

Технико-экономические требования к горным процессам и оборудованию при добыче воды из лунного грунта



П. П. Ананьев,
к. т. н., генеральный директор НП «ЦИГТ»
cigt@mail.ru



К. О. Беляков,
вице-президент по стратегическому развитию группы компаний Элекард
Konstantin.Belyakov@elecard.ru



П. Н. Иванов,
студент, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
pasha-19951995@mail.ru



Г. В. Мерзликин,
студент, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
gmv.95@inbox.ru



А. В. Плотникова,
старший преподаватель, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»; директор ООО «ГАН»
plotnikovaav@inbox.ru

В статье приведена методика определения допустимых пределов удельных показателей, предполагаемых космических горно-перерабатывающих комплексов, включая их материалоемкость и энергоемкость технологического процесса.

Ключевые слова: Луна, реголит, добыча воды, затраты, производительность.

Введение

В настоящее время имеется тенденция на освоение сырьевой базы природных космических объектов и производство, непосредственно в космосе, водородного топлива и криогенных компонентов. Наличие космического производства может принципиально изменить концепт освоения внеземного пространства. Экономическая целесообразность этого обусловлена тем, что доставка 1 кг груза на околоземную орбиту составляет около \$10000, доставка того же груза на Луну — \$20000. [1]. Возникнет комплекс задач, направленных на повышение экономической эффективности космической индустрии, в первую очередь, за счет снижения затрат на транспортировку топлива.

В настоящее время западными частными компаниями реализуются проекты по созданию орбитальных заправочных станций, призванных продлить срок эксплуатации коммерческих спутников. Сегодня известен

прецедент, когда пользователь, за обслуживание и заправку четырех спутников оплачивает владельцу орбитальной заправочной станции сумму в размере \$265 млн [2].

При освоении сырьевой базы природных космических объектов использование традиционных горных технологий мало приемлемо, ввиду принципиальных различий, как в условиях эксплуатации, так и в структуре затрат.

Удельные показатели традиционных горно-перерабатывающих комплексов и перспективного горно-космического оборудования

При разработке горно-перерабатывающих комплексов земного применения особое внимание уделяется вопросам удельной энергоемкости процесса, так как до 50% в общем объеме себестоимости продукции составляют затраты на энергоносители.

Таблица 1

Удельные характеристики горных процессов и оборудования земного применения

Наименование	Удельная энергоёмкость процесса, \bar{W} (кВт·ч/т)	Удельная материалоемкость технологического оборудования, \bar{m}_T (т·ч/т)
Бурение (по массе бурового шлама)	170,0-230,0	40,0-50,0
Экскавация	0,2-1,5	0,08-0,1
Перемещение	0,5-2,0	0,15-1,70
Дробление	0,8-2,0	0,10-0,20
Измельчение	14,0-30,0	0,50-2,50
Испарение	250,0-300,0	4,30-7,90
Конденсация	90,0-200,0	4,10-4,70

Таблица 2

Удельные характеристики энергетического оборудования космического применения

Принцип действия	Вид производимой энергии	Удельная материалоемкость энергетического оборудования \bar{m}_W , Т/кВт
Солнечная энергетика	Электрическая	0,550-0,750
Гелиоконцентратор	Тепловая	0,020-0,040
Ядерный реактор	Электрическая	0,110-0,140
Ядерный реактор	Тепловая	0,005-0,007

Вопросы материалоемкости оборудования отходят на второй план.

В табл. 1 приведены удельные характеристики горных процессов и оборудования земного применения [3-10].

Удельная материалоемкость традиционного технологического оборудования, достаточно велика — 8-12 т·ч/т.

В условиях добычи и переработки горной массы на Луне, энергоёмкость процессов перемещения, испарения и конденсации может быть во много раз меньше, чем в земных условиях.

По данным NASA, ведется разработка проекта по созданию технологической платформы и специализированного робота-погрузчика. Комплекс предназначен для транспортировки реголита на платформу и его дальнейшую переработку с целью извлечения воды [1]. По предварительным расчетам, чтобы заправить одну ракету топливом, одному роботу «RASSOR Excavator» необходимо работать пять лет по 16 ч в сутки [2]. Удельная материалоемкость робота погрузчика — 11 т/(т·ч), а энергоёмкость составляет 25 кВт·ч/т.

Для обеспечения космического горного оборудования соответствующей энергетикой потребуются создание энергетической установки. С точки зрения ее материалоемкости, важное значение имеет ее принцип действия. В табл. 2 приведены удельные показатели материалоемкости (Т/кВт) энергетических установок [11-14]. Из табл. 2 следует, что использование тепловой энергии в технологическом процессе является предпочтительным, особенно для энергоёмких процессов.

