализа силового воздействия на подвижную щеку дробильной машины внедрена на Гурьевском филиале ОАО «Евразруда» (Кемеровская область, г. Гурьевск) и на ООО «Сталь КМК» (Кемеровская область, г. Новокузнецк) .

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 4 Международной научно-практической конференции “Перспективы развития Горно-добывающей промышленности”, г. Новокузнецк, 1997г.; на научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в 2000, 2001, 2002 г. в г.Новокузнецке; на VIII Международной научной конференции “Перспективы технологии разработки и использования минеральных ресурсов”, г. Новокузнецк, 2001г.; на X Международной научно-практической конференции “Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов ”, г.Новокузнецк, 2001г.; на VIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Современная техника и технологии”, ТПУ, г. Томск, 2002 г.; на пятнадцатой научно-практической конференции по проблемам механики и машиностроения, СибГИУ, г.Новокузнецк, 2004г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 научных статей, получено 3 патента на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 95 наименования, 11 приложений. Основной текст изложен на 134 машинописных листах и поясняется 59 рисунками и 6 таблицами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность постановки и цель исследований; определено содержание решаемых задач; приведены основные результаты, выносимые на защиту; кратко изложено содержание работы.

В первой главе проведен анализ известных теорий дробимости.

Большой вклад в установление теории дробления внесли Л.В. Риттингер, В.Л. Кирпичев, Ф. Кик, Г.Г. Егоров, П.А. Ребиндер, Ф.С. Бонд, Р.Д. Чарльз, А.К. Рундквист, С.Е. Андреев, Р.Т. Хукки, В.И. Кармазин и др. Все эти теории условно можно разделить на три группы:

- Основополагающие, к которым относят классические гипотезы Риттингера и Кирпичева-Кика;
- Законы и исследования, которые объединяют классические гипотезы;
- Теории для конкретных условий разрушения.

Риттингер, занимаясь вопросами обогащения полезных ископаемых, в 1867 году выдвинул идею о том, что работа, затраченная при дроблении, пропорциональна вновь образованной поверхности.

В соответствии с гипотезой Кирпичева- Кика, подобным деформациям геометрически подобных и физически одинаковых тел соответствуют работы, пропорциональные объемам тел и весам этих тел.

Объединив идеи Риттингера и Кирпичева-Кика, П.А. Ребиндер (1941) высказал идею о том, что общие затраты энергии при разрушении горных пород включают в себя, как затраты на деформацию среды, так и затраты, связанные с образованием новых поверхностей.

Ф.С. Бонд в своей теории предположил, что энергия при нагружении материала распределяется первоначально по его объему и, следовательно, пропорциональна объему куска, а с момента образования на поверхности трещины эта энергия концентрируется у краев трещины и далее работа становится пропорциональной площади трещины.

Кроме закона Бонда к объединяющим можно отнести также зависимости, полученные В.Н. Кармазиным, С.Е. Андреевым, Б.Р. Ракишевым и М.С. Кушпановым для различных условий дробления.

Нельзя не отметить исследования М.М. Протодьяконова- старшего. В 1926 г. им был найден не только весьма простой по технической реализации, но и исключительно глубокий по физической сущности способ интегральной оценки свойств горных пород через коэффициент крепости, который коррелирует с энергоемкостью разрушения пород.

В 1988 г. на специальном стенде Дворниковым Л.Т. и Наумкиным Н.И. были проведены широкие испытания по определению энергоемкости разрушения многих горных пород. Ими была найдена обобщающая эмпирическая связь между энергоемкостью W , коэффициентом крепости f и размерами продуктов разрушения d . Она имеет вид

$$W = 4.5 + 0.3 f - 0.35 d + 0.16 f d + 0.003 f^2 d + 0.006 f d^2 + 0.04 f^2 + 0.2 d^2.$$

Зависимости эти квазилинейны и могут быть представлены в виде

$$W = A + k f,$$

где A и k есть эмпирические коэффициенты, достаточно легко определяемые.

Кроме того, в первой главе рассмотрено широко принятое представление о взаимодействии горной породы со щеками дробилки в виде круга, имеющего две точки контакта с дробящими плитами.

Проведен анализ существующих кинематических схем щековых дробилок на основе классификации, проведенной Клушанцевым Б.В.

По принятой классификации щековые дробилки делятся на машины с простым движением щеки и на машины со сложным движением щеки. При этом под простым понимается такое движение щеки, при котором траектории перемещения точек подвижной щеки представляют собой прямые линии или части дуг окружностей, а при сложном - замкнутую кривую.

Опыт показал, что многие из кинематических схем находились случайно и практикой отвергались. Усложнение конструкций приводило к ухудшению основных технико-экономических показателей машин. Не было найдено такого подхода, который бы давал возможность отыскивать для конкретных условий весь возможный ряд кинематических схем.

