

УДК 538.62, 548:537.611.46

DOI: 10.22213/2410-9304-2017-3-100-111

*Н. К. Липин, аспирант**М. А. Плетнёв, доктор химических наук, доцент**ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ФРЕЗЕРНОГО КОМБАЙНА НА БАЗЕ ЛУНОХОДА С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ ИМИТАЦИОННОГО ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*В работе выполнен сравнительный анализ вариантов конструкции фрезерного комбайна, созданных на базе лунохода при помощи имитационных расчетов. Работа ориентирована на раздел Федеральной космической программы России на 2016–2025 годы «Фундаментальные космические исследования», согласно которому проблема создания фрезерного комбайна для проведения геологических исследований на поверхности других планет является актуальной.*

*Целью исследования является оптимизация конструкции фрезерного комбайна, созданного на базе лунохода, с помощью технологии сверхвысокополигонального динамического 3D-моделирования. Для достижения поставленной цели была использована технологическая цепочка, условно разделенная на несколько основных этапов.*

*В связи с требовательностью к ресурсам и специфике задач имитационное моделирование проводилось при помощи аппаратно-программных комплексов.*

*Получены результаты в виде моделей фрезерного комбайна и лунной поверхности. Создан интерактивный симулятор, функционирующий в современных полномасштабных технологиях виртуальной реальности для обучения будущих операторов при выполнении миссий к Луне.*

*Соответствующий требованиям проектный облик, полученный итерационным методом проектирования, может применяться в системах информационной поддержки на всех этапах жизненного цикла изделия.*

*Проведение таких работ является необходимым условием обеспечения перспектив применения систем моделирования как для проведения экспертиз, так и в интересах решения перспективных задач по конструированию космической техники.*

**Ключевые слова:** фундаментальные космические исследования, полномасштабные технологии виртуальной реальности, реголит, жизненный цикл изделия.

### **Введение**

Исследования в области проведения открытых горных работ на поверхности Луны по добыче летучих, необходимых для жизнеобеспечения и сопутствующих ресурсов предусмотрены Федеральной космической программой России на 2016–2025 годы (ФКПР-2025). Ее раздел «Фундаментальные космические исследования» предусматривает детальные контактные исследования области южного полюса, а также доставку образцов лунного грунта на Землю. Южный полюс Луны интересен тем, что там предполагается обнаружить воду [1].

Проведение открытых горных работ с помощью фрезерного комбайна на базе лунохода является наиболее производительным и технологически простым методом. Однако проведение полноценных натурных испытаний подобной техники в условиях Луны сложно и экономически нецелесообразно.

В НАСА сообщили о совместной с Тайванем работе по созданию геологического лунохода, предназначенного для добычи полезных ископаемых не только на Луне, но и на других планетах. Приступить к тестам работа-геолога планируется уже в 2017 го-

ду, а отправка на Луну посадочного модуля запланирована на начало 2020-х годов [2].

Информационный поиск показал, что проблема создания фрезерного комбайна для проведения геологических исследований на поверхности других планет является актуальной [3]. Исследования в этой области проводятся космическими агентствами США, Канады, объединенной Европы, Китая.

Тем не менее работы, связанные с созданием аналогичного или близкого по своим характеристикам и назначению лунохода – горно-обогачительного комбайна, выявить не удалось. Рассмотренные в [4] прототипы луноходов, разрабатываемых в настоящее время, отстают от требований по ряду характеристик, в том числе по глубине бурения, по технологии исследования поверхности Луны, по времени функционирования на Луне, а также по скорости и дальности передвижения аппаратов.

Функциональные возможности и эффективность использования фрезерного комбайна можно изучить путем применения технологий динамического моделирования и визуализации соответствующих процессов [5] технологий виртуальной реальности. Это одно из основных направлений шестого технологического уклада мировой экономики наряду с биотехнологиями, нанотехнологиями, роботикой, новой медициной и новым природопользованием [6, 7].

Использование виртуальных моделей позволяет разработать и оценить работоспособность конструируемого оборудования при выполнении процессов добычи ресурсов на поверхности Луны, так как снижается потребность в дополнительной интерпретации моделируемых процессов благодаря их привычному, близкому к реальной действительности, восприятию.

Создание отечественных систем технологического оборудования для проведения открытых горных работ, оснащенных фрезой, позволит:

- дополнить существующие на текущий момент сведения о строении и происхождении Луны;
- производить геологическую разведку и исследование поверхности Луны контактными методами по наиболее интересным с научной точки зрения маршрутам;
- определить наиболее перспективные районы развертывания временной или постоянно действующей лунной базы, объектов промышленного производства и др.

Рассмотренная проблемная ситуация позволяет сформулировать цель исследования как оптимизацию конструкции фрезерного комбайна, созданного на базе лунохода, с помощью технологии сверхвысокополигонального динамического 3D-моделирования. Кроме того, необходимо решить и другие задачи: выполнить моделирование лунной поверхности и новых элементов конструкции фрезерного комбайна, задать физически корректные свойства материалов (плотность и масса фрезы, лунного реголита), подобрать оптимальное расположение конструктивных элементов с учетом пределов хода движущихся частей.

