

# LUNDUST – AN ORBITAL EXCAVATOR FOR LUNAR PROSPECTORS

**Alexander O. MAYBORODA,**  
CEO, LLC "AVANTA-Consulting"  
Research Company, Rostov-on-Don, Russia,  
[mayboro@gmail.com](mailto:mayboro@gmail.com)

Graphics of drawings – Dmitry Anisimov  
The author of drawings – Alexander Mayboroda

**ABSTRACT |** The paper deals with regolith remote excavation that means nonstop mining and delivery of lunar soil (regolith). Lundust system can mine regolith and accumulate it on orbit without help from transport&mining infrastructure on the Moon. This provides for development of space industry and commercialization of cosmonautics. Lundust system begins to produce marketable oxygen and construction materials from regolith as soon as a moon satellite is put into orbit.

**Keywords:** Lunar Orbital Station, LOP-G, space tether system, regolith propellant, space 3D-printers, space industry, high-speed penetration, impulse lasers, laser plasma



# LUNDUST – ОРБИТАЛЬНЫЙ ЭКСКАВАТОР ДЛЯ ЛУННЫХ СТАРАТЕЛЕЙ



**Александр Олегович МАЙБОРОДА,**  
директор научно-исследовательской компании  
ООО «АВАНТА-Консалтинг», Ростов-на-Дону, Россия,  
[mayboro@gmail.com](mailto:mayboro@gmail.com)

Графика рисунков – Дмитрий Анисимов  
Автор рисунков – Александр Майборода

**АННОТАЦИЯ** | Рассматривается дистанционная экскавация лунного грунта – беспосадочный способ добычи и доставки реголита на окологлунную орбитальную станцию. Система Lundust способна добывать и аккумулировать на орбите реголит без помощи транспортно-добывающей инфраструктуры на поверхности Луны, что способствует развитию космической промышленности и коммерциализации космонавтики. С первого часа вывода на орбиту спутника Луны система Lundust начинает производить из реголита товарные кислород и конструкционные материалы.

**Ключевые слова:** лунная орбитальная станция, LOP-G, космическая тросовая система, ракетное топливо из реголита, космические 3D-принтеры, космическая промышленность, высокоскоростное проникание, импульсные лазеры, лазерная плазма

## ВВЕДЕНИЕ

Лунный реголит – ценное сырье для космической промышленности. Он содержит кислород, кремний, железо, алюминий, титан, магний, кальций. В практически значимых количествах присутствуют никель и кобальт, другие ценные металлы, включая редкоземельные [1]. Кислород и ракетное топливо, произведенные из реголита, могли бы значительно способствовать снижению затрат на работу лунной орбитальной станции LOP-G. Необработанный реголит – это также и готовый материал для экранов противорадиационной защиты лунной станции. Желательная толщина таких экранов должна быть 2 метра и больше, что исключает доставку экранов с Земли. Металлы, выделенные из реголита, многократно удешевят дальнейшее развертывание станции – космические 3D-принтеры из полученных материалов напечатают новые блоки станции и многообразное оборудование.

Разложение реголита на кислород, кремний и металлы возможно освоенными земной промышленностью методами, которые основаны на восстановлении окислов действием фтора, хлора, углерода или водорода. Лунный кислород сократит расходы на посещение Луны: для заправки лендера – многоразового взлетно-посадочного модуля компании Lockheed Martin – требуется 40 тонн кислородно-водородного топлива [2]. Требуемая масса кислорода – 35 тонн – может быть произведена из 100 тонн реголита и депонирована. Технологии долговременного хранения криогенного топлива разрабатываются многими компаниями.

Переработка реголита может производиться как на лунной базе, так и на орбитальной станции. Второй вариант перспективнее – проектировщики лунной промышленности рассчитали, что переработку реголита во многих случаях выгодно производить не на поверхности Луны, а в орбитальных перерабатывающих центрах: помимо такого преимущества, как отсутствие ночных простоев, это предполагает многократное уменьшение стоимости доставки оборудования для переработки сырья [3, 4]. Однако это требует радикального сокращения затрат на экспорт лунного сырья – в настоящее время без производства лунного топлива доставка сырья с Луны на окололунную орбитальную станцию в 10–20 раз дороже доставки грузов с Земли.

## АНАЛОГИ И ПРОТОТИПЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ЭКСКАВАЦИИ РЕГОЛИТА

Задача по организации переработки реголита без открытия базы на поверхности имеет решение – система экскавации лунного грунта может быть создана только при использовании оборудования на окололунной орбите. Природным аналогом экскавации является образование разряженного пылевого облака вокруг Луны в результате постоянного обстрела ее поверхности микрометеоритами. При достаточной плотности облака его частицы можно было бы аккумулировать искусственным спутником Луны, например, при помощи поглощающего экрана, подобного ловушке кометной пыли на космическом аппарате Stardust. Однако низкая плотность пылевого облака делает такой процесс невозможным для промышленного использования.