Во второй главе рассматривается механика разрушения горных пород щековыми дробилками. Принятая ранее модель воздействия усилий на куски горной породы весьма условна и не позволяет рассмотреть истинного взаимодействия щек с дробимым твердым телом, т.к. куски горных пород, попадающие в пространство между щеками, могут иметь самые различные формы - от близких к шару до близких к параллелепипеду, при этом ни та, ни другая форма реально появиться не могут. Кроме этого, необходимо учитывать кинематику движения дробимых тел для того, чтобы определять направления сил трения, а значит и истинное движение тел в камере дробления.

Каким бы ни был кусок, он между щеками дробилки устойчиво может опереться тремя точками. Такие точки принципиально могут быть обнаружены у любого куска - это те точки, которые позволяют описать от некоторого центра куска сферу максимального радиуса.

Так как через найденные три точки можно провести единственную плоскость, то в этой плоскости можно найти окружность определенного радиуса ρ , в общем случае всегда меньшего, чем радиус сферы. Исходя из этого положения, предложено ввести в рассмотрение модель куска породы в виде трех шаров, представляющих единое тело (рисунок 1). Это такое тело, которое расположено внутри сферы радиуса R , а точки A, B, C касания тела о сферу расположены как угодно в пространстве.

Контуром a показана истинная форма тела.

Шары в трехшаровом теле могут иметь различные радиусы (r_1, r_2, r_3) и расстояния между центрами шаров ($S1, S2, S3$) могут быть сколь угодно разными. Кусок горной породы, попадая в пространство между щеками и устанавливаясь под действием сил тяжести, будет касаться щек именно точками A, B и C .

При повороте щеки 1 , трехшаровое тело 2 может двигаться

только поступательно вдоль линии AB (рисунок 2).

Механическая система, состоящая из звеньев 1 и 2, может быть

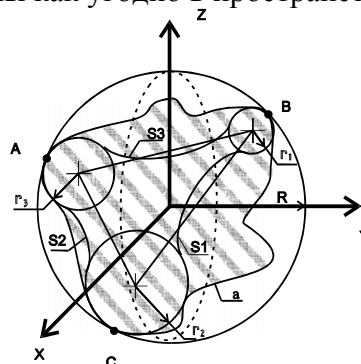


Рисунок 1

исследована кинематически (смещения S_{c1} , S_{c2} и S_2), а затем статически. При этом направления сил трения определяются как противоположные относительным смещениям.

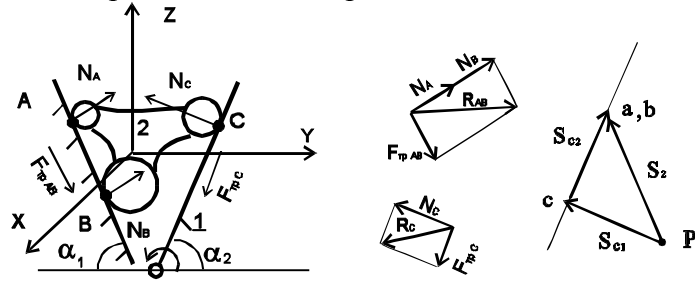


Рисунок 2- Кинематика трехшарового тела

Общее взаиморасположение камней в камере дробления можно описать известной универсальной структурной системой Л.Т. Дворникова, характеризующей взаимодействие кусков горной породы

$$\begin{cases} p_4 = \tau + (\tau - 1)n_{\tau-1} + \dots + in_i + \dots + 2n_2 + n_1, \\ n = 1 + n_{\tau-1} + \dots + n_i + \dots + n_2 + n_1, \\ W = 3n - p_4, \end{cases} \quad (1)$$

где p_4 - число точечных контактов камней между собой, уподобляемых кинематическим парам 4-го класса; τ - число контактов, которыми наиболее сложное звено соприкасается с другими звеньями; n_i - число камней-звеньев, добавляющих в общую цепь по i контактово-кинематических пар; n - общее количество звеньев-камней; W - подвижность механической системы.

Камни, находящиеся в камере дробления, если мысленно отделить их от подвижной и неподвижной щек, представляют собой (рисунок 3) механическую систему нулевой подвижности ($W=0$), т.е. систему неподвижную и статически определимую.

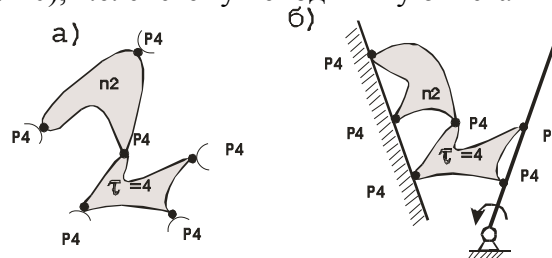


Рисунок 3- Схема взаимодействия куска со щеками при $\tau = 4$, $n = 2$

На основании системы (1) появляется возможность определять реальное взаиморасположение камней в камере дробления, а вводя такую систему в контакт со щеками (рисунок 3,б) исследовать движение

всей системы. В связи с тем, что реальные скорости движения щеки машины незначительны, возникающими в системе инерционными нагрузками в первом приближении можно пренебречь и процесс дробления рассматривать как квазистатический.

