

Шерстобитов Юрий Антонович, Студент,  
Санкт-Петербургский Горный Университет императрицы Екатерины II  
Sherstobitov Yuri Antonovich  
St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛОПАТКИ И АБРАЗИВА  
В СИСТЕМЕ «ROCKY DEM» ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА «ANSYS»  
MODELING OF THE INTERACTION OF A BLADE AND AN ABRASIVE  
IN THE ROCKY DEM SYSTEM OF THE ANSYS SOFTWARE PRODUCT**

**Аннотация.** В данной статье описан процесс создания модели эксперимента, который заключается в ударно-абразивном изнашивании лопатки дробеметного аппарата посредством взаимодействия со стальной дробью. В качестве модели износа применяется модель «Арчарда». Полученная модель содержит большое количество борозд, характерных для абразивного изнашивания и ямки, характерные для ударно-абразивного изнашивания.

**Abstract.** This article describes the process of creating an experimental model, which consists in impact-abrasive wear of the blade of a shot-blasting apparatus through interaction with a steel shot. The Archard model is used as a wear model. The resulting model contains a large number of grooves characteristic of abrasive wear and pits characteristic of impact-abrasive wear.

**Ключевые слова:** Моделирование, ударно-абразивный износ, износостойкость, модель Арчарда, Ansys, Rocky DEM.

**Keywords:** Modeling, impact and abrasive wear, wear resistance, Archard model, Ansys, Rocky DEM.

Исходные данные для моделирования экспериментов взаимодействия лопатки дробеметного аппарата и абразива представлены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные к моделированию эксперимента:

Характеристика	Значение	Характеристика	Значение
Материал лопатки	ЧХ16М2	Скорость подачи дроби, м/с	6,5
Плотность материала лопатки, кг/м <sup>3</sup>	7850	Подача дроби на 1 лопатку, кг/мин	20
Коэффициент Пуассона для лопатки	0,28	Плотность материала дроби, кг/м <sup>3</sup>	7850
Коэффициент изнашивания, м <sup>3</sup> /Дж	$3,319 \cdot 10^{-7}$	Модуль Юнга для дроби, ГПа	210
Частота вращения лопатки, об/мин	280	Коэффициент Пуассона для дроби	0,3
Диаметр дроби, мм	1	Время моделирования эксперимента, с	10

Для удобства визуализации моделей эксперимента, к некоторым параметрам был применен коэффициент пропорциональности, равный 10, т.е. данные показатели уменьшены (частота вращения лопатки, скорость подачи дроби) в 10 раз.



В рабочей среде «Ansys Workbench» нажимаем правой кнопкой мыши на раздел «Geometry» («Геометрия») в блоке «Rocky Dem», выбираем вкладку «Insert Geometry» («Добавить геометрию») и вставляем геометрию лопатки дробеметного аппарата, созданную ранее в системе «Компас-3D» [2, 4].

Далее левой кнопкой мыши нажимаем «Setup» («Настройка») и переходим в рабочую среду модуля «Rocky DEM» для моделирования процесса взаимодействия построенной лопатки и абразива, а именно дроби.

В дереве проекта переходим к блоку «Physics» («Физика»), и в разделе «Momentum» («Импульс») открываем графу «Normal Force» («Нормальная сила») и выбираем опцию «Hertzian Spring Dashpot» («Герцовский упругий демпфер»), так как абразив будет иметь форму сферы. В графе «Numerical Softening Factor» («Численный коэффициент смягчения») выставляем на значение «10» для облегчения процесса моделирования. В разделе «Coarse-Graining» («Крупнозернистый») ставим галочку рядом с опцией «Coarse-Grain Modeling» («Моделирование крупного зерна»).

Затем в дереве проекта переходим к блоку «Modules» («Модули») и ставим галочки рядом с модулями, которые необходимы для полного результата анализа процесса изнашивания, а именно:

1. «Boundary Collision Statistic» («Статистика столкновений границ»);
2. «Inter-group Collision Statistic» («Статистика межгрупповых столкновений»);
3. «Inter-particle Collision Statistic» («Статистика столкновений частиц»).