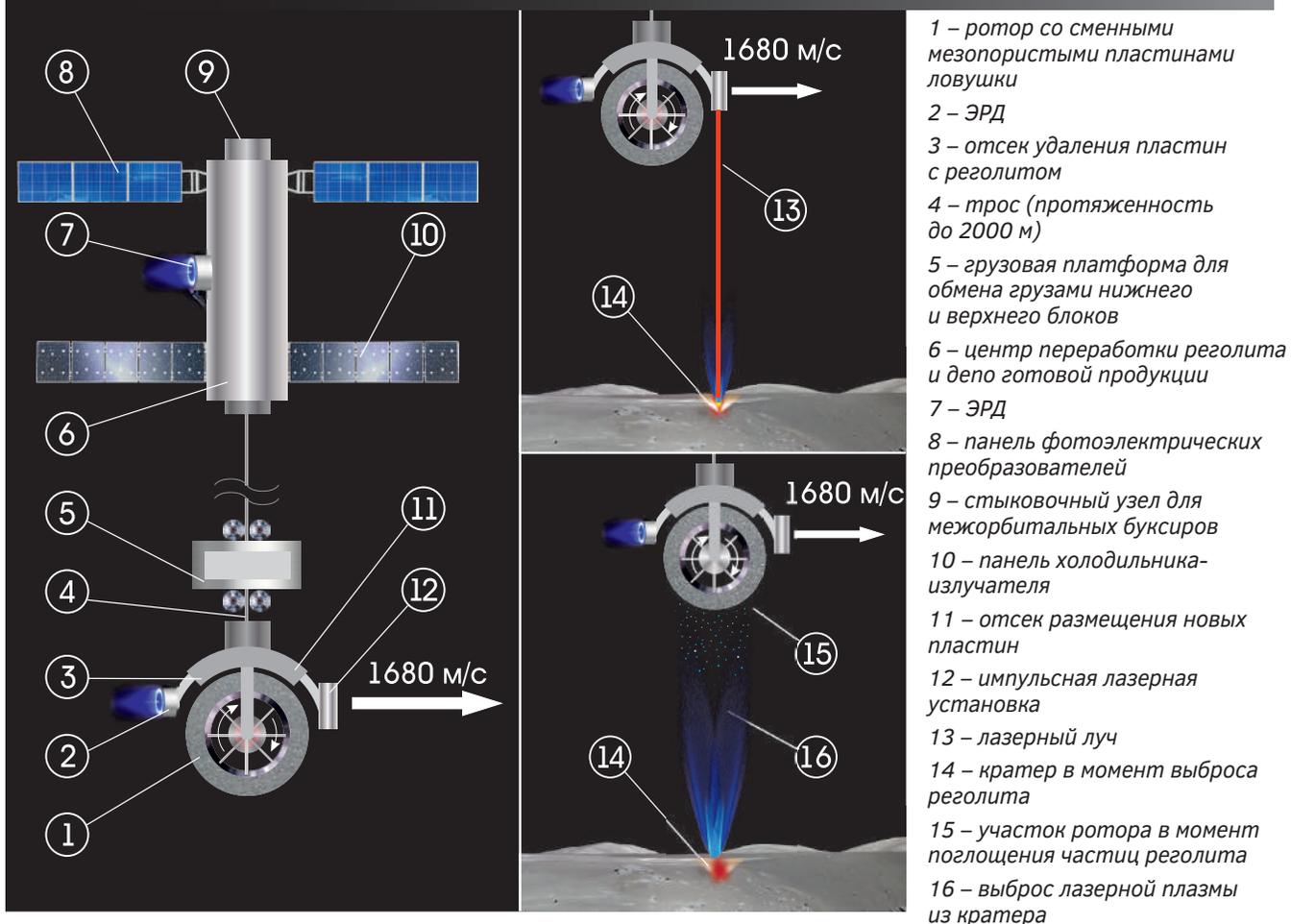
Вместе с тем, на Луне неоднократно были апробированы способы выброса пыли вверх за счет ударов искусственных тел. Апробирован был и пролет космического аппарата (КА) сквозь

искусственное облако пыли с анализом ее частиц. В рамках космической программы Lunar Precursor Robotic Program на поверхность Луны в районе кратера Кабеус сброшен разгонный блок Centaur. В результате падения выброшено газо-пылевое облако. КА LCROSS пролетел сквозь выброшенное облако, анализируя вещество, поднятое со дна кратера. Масса ступени Centaur составляла 2200 килограммов, скорость удара – около 2,5 км/с. Взрыв мощностью около полутора тонн в тротиловом эквиваленте должен был выбросить из кратера 350 тонн пыли [5, с. 8]. На каждый килограмм массы ударника, согласно расчетам, приходится пылевой выброс массой 160 килограммов. Фактический выброс был оценен в 300 тонн.

При данных соотношениях затрат и отдачи можно говорить о возможности промышленного использования дистанционной экскавации реголита ударным способом. Такая добывающая система имеет все основания именоваться орбитальным экскаватором.