При движении щеки камни в камере дробления находят устойчивые положения, опираясь на другие камни в трех точках, через которые передаются усилия взаимодействия по весьма малым контактным площадям (рисунок 4,а).

Известно, что взаимосвязи частиц внутри объекта намного сильнее, чем на поверхности и поэтому неизбежно появляются локальные разрушения в местах контактов (рисунок 4,б).

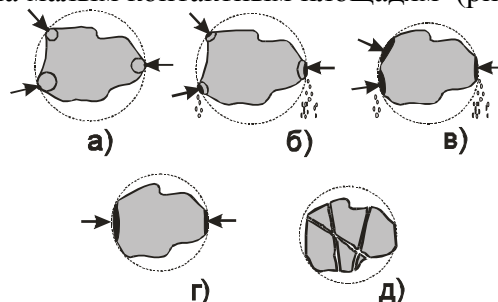


Рисунок 4- Стадии разрушения

В процессе таких разрушений тело каким-то образом смещается, а точки контакта перерастают в пятна контакта (рисунок 4,в).

В конечном итоге тело занимает вполне устойчивое положение под действием двух сил (рисунок 4,г). Дальнейшее нарастание усилий приводит к разрушению самой горной породы (рисунок 4, д).

При нахождении общих решений задачи о нагружении камней в дробилке представляется допустимым принимать обобщенный камень в виде тела наиболее приближенного к шару. Последний вывод весьма корректно доказывается в работах Гладкого С.Л. и Ясницкого Л.Н, в которых обосновывается так называемый метод фиктивных канонических областей (ФКО), успешно применяемый для расчета напряженно- деформированного состояния упругих тел. Согласно этому методу, если по поверхности канонического тела создать такое нагружение, при котором на поверхности некоторого вписанного тела возникнут напряжения, совпадающие с известными условиями, то решение для канонического тела будет одновременно решением и для вписанного тела. В частности канонической формой является шар.

С учетом изложенного в первом приближении предлагается представить напряженное состояние куска породы, возникающее во время дробления в щековой дробилке, в виде шара с сосредоточенной нагрузкой, действующей в полюсах шара, соответствующего стадии показанной на рисунке 4, г. Решение этой задачи сводится к известному решению задачи Г. Нейбера.

Напряженное состояние для таких тел удобно рассматривать в

сферической системе координат r, φ, α . Полное решение задачи производится с помощью разложения функций в ряды по полиномам Лежандра.

Закон изменения внешней нагрузки на поверхности $R=R_0$

$$\sigma_R = \sigma(\alpha) = \sum_{n=0}^{\infty} \sigma_n P_n(\cos \alpha), \quad \tau_{R\alpha} = \tau(\alpha) = - \sum_{n=1}^{\infty} \tau_n \frac{dP_n}{d\alpha} \sin \alpha,$$

где σ_n и τ_n - коэффициенты разложения, $P_n(\cos \alpha)$ - полином Лежандра n -ого порядка

Напряжения раскладываются на две составляющие (рисунок 5)

$$\sigma(\alpha) = \sigma(\alpha)^{(1)} + \sigma(\alpha)^{(2)},$$

где

$$\sigma(\alpha)^{(1)} = \begin{cases} -p_0 & \text{при } 0 < \alpha < \varepsilon, \\ 0 & \text{при } \varepsilon < \alpha < \pi, \end{cases} \quad \text{и} \quad \sigma(\alpha)^{(2)} = \begin{cases} -p_0 & \text{при } \pi - \varepsilon < \alpha < \pi, \\ 0 & \text{при } 0 < \alpha < \varepsilon. \end{cases}$$

Определение первой и второй составляющих сводится к решению интегралов

$$\sigma_n^{(1)} = -\frac{2n+1}{2} p_0 \int_0^{\varepsilon} P_n(\cos \alpha) \sin \alpha \, d\alpha = -\frac{P(2n+1)}{4\pi R_0^2},$$

$$\sigma_n^{(2)} = -\frac{2n+1}{2} p_0 \int_{\pi-\varepsilon}^{\pi} P_n(\cos \alpha) \sin \alpha \, d\alpha = -\frac{P(2n+1)}{4\pi R_0^2} (-1)^n.$$