### **Методы и результаты исследования**

Для достижения поставленной цели использовали технологическую цепочку, условно разделенную на несколько основных этапов:

- а) создание моделей новых элементов конструкции фрезерного комбайна и их установка на луноход [8, 9];
- б) разработка модели участка лунной поверхности по материалам предыдущих исследований лунной поверхности;

в) симуляция процесса добычи реголита с использованием движущихся частей фрезерного блока в искусственно воспроизводимой (виртуальной) среде с целью выявления ошибок и слабых мест конструкции;

г) корректировка проектного облика с учетом полученных в модельном эксперименте данных и замечаний технических специалистов;

д) оптимизация составных частей конструкции фрезерного комбайна итерационным методом, то есть циклично выполняется тестирование и внесение правок;

е) обоснование окончания работ посредством сравнительного анализа с использованием имитационного моделирования.

В связи с требовательностью к ресурсам и специфике задач данная исследовательская работа была выполнена при помощи специализированных графических суперкомпьютеров на основе распределенных кластерных систем ООО НИИ «Высоких технологий» (НИИ «ВТ») [10]. Как было показано ранее [11], обычные пользовательские компьютеры не обладают достаточной

скоростью вычислений и обмена данных, недостаточно вместительной оперативной памятью, а также не поддерживают высокопроизводительное программное обеспечение, необходимое для имитационных расчетов и т. д.

На первом этапе работ высокополигональные трехмерные модели разрабатываемых элементов конструкции выполняли отдельно друг от друга (послойно), в единой пространственно-координатной сетке рабочей среды программы моделирования «NewTek LightWave 3D» (LightWave), которая входит в состав аппаратно-программных комплексов.

Конструкция одного из возможных вариантов фрезерного комбайна (рис. 1) была разработана средствами высокополигонального 3D-моделирования программы LightWave, по эскизам и предполагаемым характеристикам на базе лунохода (рис. 2).

На корпусе лунохода посредством многоосной подвижной консоли (рис. 3) установлена шаровая фреза (рис. 4) с изменяемой глубиной экскавации (погружения).