Определение области допустимых значений удельных показателей космического горно-перерабатывающего оборудования

Общая материалоемкость горного космического комплекса, включая энергетическую установку определяется выражением:

$$\bar{m}_\Sigma = \bar{m}_T + \bar{m}_W \bar{W}, \quad (1)$$

где \bar{m}_Σ — общая удельная материалоемкость комплекса на единицу его производительности по горной массе (т·ч/т); \bar{m}_T — удельная материалоемкость технологи-

ческого оборудования на единицу его производительности по горной массе (т·ч/т); \bar{m}_W — удельная материалоемкость энергетического оборудования на единицу производимой им мощности (т/кВт); \bar{W} — удельная энергоёмкость процесса (кВт·ч/т).

Стоимость космического горного проекта, включая разработку, создание, доставку и введение в эксплуатацию горно-перерабатывающего комплекса в большой степени будут определяться затратами на его транспортировку и может быть определена выражением:

$$I = \frac{\bar{m}_\Sigma Q \bar{S}}{K_{\text{транс}}}, \quad (2)$$

где Q — производительность аппарата (т/ч); \bar{S} — цена доставки единицы массы груза (\$/т); $K_{\text{транс}}$ — доля транспортных затрат в общей стоимости проекта.

При извлечении воды из лунного грунта и ее коммерческой реализации в качестве сырья для производства водородного топлива, необходимо учесть вклад цикла добычи и переработки реголита в добавленную стоимость общего процесса производства. Цена возможной реализации водородного топлива может быть спрогнозирована с учетом конкурентной скидки, относительно его аналога, доставленного с Земли. Цена земного аналога, в основном, определяется стоимостью его доставки на орбиту \bar{S} . Следовательно, можно спрогнозировать конкурентную цену реализации воды, как основного сырья для космического производства водородного топлива:

$$\Pi = K_{\text{скид}} K_{\text{дол}} \bar{S}, \quad (3)$$

где $K_{\text{скид}}$ — скидка относительно цены топлива, доставленного на орбиту с Земли; $K_{\text{дол}}$ — долевой вклад цикла извлечения воды из реголита в общем процессе производства водородного топлива.

Ежегодный объем извлеченной из реголита воды составит:

$$V = Q K_{\text{сез}} 365 24 (C/100\%) (\varepsilon/100\%), \quad (4)$$

где $K_{\text{сез}}$ — коэффициент сезонности, характеризующий часть земного года, пригодного для работы на природном космическом объекте; C — весовая концентрация воды в реголите, %; ε — показатель извлечения, %; множители 365 и 24 означают количество суток в земном году и часов в земных сутках соответственно.

Размер выручки от реализации воды за период времени T , соответствующий сроку окупаемости проекта, составит:

$$B = V \text{Ц} T K_{\text{диск}}, \quad (5)$$

где $K_{\text{диск}}$ — коэффициент дисконтирования, определяемый выражением:

$$K_{\text{диск}} = (1/(\alpha T)) (((1+\alpha)^T - 1)/(1+\alpha)), \quad (6)$$

где α — ставка дисконтирования.

Граница инвестиционной привлекательности проекта определяется из условия, что затраты на реализацию проекта I должны быть меньше дохода от реализации воды за период окупаемости T .

Принимаем допущение, что операционными расходами за период эксплуатации роботизированного горно-перерабатывающего комплекса можно пренебречь, за исключением амортизационных отчислений, равных стоимости капитальных затрат, отнесенных к плановому времени эксплуатации.

Принимаем повышенный норматив амортизационных отчислений из условия равенства срока плановой эксплуатации срока окупаемости T .

Для инвестиционной привлекательности проекта необходимо обеспечить выполнение неравенства:

$$I \leq B - (I/T)$$

или

$$I \leq B (T/(1+T)). \quad (7)$$

Используя выражения (2)-(6) в неравенстве (7), условие инвестиционной привлекательности можно представить в виде:

$$\bar{m}_{\Sigma} \leq 8760 \frac{C}{100\%} \frac{\varepsilon}{100\%} K_{\text{скид}} K_{\text{дол}} K_{\text{сез}} K_{\text{диск}} \frac{T^2}{1+T}. \quad (8)$$

Данное неравенство определяет ограничение на удельную материалоемкость горно-перерабатывающего комплекса, состоящего из технологического и энергетического оборудования.

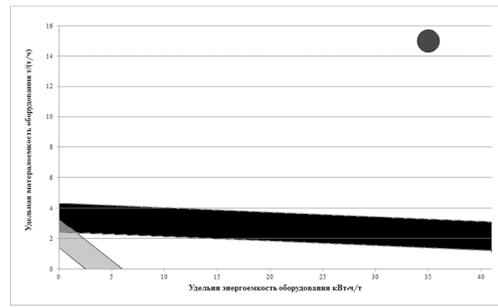
С учетом выражений (1) и (8), получаем совокупность допустимых граничных значений удельной материалоемкости технологического горного оборудования в зависимости от энергоемкости процесса и материалоемкости энергетической установки при заданном сроке окупаемости.

$$\bar{m}_T \leq A K_{\text{сез}} K_{\text{диск}} \frac{T^2}{1+T} - \bar{m}_W \bar{W},$$