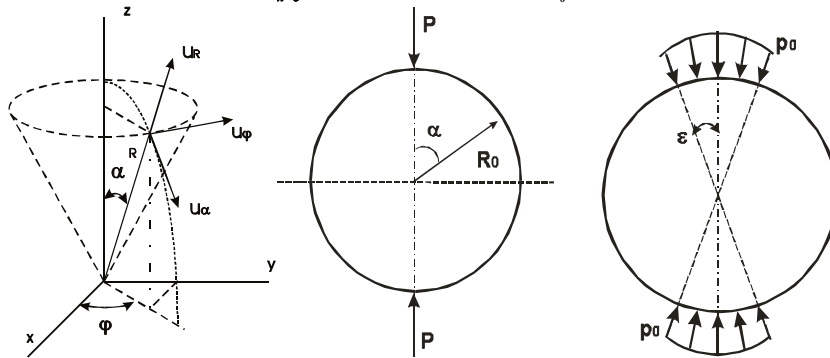


Рисунок 5

Таким образом, функция нагрузки разложится в ряд по полиномам Лежандра:

$$\sigma_n(\alpha) = \sigma_n^{(1)} + \sigma_n^{(2)} = \begin{cases} 0 & \text{при } n = 1, 3, 5, \dots, \\ -\frac{P}{2\pi R_0^2} (2n+1) & \text{при } n = 0, 2, 4, \dots, \end{cases} \quad (2)$$

При нормальной нагрузке краевые условия

$$R=R_0, \quad \sigma_R = \sigma(\alpha) = \sum_{n=0}^{\infty} \sigma_n P_n(\cos \alpha), \quad \tau_{R\alpha} = 0.$$

Принимая уравнения перемещения в виде

$$u_R = \left[A R^{n+1} (n+1) \left(n-2 + \frac{4}{m} \right) + B R^{n-1} n \right] P_n(\cos \alpha),$$

$$u_\alpha = \left[A R^{n+1} \left(n+5 - \frac{4}{m} \right) + B R^{n-1} \right] \frac{dP_n}{d\alpha},$$

закон Гука можно записать как

$$\begin{aligned} \frac{1}{2G} \sigma_R &= \left[A (n+1) \left(n^2 - n - 2 - \frac{2}{m} \right) R^n + B n (n-1) R^{n-2} \right] P_n(\cos \alpha); \\ \frac{1}{2G} \tau_{R\alpha} &= \left[A \left(n^2 + 2n - 1 + \frac{2}{m} \right) R^n + B (n-1) R^{n-2} \right] \frac{dP_n}{d\alpha}; \\ \frac{1}{2G} \sigma_\alpha &= - \left[A \left(n^2 + 4n + 2 + \frac{2}{m} \right) (n+1) R^n + B n^2 R^{n-2} \right] P_n(\cos \alpha) - \\ &\quad - \left[A \left(n+5 - \frac{4}{m} \right) R^n + B R^{n-2} \right] \frac{dP_n}{d\alpha} \operatorname{ctg} \alpha; \\ \frac{1}{2G} \sigma_\varphi &= - \left[A \left(n-2 - \frac{2}{m} - \frac{4n}{m} \right) (n+1) R^n + B n R^{n-2} \right] P_n(\cos \alpha) + \\ &\quad + \left[A \left(n+5 - \frac{4}{m} \right) R^n + B R^{n-2} \right] \frac{dP_n}{d\alpha} \operatorname{ctg} \alpha, \end{aligned} \quad (3)$$

где - $\sigma_R, \sigma_\alpha, \sigma_\varphi$ - нормальные напряжения в сферических координатах; m - число Пуассона

($m=1/\nu$, ν -коэффициент Пуассона); G - модуль сдвига ($G = \frac{Em}{2(m+1)}$, E - модуль упругости) A ,

B - коэффициенты разложения.

Напряжения при $n=0$

$$\sigma_R = \sigma_\alpha = \sigma_\varphi = -4 G A_0 \frac{m+1}{m}, \quad \tau_{R\alpha} = 0.$$

При $n=1$

$$\sigma_R = -8 G A_1 \frac{m+1}{m} R \cos \alpha, \quad \tau_{R\alpha} = -\frac{4 G A_1 (m+1)}{m} R \sin \alpha,$$

$$\sigma_\alpha = \sigma_\varphi = -16 G A_1 \frac{m+1}{m} R \cos \alpha.$$

Для вычисления коэффициентов A и B рекомендуется пользоваться уравнениями

$$A_0 = -\frac{m \sigma_0}{4 G (m+1)}, \quad A_1 = -\frac{m \sigma_1}{8 G R_0 (m+1)},$$

(нет необходимости определять значения B_0 и B_1 , так как они не приводят к появлению напряжений), а при $n \geq 2$

$$A_n = -\frac{\sigma_n}{4 G R_0^2 \Delta}, \quad B_n = \frac{\sigma_n}{4 G R_0^{n-2} \Delta} \left(\frac{n^2 + 2n - 1 + \frac{2}{m}}{n-1} \right),$$

где $\Delta = n(n-1) + (2n+1)\frac{m+1}{m}$, R_0 - радиус шара.

Рассматривая напряжения в центре шара, т.е. при $R=0$, можно заметить, что слагаемые из (3) равны нулю, кроме слагаемых, соответствующих коэффициентам A_0 и B_2 .