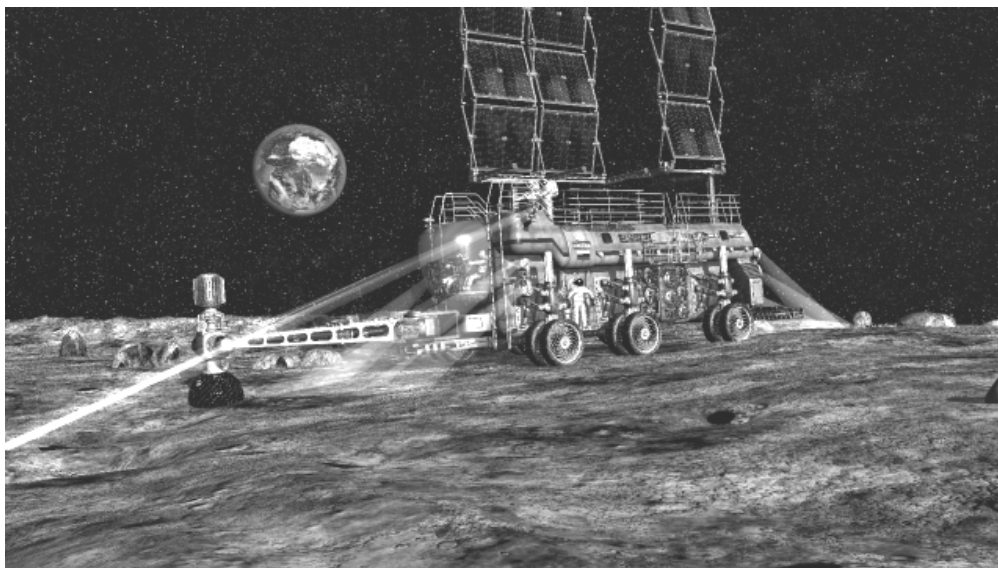


Рис. 1. Общий вид 3D-модели фрезерного комбайна

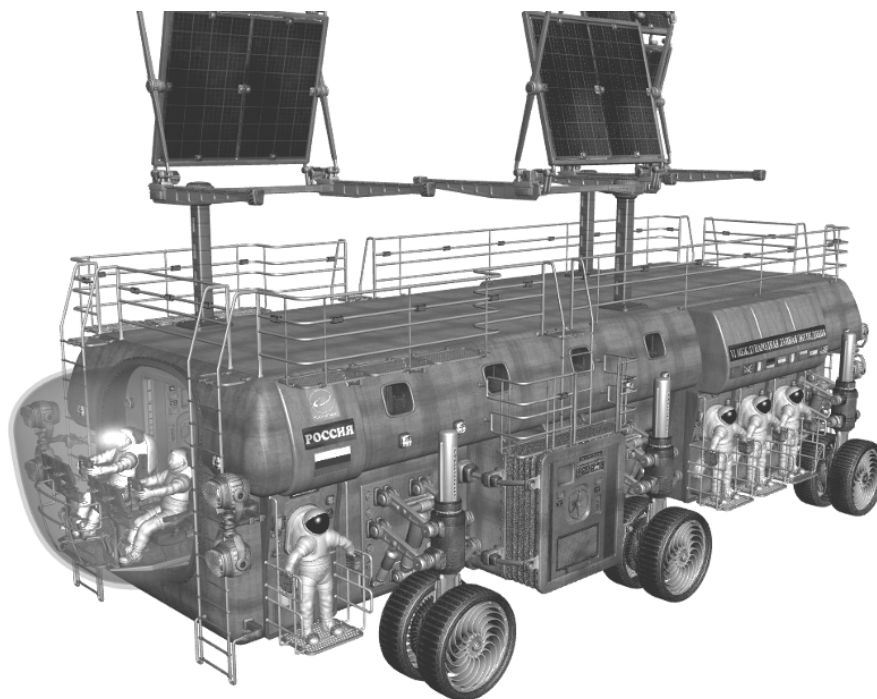


Рис. 2. Общий вид лунохода

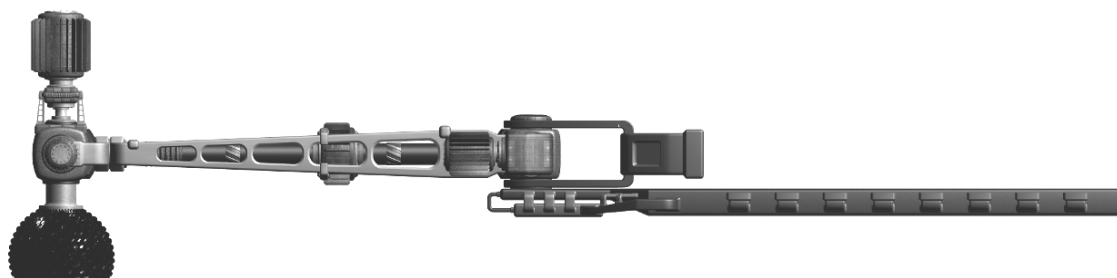


Рис. 3. Многоосная подвижная консоль с фрезой (слева). Крепления к корпусу лунохода, и устройство подачи реголита (справа)

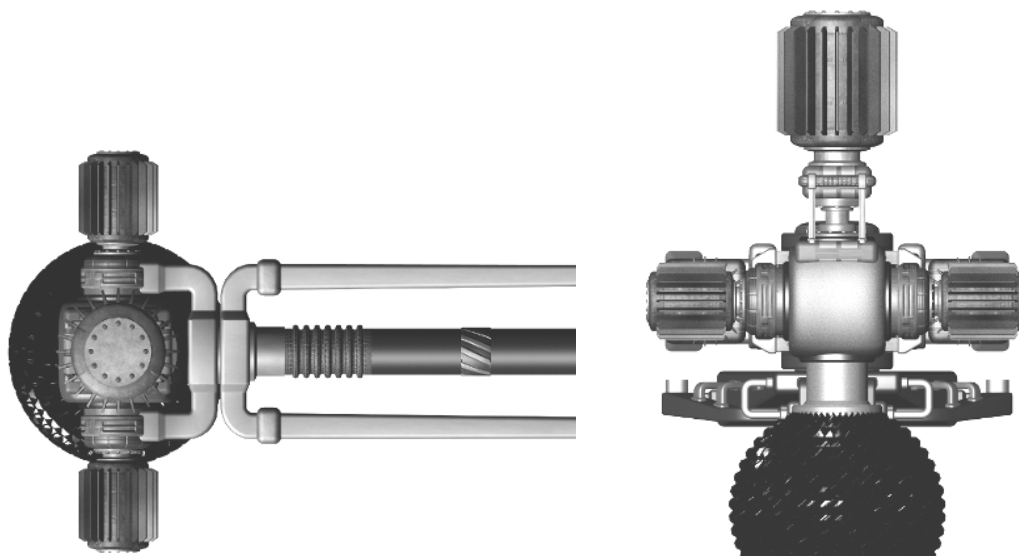


Рис. 4. Внешний вид рабочего узла фрезы. Вид сверху (слева) и вид спереди (справа)

Добытый грунт с помощью устройства подачи реголита (рис. 3) поступает к расположенному в корпусе лунохода оборудованию (рис. 5) для переработки реголита с целью получения и хранения газовых продуктов как для жизнедеятельности членов экспедиции, так и компонентов топлива для ракетных двигателей взлетных модулей.

Полученный перерабатываемый материал прессуется специальной установкой (рис. 6) для производства блоков для строительства лунной базы из местного сырья.

На высокополигональные модели с помощью стандартных инструментов программы моделирования LightWave, а также плагинов и скриптов (специально созданных специалистами НИИ «ВТ») назначали физически корректные свойства материалов и изображения (текстуры) высокого качества с целью достижения наи-

более полного соответствия исходным данным, что является одним из преимуществ применяемой технологической цепочки моделирования. Это в совокупности с естественным характером освещения, приближенного к солнечному свету в безвоздушном пространстве, значительно повысило степень достоверности конечного изображения.

На втором этапе работ создали модель лунной поверхности. Рыхлый слой реголита покрывает почти всю поверхность Луны, в связи с чем ее ландшафт напоминает некоторые земные пустыни [12]. Из-за значительного изменения ландшафта по мере продвижения лунохода, взаимодействия с мелкодисперсными частицами грунта и малой силы тяжести описать его исключительно полигональными объектами не представлялось возможным.