Способ выбивания частиц реголита при помощи ударника и их аккумуляция апробирован космическим аппаратом Hayabusa 2 на астероиде Рюгу – применен выстрел танталовой пулей массой

**Рис. 1.** Компонновка системы Lundust на вертикально стабилизированном тросе



5 граммов [6]. Способ захвата высокоскоростных частиц пыли мезопористой ловушкой апробирован космическим аппаратом Stardust при взятии пробы вещества кометы Вильда-2 с относительной скоростью частиц пыли 6 км/с [7].

Другим перспективным способом является дистанционная экскавация лазерным лучом. В космических исследованиях испарение минералов лазерным излучением для исследовательских целей применяется марсоходом Curiosity [8, 9]. Испарение микропорций марсианских пород возможно на дистанции от 1,3 до 7 метров с плотностью мощности излучения больше 1 ГВт/см<sup>2</sup>. Диаметр пятна излучения на объекте варьируется от 350 мкм при 2 метрах до 550 мкм на расстоянии 7 метров. Импульсный твердотельный лазер (Nd: KGW) был сконструирован таким образом, чтобы выдержать около двух миллионов выстрелов. Лазер марсохода, таким образом, является прототипом лазерной системы экскавации лун-

ного реголита – дальность действия и рабочий ресурс близки к требуемым. Лазерная абляция материала широко используется в промышленности для пробивки отверстий в металлических и керамических изделиях и может быть адаптирована для извлечения реголита и доставки на борт спутника Луны.

Оба варианта системы – ударно-механическая и импульсно-лазерная – получают общее рабочее наименование – система Lundust (Lunar dust). Название адекватно предмету дистанционной экскавации.

Исходя из минимальных потребностей обеспечения ракетным топливом беспилотных и пилотируемых лундлеров, заправляемых на окололунной орбите, годовую потребность в сырье для получения кислорода можно оценить в 10 и 100 тонн реголита. Из данного количества сырья можно извлечь соответственно до 4 и до 40 тонн кислорода, достаточных для

заправки группы малых автоматических взлетно-посадочных модулей и одного большого пилотируемого. Для извлечения реголита в количестве 10 тонн в год подходит система Lundust с лазерной экскавацией. Для извлечения 100 тонн в год – система с ударной экскавацией.

## ДИЗАЙН СИСТЕМЫ ИМПУЛЬСНО-ЛАЗЕРНОЙ ЭКСКАВАЦИИ

Эффективность большинства лазеров невысока – составляет 10–20%, что требует многократного увеличения мощности бортовых источников энергии по сравнению с уровнем мощности ударно-механической системы экскавации. Однако при этом надежность лазерного способа экскавации выше ударного.

Для абляции реголита и его переноса на искусственный спутник Луны подходит технология импульсного лазерного напыления. Лазерная абляция в глубоком вакууме приводит к образованию узкого факела лазерной плазмы, в составе которой присутствуют не только заряженные и нейтральные частицы, но и твердые микрочастицы материала мишени. Малая ширина луча факела является немаловажным фактором: чем меньше угол разлета, тем выше может находиться спутник с приемным экраном, на котором происходит осаждение продуктов абляции.

Увеличение высоты спутника относительно средней поверхности Луны важно ввиду сокращения маневров изменения высоты при полете над холмистой местностью. Маневрирование КА по высоте с применением тяги реактивных двигателей в данном случае исключается в связи с расходом топлива, превышающим поступ-

ление с поверхности Луны сырья, из которого производится ракетное топливо. Поэтому для маневрирования по высоте должно быть использовано размещение приемно-накопительного экрана на тросе. Основная масса тогда приходится на блок верхней связки. Тросовые системы неоднократно испытывались на орбите и при суборбитальных полетах. Максимальная длина троса, развертываемого в космосе, составляла 20 километров.

Исполнение орбитального накопителя реголита в виде тросовой системы обеспечивает малое время подъема ловушки продуктов абляции для преодоления препятствий. Требуется, однако, и быстрое возвращение ловушки на минимальную высоту. Передачу импульса движения ловушки в сторону поверхности Луны выгодно организовывать при помощи движения сверху вниз по тросу грузовой платформы – платформа отталкивается от верхнего блока тросовой связки и тормозится у нижнего блока, сообщая ему импульс необходимой величины.

Угол разлета продуктов абляции, как правило, не превышает 30°C. Это значит, что при высоте перехвата продуктов абляции равной 100 метрам диаметр поглощающего экрана составляет 50 метров. Его площадь – около 2000 м<sup>2</sup>. При таких размерах толщина ловушки должна быть незначительной, так как поток напыляемого вещества составляет 3,17·10<sup>-4</sup> кг/с, что определяется задачей аккумуляции спутником 10 тонн сырья в год. На 1 м<sup>2</sup> ловушки приходится поток вещества плотностью 1,6·10<sup>-10</sup> кг/с. С достаточным запасом толщина захватывающего экрана составит 0,05 миллиметра, без учета слоя мезопористого покрытия. Экран такой толщины, изготовленный из алюминиевого сплава, имеет массу 270 кг. Реальная масса должна быть больше из-за необходимости придания экрану овальной формы и применения ребер жесткости. Технологически удобно разместить улавливавшие лунную пыль пластины на бесконечной ленте или на роторе – по мере насыщения частицами реголита пластины перемещаются в зону переработки для экстракции и замены на новые улавливающие пластины.