Таким образом

$$(\sigma_R)_{R=0} = \sigma_z = -\frac{7m+2}{7m+5} \sigma_2 + \sigma_0.$$

Учитывая (2)

$$\sigma_0 = -\frac{P}{2\pi R_0^2}, \quad \sigma_2 = -\frac{5P}{2\pi R_0^2}.$$

Напряжение в центре шара определится зависимостью

$$\sigma_z = -\frac{P}{2\pi R_0^2} \left(\frac{42m+15}{7m+5} \right),$$

откуда сила, при которой наступает разрушение в центре куска

$$P_{\text{разр}} = \frac{2\pi R_0^2 (7m+5)}{42m+15} \sigma_{\text{сж}}.$$

Исследован процесс одновременного разрушения кусков горной породы в камере дробления. С учетом размеров щеки, поступающего в

камеру дробления материала и полученного после разрушения, найдено количество точек контакта (рисунок 6). В соответствии с решением задачи Нейбера определены зависимости сил и момента сил сопротивления, как суммы усилий сопротивления, действующих в каждой точке контакта.

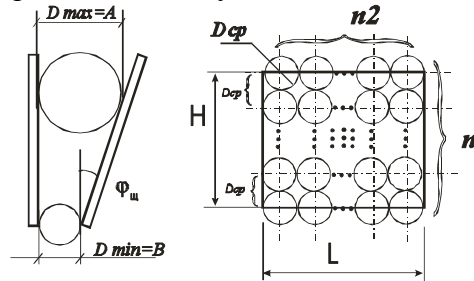


Рисунок 6

Количество кусков, устанавливающихся по высоте щеки и по ширине щеки при

$$D_{\text{ср}} = \frac{D_{\text{max}} + D_{\text{min}}}{2}$$

$$n_1 = \frac{H}{D_{\text{ср}}} + 1, \quad n_2 = \frac{L}{D_{\text{ср}}}.$$

Общее количество кусков

$$n = n_1 n_2.$$

Общее усилие F и момент сопротивления разрушению

$$F = \sum_{i=1}^{n1} \sum_{j=1}^{n2} f_{i,j}, \quad M = \sum_{i=1}^{n1} \left(h_i \sum_{j=1}^{n2} f_{i,j} \right),$$

где h_i - расстояние от мгновенного центра поворота щеки до линии действия точечного $f_{i,j}$ усилия, при этом значение $f_{i,j}$ определяется из решения задачи Нейбера при $R_o = D_{cp}/2$.

Предельные значения усилий предлагается определять по коэффициенту крепости горных пород $f = \sigma_{сжс} / 10$

$$P_{раз} = \frac{\pi D_{cp}^2 (7m + 5)}{2(42m + 15)} 10 f.$$

В третьей главе описан проведенный на модели щековой дробильной машины (рисунок 7) эксперимент по определению закона изменения сопротивления разрушению при статическом нагружении.

Экспериментальная установка представляет собой модель щековой дробилки (рисунок 8) с простым движением щеки 1.



Рисунок 7

Электродвигатель постоянного тока 2 через клиноременную передачу 3 приводит во вращение эксцентриковый вал 4, на кото-

ром насажен шатун 5. Шатун имеет специальные гнезда, в которые свободно входят концы передней 6 и задней 7 распорных плит. Противоположные концы плит вставлены в гнезда подвижной щеки и клинового регулировочного устройства 8.

Вращение эксцентрикового вала приводит в движение шатун. При смещении шатуна вверх концы распорных плит поднимаются, заставляя тем самым подвижную щеку поворачиваться вокруг оси подвеса 9, приближаясь к неподвижной щеке 10.

При движении шатуна вниз подвижная щека перемещается в обратном направлении под действием собственного веса и пружины 11.

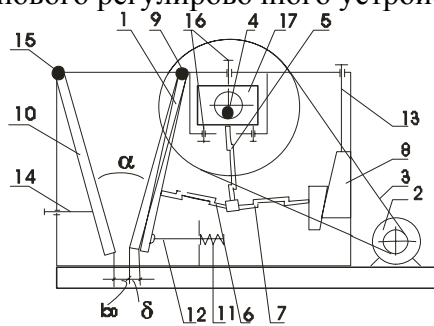


Рисунок 8

Во время проведения эксперимента в камеру дробления помещались камни, изготовленные из смеси цемента и песка. При вращении эксцентрикового вала с помощью специального ключа фиксировалось усилие сопротивления.

На каждом полученном графике можно выделить зоны: обратный ход, характеризующийся отсутствием момента сопротивления; начало рабочего хода, когда камни пытаются занять устойчивое положение; рост напряженного состояния, когда все больше и больше камней вовлекаются в процесс нагружения; участок стабильности, в котором возникающие усилия сопротивления разрушению не увеличивают общую величину момента сопротивления, а компенсируют снижение напряжения, возникающего за счет разрушения кусков, достигших предельного состояния, поэтому линия, характеризующая этот отрезок времени представляет собой линию, приближающуюся к горизонтальной; участок начала обратного хода, когда резко падает величина усилий.

На рисунке 9 представлен статистически обработанный на основании серии экспериментов общий закон изменения момента сопротивления разрушению.