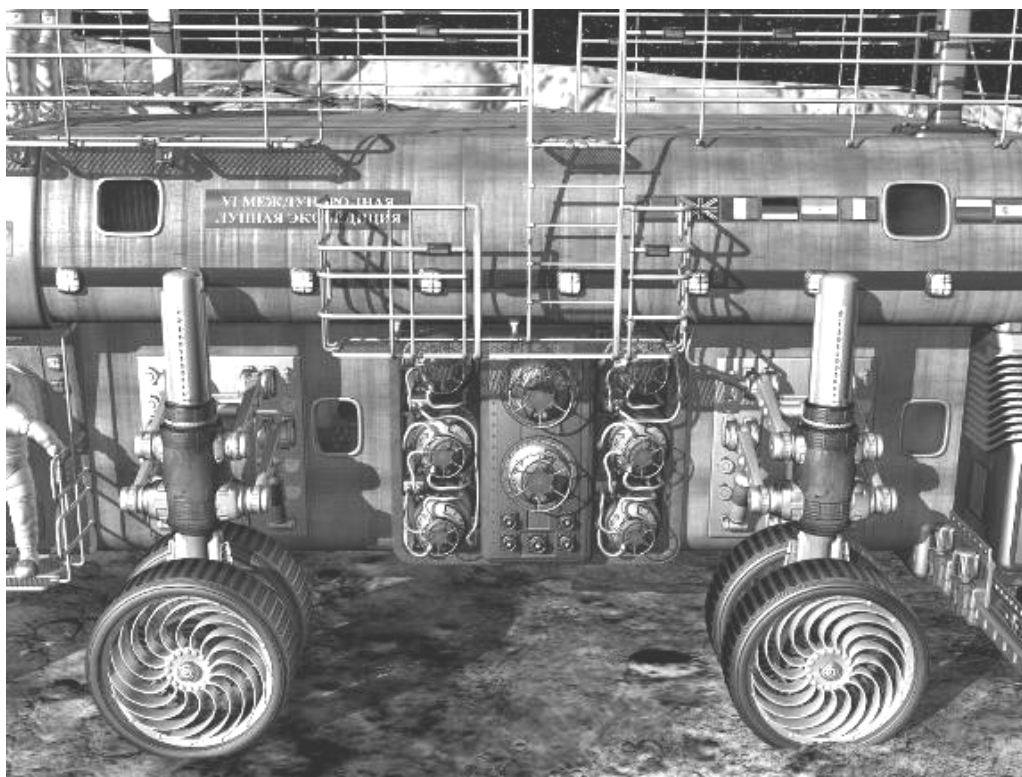


Рис. 5. Вид со стороны газобаллонной установки

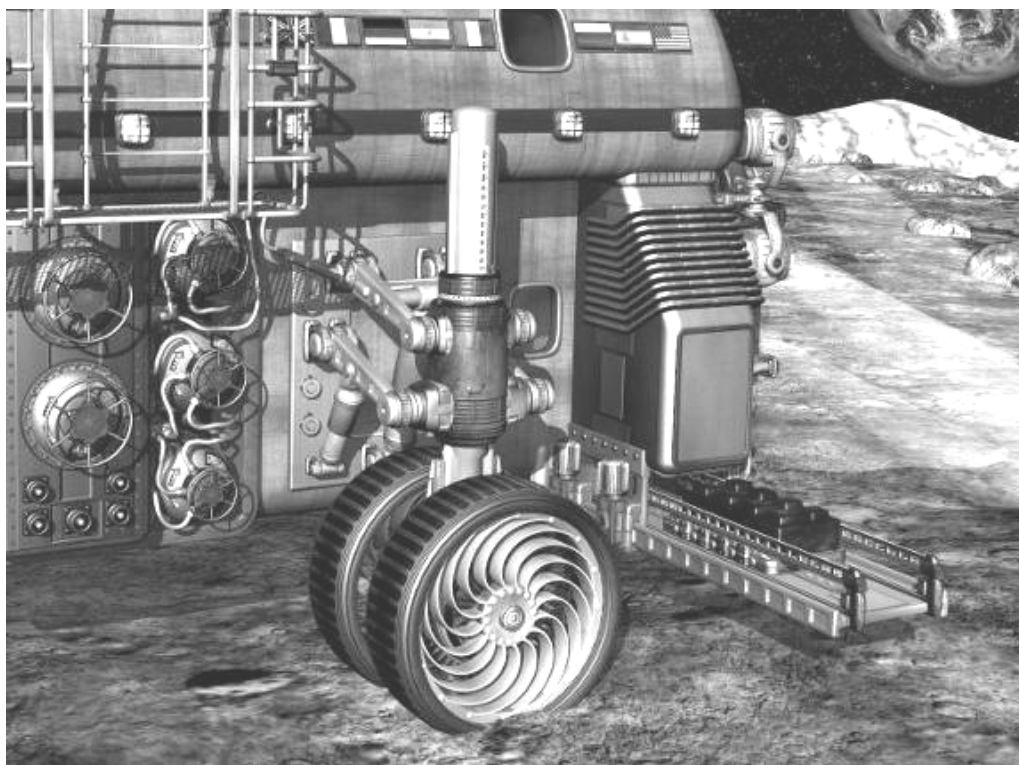


Рис. 6. Вид со стороны установки для производства строительных блоков

Поэтому ключевое значение было отведено плагинам и скриптам, входящим в состав аппаратно-программных комплексов НИИ «ВТ», которые позволили выполнить имитационные расчеты положения частиц грунта.