Относительно экрана поток продуктов абляции в горизонтальном направлении имеет скорость около 1680 м/с. Сила торможения при потоке 3,17·10<sup>-4</sup> кг/с составляет 0,53 Н.

Если принять, что масса потока определяется массой твердых микрочастиц реголита, которые выбрасываются газами незначительной массы, образующимися в результате высокотемпературного разложения части окислов, то вертикальную скорость потока можно условно принять равную половине орбитальной

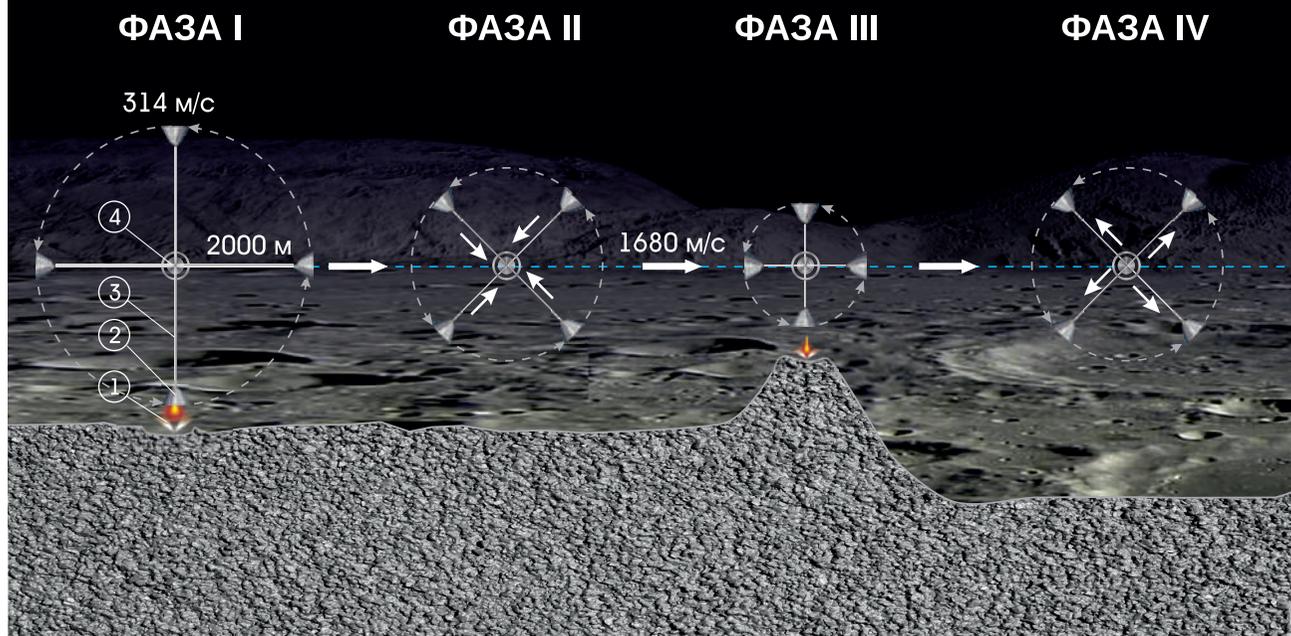
---

**Для маневрирования спутника по высоте приемно-накопительный экран должен быть расположен на тросе. Применение тяги реактивных двигателей в данном случае исключено – расход ракетного топлива превышает поступление с поверхности Луны сырья для производства топлива.**

**Рис. 2.** Компонновка и схема работы системы Lundust на тросах с центробежным натяжением

- 1 – выброс реголита в результате действия ударника на поверхность
- 2 – ловушка частиц реголита, выброшенных из кратера (окружная скорость при максимальном диаметре – 314 м/с)
- 3 – трос (максимальная длина – 2000 м)
- 4 – центр переработки реголита и депо хранения продукции (скорость центра масс ~1680 м/с)

- Фаза I** – максимальный диаметр, режим экскавации
- Фаза II** – уменьшение диаметра
- Фаза III** – минимальный диаметр, режим экскавации
- Фаза IV** – увеличение диаметра



скорости – 840 м/с. Тогда результирующий вектор скорости потока относительно экрана равен 1878 м/с, в соответствии с расчетом:  $(1680^2 + 840^2)^{0,5}$ . Этот импульс компенсируется силой тяги электроракетного двигателя (ЭРД). Если в качестве рабочего тела ЭРД потребляет 10% вещества, выделяемого из аккумулированного реголита, то для компенсации тормозного импульса скорость истечения реактивной струи должна быть равна 18783 м/с. Таким образом, при реальном КПД равном 50% на аккумуляцию 10 тонн реголита потребуется ЭРД тягой 0,6 Н с электрической мощностью в 11,2 кВт. С учетом периодического захода орбитального накопителя в тень зону, где требуется питание ЭРД от аккумулятора, спутник должен иметь удвоенную мощность фотоэлектрических преобразователей – 22,4 кВт.