В модуле «Boundary Collision Statistic» («Статистика столкновений границ») выставляем галочки рядом с опциями «Normal Impact Velocity» («Нормальная скорость удара») и «Tangential Impact Velocity» («Скорость тангенциального удара»).

В модуле «Inter-group Collision Statistic» («Статистика межгрупповых столкновений») выставляем галочки рядом с опциями «Forces» («Силы»), «Impact Energy» («Энергия удара»), «Shear Energy» («Сдвиговая энергия»), «Normal Impact Velocity» («Нормальная скорость удара») и «Tangential Impact Velocity» («Скорость тангенциального удара»).

В модуле «Inter-particle Collision Statistic» («Статистика столкновений частиц») выставляем галочки рядом с опциями «Forces» («Силы»), «Normal Impact Velocity» («Нормальная скорость удара») и «Tangential Impact Velocity» («Скорость тангенциального удара»).

Далее в дереве проекта переходим к блоку «Geometry» («Геометрия»), где уже загружена модель лопатки из системы «Компас-3D». В открывшемся окне редактора данных в разделе «Coloring» («Цвет») ставим галочку рядом с пунктом «Edges» («Края»). На модели лопатки появляется сетка, которая будет воспринимать дальнейшие нагрузки от удара дроби.

Но, как можно заметить на рисунке 1, автоматически созданная сетка получается неидеальной – фасеты неправильной формы и разного размера. Исходя из этого, воспринимаемая нагрузка от удара дроби будет некорректно сохраняться на поверхности лопатки.

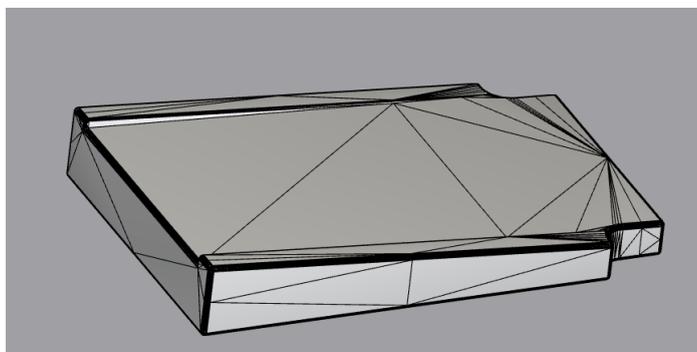


Рисунок 1 – Автоматически созданная сетка на модели лопатки в системе «Rocky»



Для того, чтобы улучшить сетку и нормализовать воспринимаемые лопаткой нагрузки от ударно-абразивного изнашивания, необходимо перейти в настройки геометрии и в графе «Triangle Size» («Размер треугольника») вместо значения «0,3 м» назначить размер ячейки сетки равным «0,003 м».

На рисунке 2 представлена улучшенная сетка модели лопатки:

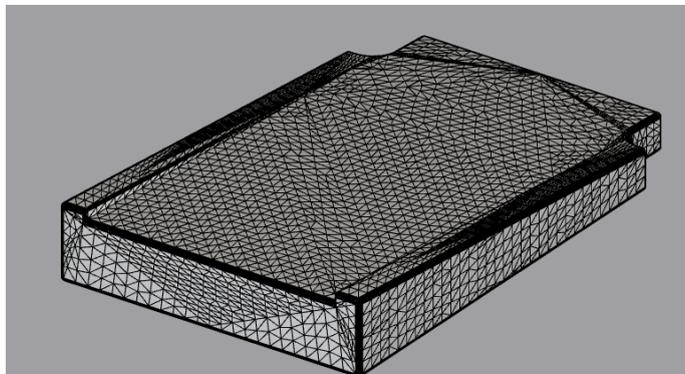


Рисунок 2 – Улучшенная сетка на модели лопатки в системе «Rocky»

Далее переходим к настройкам «Wear» («Износ») и в графе «Wear Model» («Модель износа») выбираем встроенную в программную среду «Shear Work Proportionality (Archard's Law)» («Пропорциональность работы сдвига (Закон Арчарда)») [1, 3].