Для имитации поверхности были сконвертированы материалы из открытых источников, полученные американскими лунноходами на поверхности Луны [13]. Также возможно применение картографических материалов и методик, составленных ГЕОХИ [14].

На следующем этапе технологической цепочки с целью выявления ошибок и слабых мест конструкции производили симуляцию работы создаваемого изделия в интерактивной среде.

При создании сцен интерактивного управления для моделируемых физических тел были заданы координаты, масса, направление, скорость движения и т. д. Созданный симулятор впоследствии может войти в состав сопроводительной докумен-

тации, используемой в системах информационной поддержки на всех этапах жизненного цикла изделия.

В соответствии с циклограммой работы фрезы была реализована активация двигательных систем, управление подачей реголита и т. д. Фреза имеет несколько степеней свободы (рис. 7). Кроме того, она вращается вокруг своей оси с заданными параметрами. В процессе перемещения по лунной поверхности фреза перемещается как единый объект, каждый элемент сохраняет свое положение относительно других.

Поведение физических тел, не определенное циклограммами работы, просчитывалось с учетом массогабаритных характеристик в соответствии с законами физики. Анимационные технологии, учитывающие физические законы взаимодействия и массогабаритные характеристики сложных наукоемких изделий, позволили получить реалистичный уровень достоверности поведения виртуальных 3D-объектов.

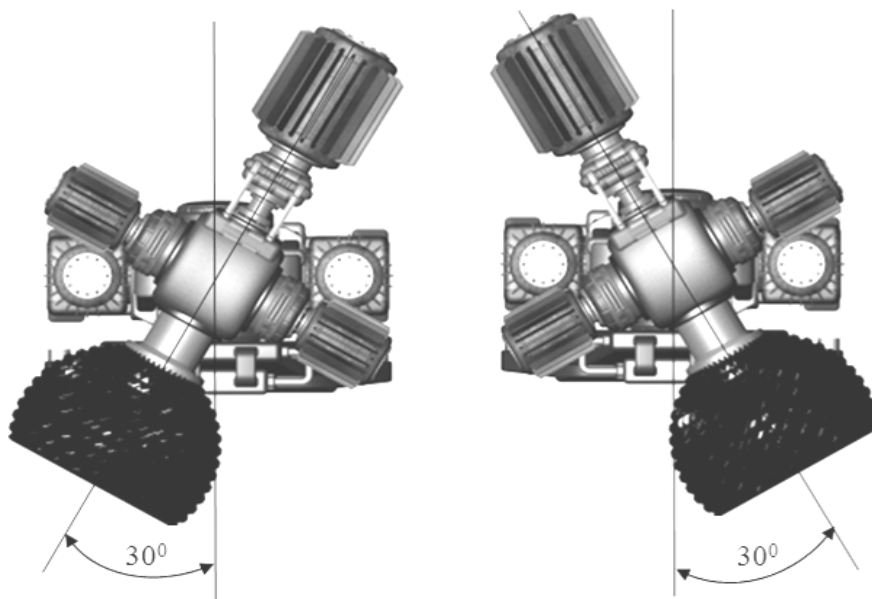


Рис. 7. Рабочие положения фрезы

При помощи плагинов и скриптов было произведено моделирование физического взаимодействия объектов, участвующих в реализации технологического процесса, в

частности, экскавация сопровождается выбросом мельчайших частиц грунта и образованием небольшого пылевого облака (рис. 8).

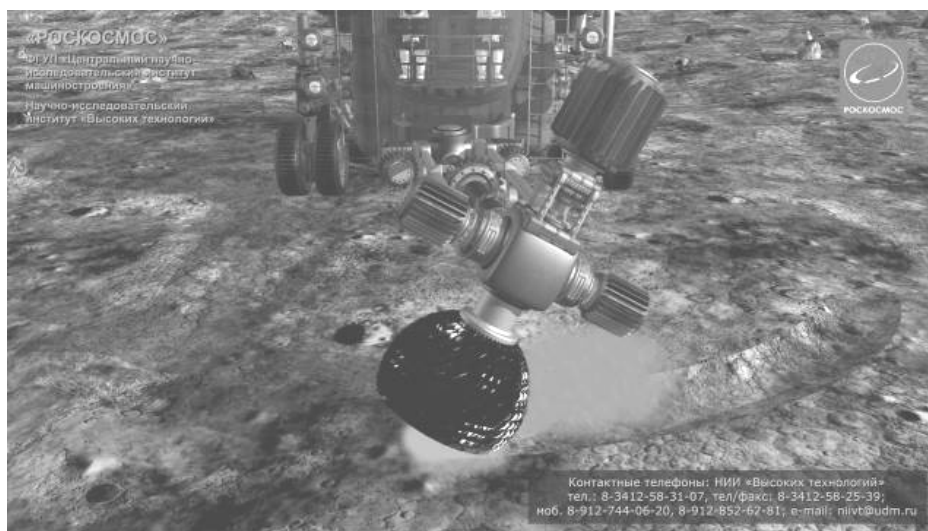


Рис. 8. Процесс экскавации

Описать работу фрезерного комбайна позволили методы и алгоритмы динамического моделирования. Это дало возможность установить и визуализировать необходимые кадры и ракурсы, отобразить траектории движения и степени свободы подвижных элементов, что позволило еще на начальных

этапах проектирования избежать существенных ошибок.