Энергоснабжение импульсного лазера зависит от многих факторов, которые должны быть определены опытным путем. Если исходить из того, что на термическое разложение 10% оксидов, составляющих реголит (чтобы получить газовый факел, выбрасывающий микрочастицы твердого вещества), требуется удельная мощность 20 МДж/кг, то на килограмм улавливаемого реголита должно расходоваться 2 МДж тепла. В этом случае средняя мощность, подводимая к реголиту лазерным лучом, равна 0,634 кВт. С учетом 10%-го КПД-процесса электрическая мощность, подводимая к лазерной установке, составит 6,34 кВт.

Лазерная экскавация имеет одну особенность – часть оксидов реголита подвергается термическому разложению. При должной регулировке энергетики экскавация реголита будет

сопровождаться производственным процессом по выделению из него металлов и кремния. Часть газообразного кислорода также может аккумулироваться при использовании в мезопористом покрытии материала, который энергично взаимодействует с кислородом. К примеру, таким материалом может быть циркониевая губка. При соответствующем расположении поглощающего экрана легкие и тяжелые элементы будут поглощаться разными частями экрана в результате получения различных скоростей при выбросе из кратера. Таким образом, в основном решается задача сепарации химических элементов, выделяемых из реголита.

В простейшей версии орбитальный накопитель реголита конструктивно представляет собой вертикальную связку двух аппаратов на тросе. Центр масс спутниковой системы Lundust находится на такой высоте, которая при подъеме нижнего конца связки гарантирует пролет над наиболее высокой частью рельефа местности, лежащей под орбитой спутника. Нижняя часть связки проходит на высоте около 100 метров над поверхностью. Высота регулируется соответственно с профилем рельефа. Выбираются трассы с подъемами рельефа в пределах 2000 метров. Из-за невозможности обеспечить минимальную высоту на всех участках полета, в связи с затратами времени на изменение высоты, реголит добывается не по всей трассе. Поскольку в рассматриваемом случае рабочее тело ЭРД поступа-

ет в систему извне без ограничений, возможна постоянная коррекция орбиты, требующаяся из-за неоднородности гравитационного поля Луны на низкой орбите.

В нижней части тросовой связки находятся импульсный лазер и ловушка в виде экрана, поглощающего выбитые частицы реголита. В верхней части связки находятся центр переработки реголита и панели фотоэлектрических преобразователей. Электроракетные двигатели находятся на обеих частях связки. Вариант такой компоновки показан на рис. 1.

## ДИЗАЙН СИСТЕМЫ УДАРНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭКСКАВАЦИИ

Эффективность ударно-механической экскавации выше, чем импульсно-лазерной, поэтому ударный вариант лучше подходит для извлечения за один год 100 тонн реголита. Действие ударника на реголит можно оценить, исходя из данных по сбросу на Луну разгонного блока Centaur, согласно которым один килограмм массы ударника вызывает выброс реголита массой до 160 килограмм. В системе Lundust скорость ударника меньше – 1680 м/с плюс или минус некоторая величина. Для такой скорости величина выброса сокращается в два раза – до 80 килограммов на один килограмм массы ударника. Это следует из уравнения связи объема кратера с кинетической энергией ударника согласно работе [10, с. 175]:

$$V_c = kE_p \quad (1).$$

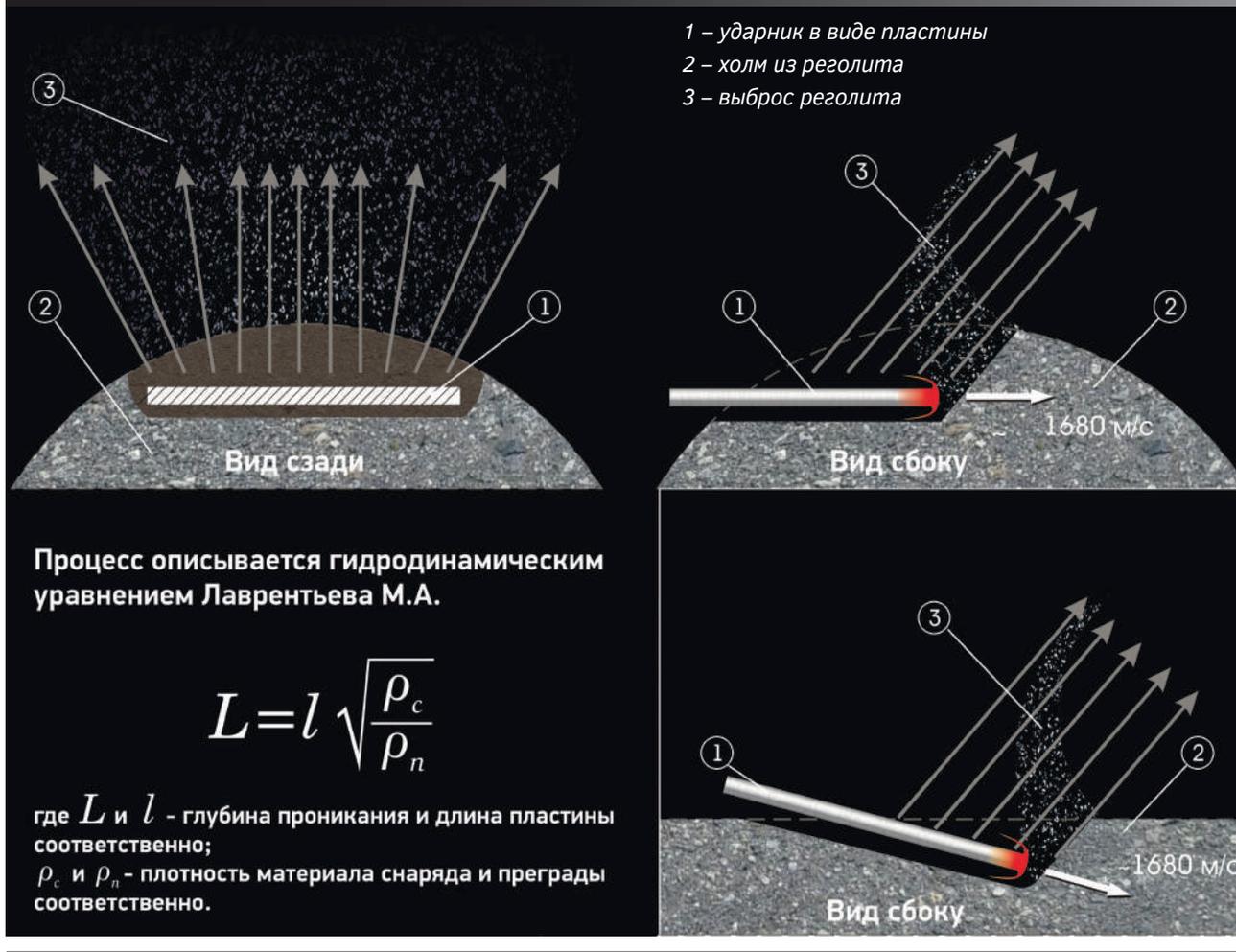
Важным свойством кратерообразования является практически постоянное значение объема кратера  $V_c$ , отнесенного к кинетической энергии снаряда  $E_p$ , для каждой пары материалов снаряда и мишени, имеющих постоянные значения коэффициента пропорциональности  $k$ .

Ударный способ экскавации производится с меньшей частотой, в отличие от лазерного. В связи с этим тросовая система будет подвержена нежелательным колебаниям. Для устранения раскачки требуется придание системе жесткости, что возможно при создании натяжения в тросах центростремительным ускорением.

При таком решении требуется размещение блока переработки реголита и хранилища продукции в центре связки, а по краям на концах тросов – размещение накопителей реголита. Тогда при вращении связки создается значительное растягивающее усилие. Одновременно решается задача быстрого изменения радиуса тросов – сокращения и растяжения связки, требуемые рельефом поверхности.

**Технология выделения реголита из материала ловушки предполагает расплавление пластин с захваченными частицами реголита, выделение частиц и приготовление из расплава новых мезопористых пластин. Поэтому основное требование к материалу ловушки высоко-скоростных пылевых частиц – низкая температура плавления и плотность расплава меньшая, чем у реголита.**

**Рис. 3.** Принципиальная схема экскавации реголита пластинчатым ударником



**Возможные параметры вращающейся связки следующие:**

- Общая длина двух тросов – 2000 м;
- радиус описываемой окружности – 1000 м;
- период – 20 с;
- окружная скорость – 314 м/с;
- ускорение на концах связки – 10 g.

При таких параметрах каждые 10 секунд будет происходить забор реголита при расстоянии ловушек накопителей от точек выброса от 1 до 10 м. Возможно преодоление возвышенностей рельефа до 1000 метров.

Преодоление возвышенностей до 2000 метров возможно при соответствующем удлинении связки. При сохранении прежней окружной скорости, чтобы не увеличился интервал между захватами реголита, необходимо добавить

еще пару ловушек, доведя общее количество тросов до четырех. Период прохождения ловушек над поверхностью равен 10-ти секундам. Возможная компоновка такой системы вместе со схемой работы показаны на рис. 2.

Вращение ловушек с окружной скоростью 314 м/с целесообразно использовать для регулярных сбросов ударников на поверхность. Результирующая скорость ударника в этом случае равна 1709 м/с с углом входа в грунт 10,6 °С. Угол разлета частиц реголита из кратера находится в пределах 30°С, что при высоте ловушки над грунтом в 10 метров дает диаметр поглощающего экрана в 5 метров. Ориентировочная масса экрана – 2500 килограммов.