В графе «Volume Shear/Work Ratio» («Соотношение объема и работы сдвига») выставляем значение коэффициента изнашивания из первой модели эксперимента, то есть коэффициент изнашивания равен  $3,319 \cdot 10^{-7}$  (см. таблицу 1).

Перейдем к заданию движения для модели лопатки. Для этого в дереве проекта выбираем блок «Motion Frames» («Движущиеся кадры»), нажимаем правой кнопкой мыши и выбираем опцию «Create Motion Frame» («Создать кадр движения»). Чтобы задать лопатке вращение, перейдем к следующим пользовательским настройкам:

1. В графе «Relative Position» («Относительная позиция») выставляем следующие значения: «0» по оси OX, «-0,0625» по оси OY и «0» по оси OZ;
2. В графе «Relative Rotation Vector» («Относительный вектор вращения») выставляем значение «0» по всем осям;
3. В графе «Edit Motion» («Редактировать движение») нажимаем на крестик и добавляем строку движения;
4. В графе «Stop Time» («Время окончания») выставляем значение «10 с»;
5. В графе «Type» («Тип») выбираем опцию «Rotation» («Вращение»);
6. В графе «Initial Angular Velocity» («Начальная угловая скорость») по оси OX выставляем значение, равное частоте вращения лопатки для первой модели эксперимента, то есть значение «280 об/мин» (см. таблицу 1).

В дополнительном окне можно посмотреть на движение лопатки и убедиться, что все работает исправно.

После подготовки геометрии лопатки к моделированию эксперимента необходимо создать точку входа для поступающей дроби. Нажимаем правой кнопкой мыши на блок «Geometry» («Геометрия») и выбираем опцию «Create Inlet» («Создать вход»). В открывшемся окне редакторе данных задаем следующие пользовательские настройки:

1. В разделе «Type» («Тип») выбираем «Rectangular Inlet» («Прямоугольный вход»);



2. В разделе «Centre Coordinates» («Координаты центра») задаем следующие координаты центра входа: «0 м» по оси OX, «0,012 м» по оси OY и «-0,1 м» по оси OZ;
3. В разделе «Alignment Angle (Global Y-axis)» («Угол выравнивания (Глобальная ось OY)») выставляем значение, равное «90°»;
4. В разделе «Incline Angle (Global Z-axis)» («Угол наклона (Локальная ось OZ)») выставляем значение, равное «-90°»;
5. В разделе «Length» («Длина») назначаем длину прямоугольника входа дробы равным «0,07 м»;
6. В разделе «Width» («Ширина») назначаем ширину прямоугольника входа дробы равным «0,059 м».

Используя данные пользовательские характеристики, получаем точку входа дробы для анализируемой модели эксперимента (см. рисунок 3).

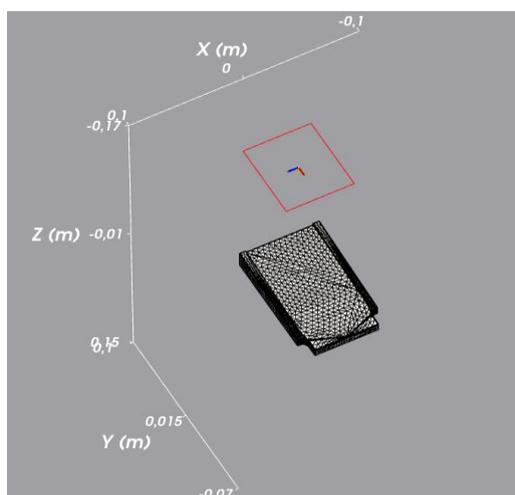


Рисунок 3 – Точка входа дробы

Далее необходимо создать непосредственно дробь, участвующую в контакте с моделью лопатки. Для этого в дереве проекта переходим к блоку «Particles» («Частицы»). Нажимаем правой кнопкой мыши и выбираем опцию «Create Particles» («Создать частицы»). Затем даем наименование частицам и в разделе «Shape» («Форма») выбираем «Sphere» («Сфера»). Далее в графе «CGM Scale Factor» («Масштабный коэффициент модели крупного зерна») выставляем значение «10». Ниже в таблице выставляем размер дробы равный «0,001 м».