В проектный облик были внесены правки с учетом экспериментально полученных данных и замечаний технических специалистов, что исключило опасное сближение движущихся частей в готовом изделии. Также, учи-

тывая пределы хода движущихся частей и нагрузок на корпус, было подобрано оптимальное расположение конструктивных элементов. Для этого проводилось имитационное моделирование разных вариантов конфигурации оборудования. Внешние нагрузки, действующие на луноход со стороны фрезы, имитировались путем создания вертикальной реакции величиной 200 Н, соответствующей максимальному значению рабочего усилия на буровом инструменте, заложенному в тактико-технических требованиях к изделию (табл. 1).

В ходе моделирования определялись следующие параметры:

– угол отклонения фрезы от первоначального положения после приложения реакции от бурения;

– изменение вертикальных реакций на колесах после начала бурения.

Графики угловых отклонений фрезы для двух вариантов ее конструкции показаны на (рис. 9 и 10).

При запуске имитационного моделирования вертикального варианта конфигурации фрезы (рис. 9) подвеска проседала под действием массы лунохода, установившееся положение достигалось на пятой секунде. Поэтому включение в расчет силы отдачи от

бурения введено с шестой секунды. Отклонение фрезы от вертикали до начала бурения вследствие упругих свойств подвесок составило  $0,47^\circ$ , после начала бурения –  $0,49^\circ$ .

Таблица 1. Тактико-технические требования к фрезе

Параметр	Значение
Глубина бурения, мм	до 3000
Частота вращения бурового инструмента, об/мин	200
Частота ударов при вращательно-ударном режиме работы, уд/мин	570
Максимально усилие подачи, Н	200
Габариты фрезы (диаметр/длина), мм	1500/10000
Номинальное усилие прижатия фрезы к поверхности, Н	1200
Производительность (ориентировочно), кг/час	500

При имитационном моделировании варианта на выносной ферме (рис. 10) включение привода развертывания фрезы из походного положения производилось начиная с 4 с, движение осуществлялось на угол  $90^\circ$  со скоростью 15 град/с, установившееся состояние система занимала после одиннадцатой секунды. Поэтому включение в расчет силы отдачи от бурения производилось с двенадцатой секунды.

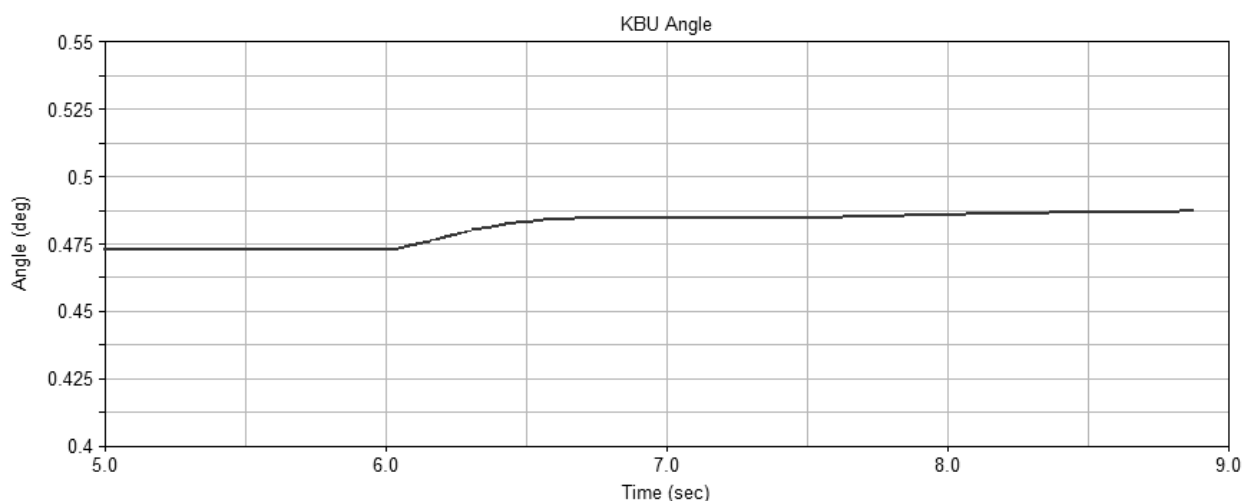


Рис. 9. Изменение углового положения фрезы после начала бурения в компактном вертикальном варианте конструкции фрезы