Возможность уменьшить радиальное рассеивание выбрасываемого из кратера реголита за счет использования пластинчатых ударников показана на рис. 3.

Ловушка высокоскоростных пылевых частиц – изделие низкой плотности в форме пластины. Ловушка изготавливается из мезопористых материалов. Перспективны металлические пены высокой кратности на основе натрия, калия, лития ввиду низкой температуры переплавки для повторного использования. Волокнистые материалы на основе металлических нитей из щелочных металлов и эвтектических металлических сплавов также удобны ввиду простоты изготовления и переработки для повторного использования.

Технология выделения реголита из материала ловушки предполагает расплавление пластин с захваченными частицами реголита, выделение частиц и приготовление из расплава новых мезопористых пластин. Низкая температура плавления и плотность расплава меньшая, чем у реголита, – основное требование к материалу ловушки.

При соотношении ударника и выброса равного 1 к 80 масса ударника составляет 0,4 грамма, а масса пылевого выброса из кратера – 31,7 грамма.

Средняя сила торможения ловушки определяет силу тяги ЭРД. При указанных параметрах сила равна 5,4 Н. Удельный импульс ЭРД – 17000 м/с при расходе 10% от массы аккумулярованного реголита. Рабочее тело – магний и кальций. Содержание магния в реголите 4,6–5,8%, кальция – 7,9–10,7%, поэтому при потреблении в ЭРД смешанного рабочего тела обеспечивается гарантированный расход в 1/10 аккумулярованного вещества.

Электрическая мощность ЭРД – 92 кВт, мощность фотоэлектрических преобразователей – 184 кВт.

## ПЕРЕРАБОТКА РЕГОЛИТА

В составе орбитального накопительного комплекса находится перерабатывающий центр – химико-технологический блок. В него поступает сырье, аккумулярованное орбитальным экскаватором.

Реголит обрабатывается фтором в химическом реакторе. Результат обработки – кислород, газообразный фторид кремния и твердые фториды металлов.

Кислород и фторид кремния сепарируются посредством охлаждения до жидкого и твердого состояний. После отделения от кислорода фторид кремния подогревается и разлагается в электролизере (затраты 1 кВт·ч/кг реголита) на фтор и кремний, фтор возвращается в реактор обработки реголита.

Фториды металлов восстанавливаются обработкой жидким калием. Фторид калия разлагается на составляющие в электролизере (затраты 10 кВт·ч/кг реголита), металлы разделяются центробежной сепарацией, кристаллизацией расплава и обработкой СО с образованием карбониллов. Карбониллы сепарируются и разлагаются нагревом на СО и металлы. Моноокись углерода возвращается в реактор.

**Для обработки 1 кг реголита согласно работе [11] требуется:**

- 11 кВт·ч электроэнергии для электролизеров;
- печи с температурой нагрева от 110 °С до 800 °С (с нагревом от Солнца или ядерного реактора);
- холодильная установка с нижним уровнем температур -178 °С.

При расходе реголита 100 т/год потребная мощность электропитания электролизера KF составит ~125 кВт, а электропотребление ожижителя кислорода ~5 кВт.

## ВЫВОДЫ

Система Lundust создает новую ситуацию, при которой производство ракетного топлива из лунного реголита по материальным и временным затратам выгоднее производства топлива из сырья околоземных астероидов. Устранение необходимости доставлять оборудование на поверхность Луны делает запуск добывающе-перерабатывающих комплексов на окололунную орбиту таким же простым, как отправка комплексов к астероидам. При этом если Lundust через полнедели после старта с околоземной орбиты выходит на окололунную орбиту, сразу начинает коммерческое производство кислорода из реголита и генерирует прибыль, то астероидный комплекс от 30 до 100 недель будет совершать перелет от Земли к астероиду. Кроме того, лунное топливо открывает доступ к главному поясу астероидов, который еще труднодоступен. Таким образом, добывающие космические компании получают новый эффективный инструмент развития старательского дела.