Полученную дробь можно увидеть на рисунке 4:

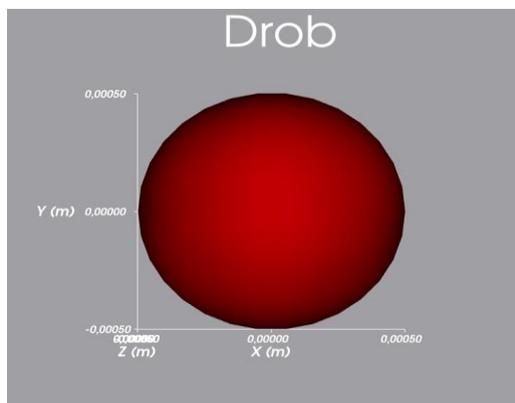


Рисунок 4 – Модель дробы



После создание модели дробы переходим к блоку «Inputs» («Входы») в дереве проекта. Правой кнопкой мыши выбираем опцию «Create Continues Injection» («Создать непрерывную инъекцию»), чтобы осуществить подачу дробы на модель лопатки.

В открывшемся окне редактора данных в разделе «Entry point» («Точка входа») выбираем ранее созданную точку входа дробы.

Далее в подразделе «Particles» («Частицы») добавляем ранее созданную дробь в таблицу. В той же таблице в графе «Mass Flow Rate» («Массовый расход») задаем подачу дробы, опираясь на исходные данные (см. таблицу 1), то есть «20 кг/мин».

В подразделе «Time» («Время») необходимо задать время подачи дробы на модель лопатки. Время подачи выбираем равным времени моделирования эксперимента, то есть «10 с».

В подразделе «Entry» («Вход») можно задать начальную скорость, с которой будут выходить частицы в ходе моделирования эксперимента. В графе «Target Normal Velocity» («Целевая нормальная скорость») ставим галочку и задаем скорость частиц, основываясь на исходных данных (см. таблицу 1), равной «6,5 м/с».

В подразделе «Info» («Информация») система «Rocky» по пользовательским настройкам автоматически рассчитывает количество частиц, которые примут участие в ходе эксперимента. В ходе данного взаимодействия будет задействовано 811 частиц.

После настройки подачи дробы на поверхность лопатки переходим к блоку «Domain Settings» («Настройки области»). Данный блок необходим для настройки области, в которой будут участвовать частицы. Если дробь покидает данную область, она выходит из расчета эксперимента.

Перейдем непосредственно к настройке области эксперимента. Убираем галочку с графы «Use Boundary Limits» («Использование граничных ограничений») и задаем пользовательские настройки. В графе «Min Value» («Минимальное значение») выставляем значение «-0,1 м» по оси OX, «-0,07 м» по оси OY и «-0,17 м» по оси OZ. В графе «Max Value» («Максимальное значение») выставляем значение «0,1 м» по осям OX и OY, по оси OZ – значение «0,15 м».

Созданная область модели эксперимента, в которой будут взаимодействовать исходная лопатка и частицы дробы, представлена на рисунке 5:

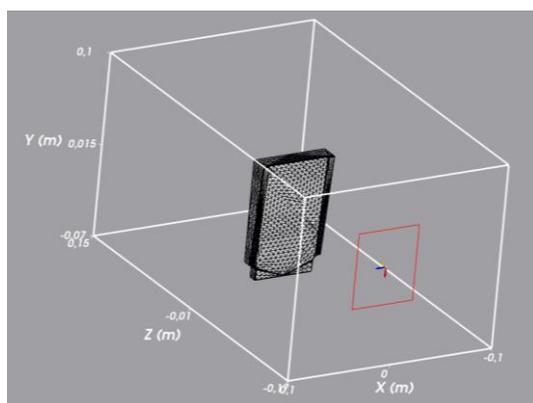


Рисунок 5 – Область модели эксперимента

Геометрия лопатки подготовлена, частицы дробы и их точка входа созданы, подача абразива и область модели эксперимента настроены. Переходим непосредственно к блоку «Solver» («Решатель»), который смоделирует процесс взаимодействия частиц дробы с геометрией лопатки.