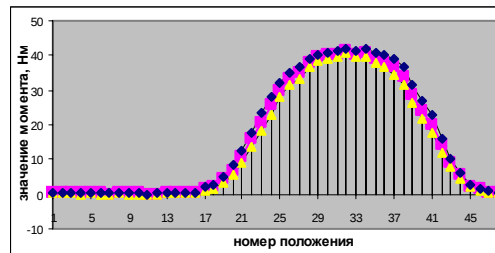


Рисунок 9

Рассмотрено определение мощности при-

вода машины с учетом усилий, возникающих в каждой точке контакта. Учитывая движение щеки относительно мгновенного центра скоростей, который определяется как точка пересечения прямых, перпендикулярных векторам скоростей точек щеки, получена зависимость мощности, потребной на разрушение кусков

$$P = M \omega = \sum_{i=1}^{n_1} \left(h_i \sum_j^{n_2} f_{i,j} \right) \omega ,$$

где ω - угловая скорость щеки; h - расстояние между точкой мгновенного центра вращения до линии действия силы сопротивления; f_{ij} - силы сопротивления разрушению, возникающие в точках контакта и определяемые из решения задачи Нейбера; n_1 - количество кусков, расположенных по высоте щеки; n_2 - количество кусков, расположенных по ширине щеки

Далее в работе обосновывается метод синтеза структур щековых дробильных машин. Основываясь на использовании универсальной структурной системы механических систем для поиска кинематических схем щековых дробилок предлагается система

$$\begin{cases} p_5 = \tau + (\tau - 1)n_{\tau-1} + \dots + in_i + \dots + 2n_2 + n_1, \\ n = 1 + n_{\tau-1} + \dots + n_i + \dots + n_2 + n_1, \\ l = 3n - 2p_5, \end{cases} \quad (4)$$

где p_5 - число одноподвижных кинематических пар пятого класса.

Задаваясь начальными условиями, а именно сложностью базисного звена цепи τ и общим числом звеньев n , по (4) вполне алгоритмично могут быть найдены все виды и числа звеньев n_i . Так, для $\tau=3$ и $n=5$ можно получить всего 5 отличающихся кинематических схем механизма (рисунок 10)

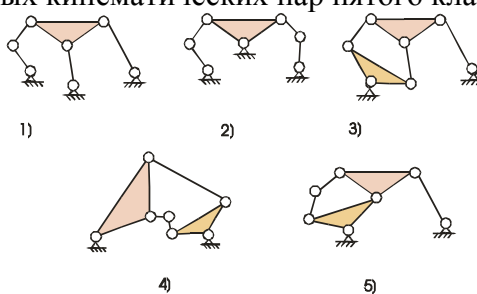


Рисунок 10

Последовательное расположение подвижной щеки на каждом звене найденных схем позволяет найти весь возможный ряд кинематических схем щековых дробилок. Так, для механизмов, показанных на рисунке 10,

исключая подобные друг другу схемы, можно построить 37 новых щековых дробильных машин.

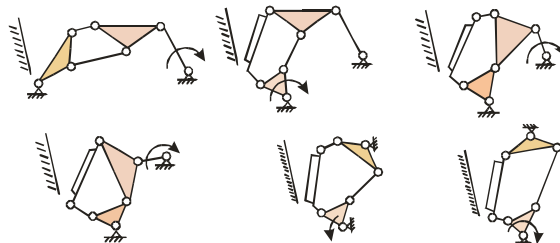


Рисунок 11

На рисунке 11 приведена часть таких схем, которые могут быть отнесены к новому поколе-

нию щековых дробилок, т.к. в состав их входит замкнутый изменяемый контур. Такие машины обладают повышенной жесткостью конструкции.

На три кинематические схемы щековых дробильных машин (рисунок 12) с замкнутым изменяемым контуром автором получены патенты РФ.

Патент РФ №2142850

Патент РФ № 2232637

Патент РФ № 2235594

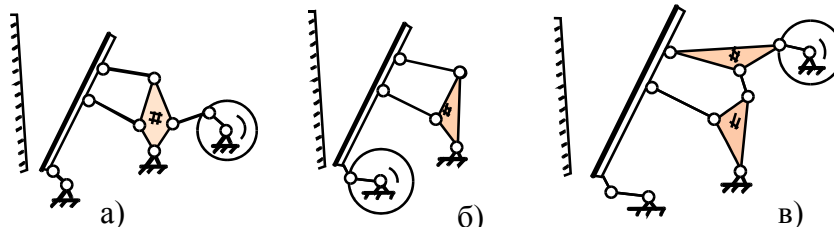


Рисунок 12

В четвертой главе рассмотрены методы кинематического и ди

наимического анализа для щековой дробилки, в состав которой входит замкнутый изменяемый контур, а также метод статического уравнивания машины.