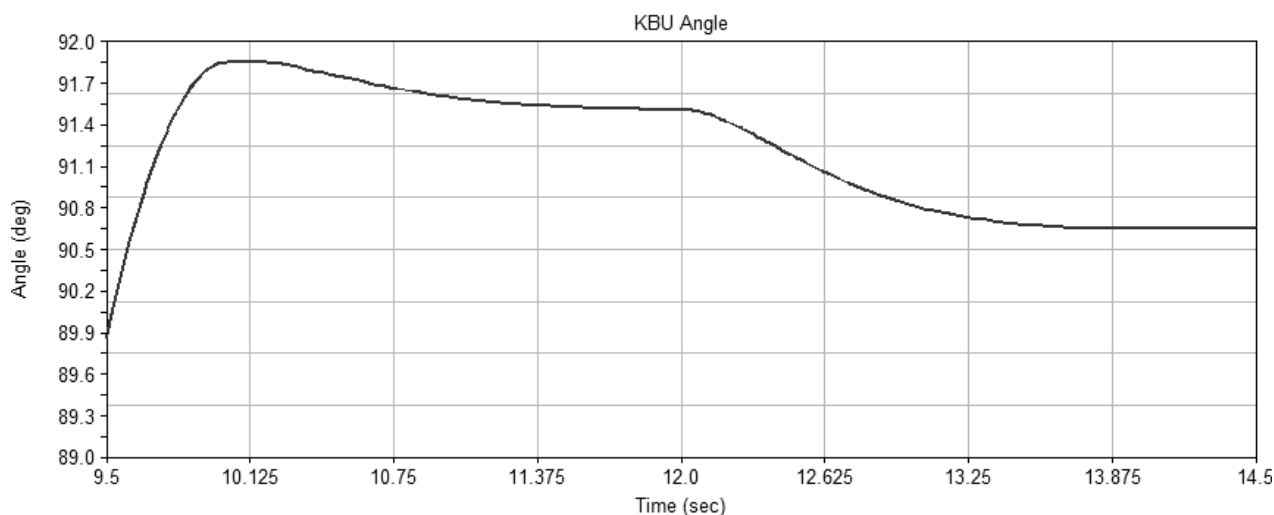


Рис. 10. Изменение углового положения фрезы после начала бурения для горизонтального варианта конструкции на выносной ферме

Угол наклона фрезы до начала бурения составил  $91,5^\circ$ , после начала бурения –  $90,6^\circ$ . Результаты измерений реакций на колесах до и после начала бурения представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Изменение реакций на колесах в вертикальном варианте конструкции фрезы

Расположение колеса	Величина реакции, Н, и относительное изменение, %		
	До начала бурения	После начала бурения	Изменение
Переднее	535	489	-8,6
Среднее	104	97	-6,7
Заднее	614	568	-7,5

Таблица 3. Изменение реакций на колесах в горизонтальном варианте конструкции фрезы

Расположение колеса	Величина реакции, Н, и относительное изменение, %		
	До начала бурения	После начала бурения	Изменение
Переднее	538	475	-11,7
Среднее	96	90	-6,3
Заднее	620	586	-5,5

В целом результаты моделирования привели к следующим выводам:

1) изменение реакций на колесах под действием рабочего усилия от бурового ин-

струмента в обоих вариантах конструкции фрезы не превышает 5–10 %;

2) вертикальный вариант конструкции фрезы, как и предполагалось, обеспечивает большую устойчивость системы. Отклонение от вертикали под действием постоянного рабочего усилия от бура составило  $0,02^\circ$ , что соответствует смещению центра бурового инструмента на величину около 1 мм при глубине бурения 3 м. Поскольку в реальности неизбежны вибрационные динамические усилия на инструмент, можно сделать вывод о необходимости снятия напряжения с подвески колес в этом варианте конструкции. Величина усилия прижатия фрезы с учетом запаса на динамические нагрузки должна составлять не менее 1200 Н. Также данная конфигурация не обеспечивает соответствующую тактико-техническим требованиям скорость переработки реголита;

3) величина углового отклонения горизонтальной конфигурации фрезы под действием рабочего усилия составила  $0,9^\circ$ , что соответствует смещению центра бурового инструмента на величину около 50 мм при глубине бурения 3 м, что является неприем-

лемым результатом. Для обеспечения устойчивости требуется введение выдвинутых упоров вдоль рабочей оси. Величина усилия прижатия фрезы с учетом запаса на динамические нагрузки в данном варианте также должна составлять не менее 1200 Н. С учетом несимметричности расположения фрезы в рабочем положении необходимо предусмотреть дополнительные выдвинутые опоры, обеспечивающие разгрузку колес лунохода. Было выявлено, что горизонтальная конфигурация обеспечивает высокую производительность переработки реголита благодаря более широкой траншее выработки, равной 14,98 м, получаемой при помощи многоосной подвижной консоли длиной 6,84 м.

### Заключение

Предложенные в статье положения имеют значение для практического развития направления моделирования и могут использоваться в проектировании луноходов.

В работе рассмотрено несколько вариантов фрезерного комбайна на базе лунохода. Получены результаты в виде моделей фрезерного комбайна и лунной поверхности. При задании физически корректных свойств лунного реголита были использованы некоторые данные американских луноходов. Подобрано оптимальное расположение конструктивных элементов с учетом пределов хода движущихся частей. Создан интерактивный симулятор, функционирующий в современных полномасштабных технологиях виртуальной реальности для обучения будущих операторов при выполнении миссий к Луне.

Принципиально новым является представление интерактивных анимационных виртуальных сцен, предназначенных для

визуального представления основной информации по принципам построения и работы, конструкции и компоновки перспективных космических средств, их бортовых систем, а также для наглядной демонстрации их взаимодействия между собой.

В отличие от известных работ по данному направлению, интерактивные анимационные сцены могут быть использованы при создании симуляторов с погружением в виртуальный мир на различных этапах эксплуатации лунохода.

Проведение таких работ является необходимым условием обеспечения перспектив применения систем моделирования как для проведения экспертиз, так и в интересах решения перспективных задач по конструированию космической техники.