## Литература

1. **Шевченко В. В.** Лунная база. М.: Знание, 1991. 64 с.
2. **Timothy Cichana, Stephen A. Baileyb, Adam Burchc, Nickolas W. Kirbyd.** Concept for a Crewed Lunar Lander Operating from the Lunar Orbiting Platform-Gateway. 69th International Astronautical Congress (IAC), Bremen, Germany, 1–5 October 2018.
3. **Перов В. Д., Стахеев Ю. И.** Космические аппараты исследуют Луну (к 20-летию запуска «Луны-1»). М.: Знание, 1979.
4. **O'Neill G. K.** Space colonies and Energy Supply to the Earth. *Science*, 1975, vol. 190, pp. 943–947.
5. Lunar Crater Observation and Sensing Satellite (LCROSS): NASA's Mission to Search for Water on the Moon. National Aeronautics and Space Administration. Press kit. June 2009. p.36 [Электронный ресурс]. URL: [https://web.archive.org/web/20091027111849/http://www.nasa.gov/pdf/360020main\\_LRO\\_LCROSS\\_presskit2.pdf](https://web.archive.org/web/20091027111849/http://www.nasa.gov/pdf/360020main_LRO_LCROSS_presskit2.pdf) (Retrieval date: 01.10.2018).
6. Hayabusa-2 – Asteroid Exploration Mission [Электронный ресурс] // Spacecraft & Satellites. Monday, November 19, 2018. URL: <http://spaceflight101.com/spacecraft/hayabusa-2/> (Retrieval date: 02.10.2018).
7. Ideas that Gel. Technology [Электронный ресурс] // NASA. 02.11.2002. URL: <https://www.nasa.gov/vision/earth/technologies/aerogel.html> (Retrieval date: 02.10.2018).
8. **S. Maurice, R. C. Wiens, M. Saccoccio et al.** The ChemCam Instrument Suite on the Mars Science Laboratory (MSL) Rover: Science Objectives and Mast Unit Description. *Space Science Reviews*, 2012, vol. 170, iss. 1–4, pp. 95–166. DOI: 10.1007/s11214-012-9912-2
9. **Wiens, R. C., Maurice, S., Barraclough, B. et al.** The ChemCam Instrument Suite on the Mars Science Laboratory (MSL) Rover: Body Unit and Combined System Tests. *Space Science Reviews*, 2012, vol. 170, iss. 1–4, pp. 167–227. DOI: 10.1007/s11214-012-9902-4
10. Динамика удара / Пер. с англ. / Зукас Дж. А., Николас Т., Свифт Х. Ф. и др. М: Мир, 1985. 296 с.
11. **Еськов Ю. М.** Топливо из лунного сырья // Земля и Вселенная. 2001. № 4. С. 55–62.

## References

1. **Shevchenko V. V.** Lunnaya baza. Moscow, Znanie, 1991. 64 p.
2. **Timothy Cichana, Stephen A. Baileyb, Adam Burchc, Nickolas W. Kirbyd.** Concept for a Crewed Lunar Lander Operating from the Lunar Orbiting Platform-Gateway. 69th International Astronautical Congress (IAC), Bremen, Germany, 1–5 October 2018.
3. **Perov V. D., Stakheev Yu. I.** Kosmicheskie apparaty issleduyut Lunu (k 20-letiyu zapuska "Luny-1"). Moscow, Znanie, 1979.
4. **O'Neill G. K.** Space colonies and Energy Supply to the Earth. *Science*, 1975, vol. 10, 5 Dec. 1975, pp. 943–947.
5. Lunar Crater Observation and Sensing Satellite (LCROSS): NASA's Mission to Search for Water on the Moon. National Aeronautics and Space Administration. Press kit. June 2009. p.36. Available at: [https://web.archive.org/web/20091027111849/http://www.nasa.gov/pdf/360020main\\_LRO\\_LCROSS\\_presskit2.pdf](https://web.archive.org/web/20091027111849/http://www.nasa.gov/pdf/360020main_LRO_LCROSS_presskit2.pdf) (Retrieval date: 01.10.2018).
6. Hayabusa-2 – Asteroid Exploration Mission. Spacecraft & Satellites. Monday, November 19, 2018. Available at: <http://spaceflight101.com/spacecraft/hayabusa-2/> (Retrieval date: 02.10.2018).
7. Ideas that Gel. Technology. Available at: <https://www.nasa.gov/vision/earth/technologies/aerogel.html> (Retrieval date: 02.10.2018).
8. **S. Maurice, R. C. Wiens, M. Saccoccio et al.** The ChemCam Instrument Suite on the Mars Science Laboratory (MSL) Rover: Science Objectives and Mast Unit Description. *Space Science Reviews*, 2012, vol. 170, iss. 1–4, pp. 95–166. DOI: 10.1007/s11214-012-9912-2
9. **Wiens, R. C., Maurice, S., Barraclough, B. et al.** The ChemCam Instrument Suite on the Mars Science Laboratory (MSL) Rover: Body Unit and Combined System Tests. *Space Science Reviews*, 2012, vol. 170, iss. 1–4, pp. 167–227. DOI: 10.1007/s11214-012-9902-4
10. Zukas Dzh. A., Nikolas T., Svift Kh. F. et al. *Dinamika udara*. Moscow, Mir, 1985. 296 p.
11. **Eskov Yu. M.** Toplivo iz lunnogo syrya. *Zemlya i Vselennaya*, 2001, no. 4, pp. 55–62.

© Майборода А.О., 2018

### История статьи:

Поступила в редакцию: 09.11.2018  
Принята к публикации: 27.11.2018

**Модератор:** Гесс Л. А.

**Конфликт интересов:** отсутствует

### Для цитирования:

Майборода А.О. *Lundust – орбитальный экскаватор для лунных старателей // Воздушно-космическая сфера. 2018 №4(97). С. 84–93.*