С целью определения изменения скоростей звеньев дробилки выделяются из кинематической цепи простые группы: начальное звено

со стойкой, закон движения которого задан, диада, трехповодковое звено Бурместера. В качестве метода

кинематического анализа применяется известный в теории механизмов и машин метод построения планов скоростей. Определение

скоростей и ускорений трехповодкового звена (подвижной щеки дробилки) вызывает определенную трудность, для решения задачи используется специальная точка-точка Асура (рисунок 13), которая

фиксируется на пересечении линий двух поводков. Дальнейшее решение сводится к определению скоростей и ускорений специальной точки, а по ним скоростей и ускорений всех основных точек механизма.

С целью проверки найденных решений используется численный метод, основанный на методе замкнутых контуров. Основная идея этого метода заключается в том, что записывается система уравнений, представляющих проекции звеньев механизма на координатные оси. Для определения скоростей и ускорений точек осуществляется дифференцирование полученной системы уравнений.

Решается система уравнений численно методом последовательного приближения, для чего используется программа MathCAD 2000. Задаваясь для каждого положения ведущего звена (φ) начальным приближением значений углов $\alpha... \gamma$, определяющих положение звеньев механизма, и, решая систему уравнений, вычисляются действительные значения этих углов, скоростей и ускорений звеньев.

Динамический анализ дробилки с замкнутым изменяемым контуром рассмотрен для двух вариантов

- момент на двигателе постоянный и не зависит от момента сопротивления,
- момент на валу есть функция от момента сопротивления.

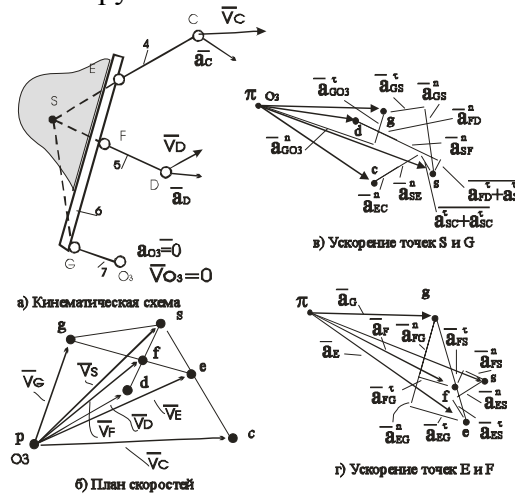


Рисунок 13

Для определения закона движения ведущего звена для первого случая используется известный в теории машин метод построения диаграммы энергомасс, для второго случая – решение, предложенное Зиновьевым В.А. и Бессоновым А.П.

В работе также решается задача уравнивания сил инерции, действующих на фундамент дробильной машины с замкнутым изменяемым контуром. Для решения предложено воспользоваться методом подобия и методом нуль-векторов совместно с методом функциональных цепей. Чтобы получить функциональную цепь достаточно некоторые звенья преобразовать в невесомые, а затем отделить их от механизма (рисунок 14).

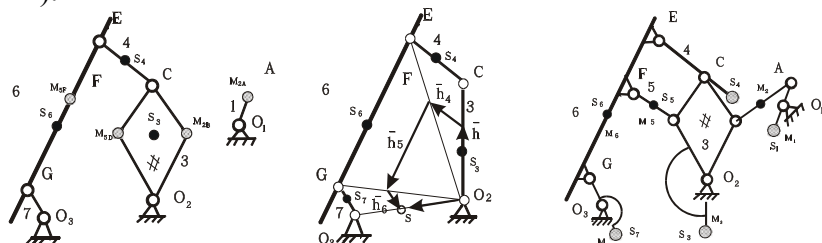


Рисунок 14

Уменьшение инерционных воздействий особенно важно в щековых дробильных машинах, так как некоторые звенья (щека, шатун) обладают большой массой. Появление даже небольшого ускорения центра масс приводит к большим динамическим воздействиям. Уравнивание сводит такое влияние до минимума, тем самым, улучшая работу машины и ее технологических показателей

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

- Процессы разрушения горных пород в щековых дробилках подчиняются известным законам дробления (Кирпичева-Кика, Ребиндера, Бонда). Однако наиболее простым способом оценки энергозатрат при разрушении горных пород может быть принят способ профессора Протодяконова М.М., связывающий крепость пород по коэффициенту крепости f с напряжением на сжатие при одноосном нагружении образцов.
- Поведение камней в камере дробления вполне корректно может быть описано на основании представления их в виде звеньев механической системы, подчиняющихся известным теоремам кинематики как раздела классической механики.