В подразделе «Time» («Время») в графе «Simulation Duration» («Продолжительность моделирования») выставляем время, равное подачи дробы, то есть равное «10 с». В графе «Simulation» («Моделирование») выставляем частоту кадров модели эксперимента равное «0,01 с».

В подразделе «General» («Общий») можно выбрать процессор, который будет моделировать эксперимент, и их количество.

В подразделе «Energy Spectra» («Энергетический спектр») ставим галочки рядом с опциями «Particles Energy Spectra» («Энергетический спектр частиц») и «Contacts Energy Spectra» («Контакты энергетического спектра»)

После задания всех пользовательских настроек в среде «Rocky» запускаем решатель.

Результаты моделирования представлены ниже на рисунке 6:

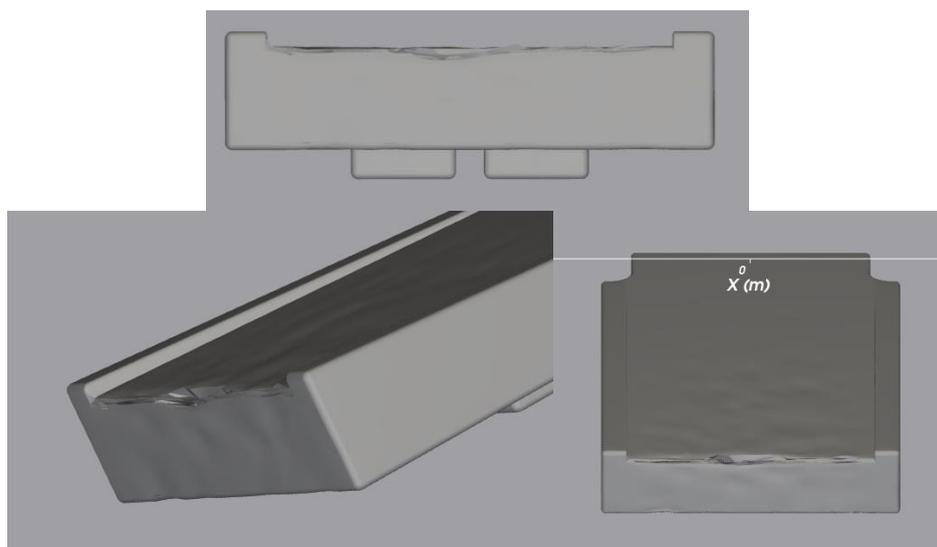


Рисунок 6 – Износ лопатки с исходным материалом ЧХ16М2  
(Коэффициент изнашивания  $3,319 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{Дж}$ )

**Вывод:** модель Арчарда, встроенная в системную среду «Rocky DEM» программного продукта «Ansys», позволяет смоделировать процесс ударно-абразивного изнашивания лопатки дробеметного аппарата в ходе взаимодействия с металлической дробью. Благодаря данной модели можно подобрать материал лопатки большей твердости и меньшего коэффициента изнашивания, что увеличит износостойкость и срок службы расходных материалов дробеметного аппарата.

*Список литературы:*

1. Archard J. F. Theory of mechanical wear // Research. 1952. V. 5. No 8.
2. ANSYS 2020 R2 Documentation. – Houston: Mechanical User Guide, Inc. – 2020.
3. Плащинский В. А., Белоглазов И. И., Ахмеров Э. В. Анализ модели изнашивания рабочих элементов шаровой мельницы в процессе измельчения руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 7. – С. 91–110. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_7\_0\_91.
4. Документация Rocky DEM: руководство пользователя / ANSYS Inc. – 2023.