### Библиографические ссылки

1. Кукк К. И., Анпилогов В. Р., Локишин Б., Крылов А. Вопросы реализации Федеральной космической программы РФ до 2026 г. // Технологии и средства связи. – 2017. – С. 20–26.
2. Павловский С. Трамп всерьез заинтересовался перспективой добычи газа на Луне // Техноблог. – 2017. – URL: <https://teknoblog.ru/2017/04/14/77071> (дата обращения 19.04.2017).
3. Проектно-поисковые исследования по определению технического облика и тактико-технических характеристик мобильной робототехнической системы для проведения геологической разведки на поверхности Луны / А. В. Васильев, А. С. Кондратьев, А. А. Градовцев, И. Ю. Даляев // Разработка предложений в проект ТЗ на ОКР по созданию мобильной робототехнической системы: отчет о НИР (промежуточный). – 2014. – С. 127–134.
4. Проектно-поисковые исследования по определению технического облика и тактико-технических характеристик мобильной робототехнической системы для проведения геологической разведки на поверхности Луны / А. В. Ва-

ильев, А. С. Кондратьев, А. А. Градовцев, И. Ю. Даляев // Разработка предложений в проект ТЗ на ОКР по созданию мобильной робототехнической системы: отчёт о патентных исследованиях. – 2014. – С. 19.

5. Использование интегрированного учебного комплекса моделирования и управления непрерывных ТП в учебном процессе / О. Д. Антипов, О. Ю. Першин, В. Е. Попадко и др. // Автоматизация в промышленности. – 2014. – № 7. – С. 38–42.

6. Глазьев С. Ю. Закономерность смены мирохозяйственных укладов в развитии мировой экономической системы и связанных с ними политических изменений // Наука. Культура. Общество. – 2016. – № 3. – С. 5–45.

7. Вздорова Л. П. Шестой технологический уклад: последний цикл Кондратьева // Инновации в науке : сборник статей по материалам LV международной научно-практической конференции. Часть II. – 2016. – № 3(52). – С. 140–148.

8. Липин Н. К., Сапрыкин О. А., Набоких С. С. Лунный ровер напланетной научной базы // Седьмой международный аэрокосмический конгресс. Тезисы докладов. – 2012. – С. 410–411.

9. Гребеничиков А. В., Липин Н. К., Стельмах В. А. Апробация методики раздельного модели-

рования жилого лунного ровера. // Седьмой Международный аэрокосмический конгресс. Тезисы докладов. – 2012. – С. 411–412.

10. Барсуков А. К., Иванов В. Н., Пишиков В. Н. Применение технологий 3D-моделирования и визуализации в промышленности (с использованием многопроцессорных распределенных кластерных систем) // Труды Второй международной конференции «Трёхмерная визуализация научной, технической и социальной реальности. Технологии высоко-полигонального моделирования». – 2010. – Т. 2. – С. 21–23.

11. Кравченко С. Аватар: Российская реинкарнация. // Удмуртия, регион 18. – 2010. – № 1 (0022). – С. 40–42.

12. Котляр П. Пустыня Атакама зацвела // Газета.Ru. – 2015. – URL: [https://www.gazeta.ru/science/2015/11/02\\_a\\_7867343.shtml](https://www.gazeta.ru/science/2015/11/02_a_7867343.shtml) (дата обращения: 19.04.2017).

13. NASA: [сайт]. – URL: <https://www.nasa.gov> (дата обращения: 19.04.2017).

14. Захарова М. А. Создание мультимасштабной навигационной 3d-модели на район предполагаемого размещения лунной базы // Сборник XIV конференции молодых ученых посвященной дню космонавтики: фундаментальные и прикладные космические исследования. – 2017. – С. 135.

\*\*\*

*N. K. Lipin*, Post-graduate, Kalashnikov ISTU

*M.A. Pletnev*, DSc in Chemistry, Associate Professor, Kalashnikov ISTU

### **Optimization of a Construction of the Milling Combine on the Basis of a Moon Rover by Means of Technology of Imitating Dynamic Modeling**

*The work presents the comparative analysis of the options of a design of the milling combine created on the basis of a moon rover by means of imitating calculations. The work is focused on the section "The federal space program of Russia for 2016-2025 – "Basic space researches" according to which the problem of creation of the milling combine for carrying out geological researches on a surface of other planets is actual.*

*The research objective is optimization of a design of the milling combine created on the basis of a moon rover by means of technology of ultrahigh and polygonal dynamic 3D modeling. For achievement of a goal the technological chain which is conditionally divided into some main stages was used.*

*Due to the insistence to resources and specifics of tasks imitating modeling was carried out by means of hardware-software complexes.*

*Results in the form of models of the milling combine and a lunar surface are received. The interactive simulator functioning in modern full-scale technologies of virtual reality for training of future operators when performing missions to the Moon is created.*

---

*The design shape conforming to requirements received by an iterative method of design can be applied in systems of information support at all stages of life cycle of a product.*

*Carrying out such works is a necessary condition of providing prospects of use of systems of modeling, both for carrying out examinations, and in interests of the solution of perspective tasks of designing of space equipment.*

**Keywords:** Basic space researches, full-scale technologies of virtual reality, regolith, life cycle of a product.

Получено: 13.06.2017