Установление действительных направлений относительного движе

- ния камней в камере дробления позволяет в соответствии с первым законом трения Кулона безошибочно определять направления сил трения и решать задачу взаимодействия щеки дробилки с отдельными кусками пород и кусков между собой.
- Куски горных пород в камере дробления в первом приближении могут моделироваться как трехопорные шаровые тела, геометрически оцениваемые радиусами описывающих их сфер.
- Процесс разрушения отдельных камней в камере дробления состоящий из ряда фаз, в частности- фаз локальных разрушений в местах контактов, вполне адекватно приводит к схеме нагружения, характерной для известной задачи Нейбера, описывающей сжатие сферического тела сосредоточенными в полюсах силами.
- Решение задачи Нейбера применительно к дроблению кусков горных пород в камере дробления дает возможность достаточно приемлемо для технических расчетов определять предельные силы воздействия, приводящие к разрушению кусков. Суммирование одновременно действующих сил между кусками пород и движущейся щекой дробилки позволяет находить величины суммарных сил, необходимых для совершения всего процесса дробления.
- Основываясь на решении задачи суммирования усилий между щеками дробилки и кусками горной массы, на физическом эксперименте, выполненном на модели щековой дробилки, можно утверждать, что изменение крутящего момента на ведущем валу дробилки подчиняется определенному закону, близкому к полусинусоидальному, интегрирование которого позволяет находить мощности привода дробильных машин.
- Разработанный в диссертации алгоритм синтеза структуры плоских механизмов с кинематическими парами пятого класса позволяет определять все многообразие кинематических схем дробильных машин по заданному числу звеньев.
- Создание щековых дробилок нового - третьего поколения должно основываться на использовании в их кинематических схемах замкнутых изменяемых контуров, позволяющих обеспечить значительно более жесткое воздействие на разрушаемую среду. Новый подход подтвержден тремя схемами принципиально новых щековых дробилок, защищенных патентами Российской Федерации. Кинематические и динамические характеристики новых щековых дробилок могут быть найдены вполне адекватно с использованием классических методов теории машин основанных на подходах Л.В. Ассура, Ф. Виттенбауэра, В.А. Щепетильникова, В.И. Доронина.

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях

1. К вопросу об энергозатратах в процессах, связанных с дробимостью горных пород. Дворников Л.Т., Прохоренко С.В., Макаров А.В. Тезисы докладов 4 Международной научно-практической конференции “Перспективы развития Горно-добывающей промышленности” / Под общей редакцией В.Н. Фрянова, Е.В. Пугачева / СибГГМА.- Новокузнецк, 1997. с. 185-186.
2. Л.Т. Дворников, А.В. Макаров. Щековая дробилка. Патент Р.Ф. № 2142850. Бюллетень изобретений № 35, 1999 г.
3. Уравновешивание щековой дробилки, включающей в свой состав замкнутый изменяемый контур. Макаров А.В. Труды региональной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Наука и молодежь”/Под общей редакцией С. М. Кулакова/ СибГИУ.- Новокузнецк, 2000. с. 213-214
4. Новые подходы в теории дробления горных пород. Дворников Л.Т., Макаров А.В. Труды VIII Международной научной конференции “Перспективы технологии разработки и использования минеральных ресурсов.”/ Под общей редакцией В.Н. Фрянова, Е.В. Пугачева /СибГИУ, г. Новокузнецк, 2001. с. 96-99.
5. Кинематическое исследование щековой дробилки с замкнутым изменяемым контуром при помощи программы MATHCAD 2000. Макаров А.В. Труды региональной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения”/Под общей редакцией С. М. Кулакова / СибГИУ.- Новокузнецк, 2001. с. 273-275.
6. Синтез щековой дробилки с помощью программы MATHCAD 2000. Макаров А.В. Труды региональной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых “Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения”/Под общей редакцией С. М. Кулакова/ СибГИУ.- Новокузнецк, 2001. с. 276-278.
7. Определение напряженного состояния куска горной породы при разрушении щековой дробилкой. Дворников Л.Т. Макаров А.В. Материалы X Международной научно-практической конференции “Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов ”/Под общей редакцией В.Н. Фрянова.- Новокузнецк, 2001.с.96-99.
8. О расположении камней горной породы в камере дробления. Макаров А.В. . Наука и молодежь: Труды региональной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Под общей редакцией С. М. Кулакова / СибГИУ.- Новокузнецк, 2002. с. 275-276.
9. Опыт синтеза кинематических цепей щековых дробилок. Дворников Л.Т. Макаров А.В. Материалы четырнадцатой научно-практической конференции по проблемам механики и машиностроения/ Под редакцией Э.Я.Живаго/ СибГИУ.- Новокузнецк,2004.с. 61-70
10. Л.Т. Дворников, А.В. Макаров. Щековая дробилка. Патент Р.Ф. № 2232637. Бюллетень изобретений № 20, 2004 г.
11. Л.Т. Дворников, А.В. Макаров. Щековая дробилка. Патент Р.Ф. № 2235594. Бюллетень изобретений № 25, 2004 г.

Макаров Алексей Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ЩЕКОВЫМИ
ДРОБИЛЬНЫМИ МАШИНАМИ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИХ КОНСТРУКЦИЙ**

Автореферат

Изд. Лиц. № 01439 от 05.04.200 г. Подписано в печать 11.04
Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.
Усл. Печ. л. 1,39. Уч.-изд. Л. 1,56. Тираж 100. Заказ

ГОУ ВПО “Сибирский государственный индустриальный
университет”

654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.
Издательский центр ГОУ ВПО “СибГИУ”