где

$$A = 8760 \frac{C}{100\%} \frac{\varepsilon}{100\%} K_{\text{скид}} K_{\text{дол}}.$$

На рис. 1 приведен пример определения области допустимых значений удельной материалоемкости космического горно-технологического оборудования в зависимости от удельных энергетических затрат на извлечение воды из лунного реголита. Области



■ — область для оборудования, работающего с использованием солнечной электростанции, ■ — область для оборудования, работающего с использованием энергии гелиоконцентраторов, ● — область, характерная для существующей земной горной техники

Рис 1. Области допустимых значений удельной материалоемкости космического горно-технологического оборудования в зависимости от удельных энергетических затрат на извлечение воды из лунного реголита

на рис. 1 определяют два типа источников энергии: солнечная электростанция и гелиоконцентраторы. Границы каждой области характеризуются сроками окупаемости от 5 до 10 лет. Значения коэффициентов, используемых в данном примере следующие: $K_{\text{сез}}=0,5$; $\alpha=0,1$, $m_w=0,03$ т/кВт (гелиоконцентраторы); $m_w=0,55$ т/кВт (солнечная энергетика); $C=1\%$; $\varepsilon=60\%$; $K_{\text{скид}}=0,1$; $K_{\text{дол}}=0,3$.

Из рис. 1 следует, что использование гелиоконцентраторов, является предпочтительнее, относительно солнечной энергетике, ввиду широкого диапазона допустимых значений энергоемкости технологических процессов и материалоемкости технологических аппаратов, входящих в состав комплекса.

Заключение

Был разработан критерий определения области допустимых значений удельной материалоемкости космического горно-технологического оборудования в зависимости от удельных энергетических затрат на извлечение воды из лунного реголита. При этом использовалось условие, что срок окупаемости проекта должен соответствовать временному интервалу 5-10 лет.

Предложенный критерий не определяется производительностью оборудования и затратами на космическую логистику, с точностью до коэффициента долевого вклада цикла извлечения воды из реголита в общий процесс производства водородного топлива.

Можно сделать вывод, что горные технологии по извлечению воды из лунного грунта, основанные на тепловом воздействии на вещество, предпочтительнее, чем технологии, основанные на потреблении аппаратами электрической энергии. Это связано с тем, что энергетическое оборудование, обеспечивающее тепловое воздействие имеет низкую материалоемкость, по сравнению с энергетическим оборудованием, генерирующим электрический ток.

Для обеспечения конкурентоспособности технологии по добычи воды из лунного реголита, с целью дальнейшего производства водородного топлива, необходимо разработать и создать горно-технологические модули, которые, по материалоемкости и энергоемкости были бы ниже в 5-10 раз, по сравнению с существующими земными аналогами.

Список использованных источников

1. П. П. Ананьев, О. М. Гридин, А. В. Плотнокова, Ю. В. Смирнова. Технологии извлечения воды из грунтов космических природных объектов//ГИАБ, № 10, 2013. С. 272-277.
2. П. П. Ананьев, С. В. Васильев, Р. В. Мещеряков, А. В. Плотнокова, К. О. Беляков. Перспективы развития космической горно-перерабатывающей отрасли//Инновации, № 4, 2016. С. 7.
3. Буровая установка СО-2 (ТУ 34-23-10440-82). <http://www.str-t.ru/bury/co-2>.
4. СБШ-250. Характеристики. http://sbsh-250.ru/sbsh250/performance_attributes.
5. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 218-20-00.00.000 ТО. Экскаватор гусеничный гидравлический ET-18. ОАО «Тверской экскаватор». Тверь, 2004. С. 5. <http://sts-tver.ru/d/286218/d/et18-20-2004.pdf>.
6. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Карьерный самосвал БелАЗ-7540В грузоподъемностью 30 т. http://belprommash.ru/users/bpm/files/buklet/belaz_7540b.pdf.
7. Обзор дробильного оборудования. Череповец, 2010. С. 22. <http://www.finanaliz.ru/dwl/drobilnoe-oborudovanie-demo.pdf>.
8. Техническое описание и инструкция по эксплуатации мельниц сверхтонкого измельчения Титан МД. <http://www.allbeton.ru/upload/iblock/2a9/melnica-sverhthonkogo-izmelcheniya-titan-zaonovie-tehnologii.pdf>.
9. Промышленные печи. Каталог термического оборудования. ЗАО «НПП «Машпром». С. 11. http://www.mashprom.ru/ufiles/metal/furnace/katalog_peci_web.pdf.
10. Ведомственные нормы технологического проектирования распределительных холодильников от 28 февраля 1986 г. № 42. http://baergroup.ru/docs/books/vntp_03-86.pdf.
11. АО «НПП «Квант». Космическая фотоэнергетика. Наземная фотоэнергетика. http://npp-kvant.ru/?page_id=2503.
12. С. А. Ерошенков, В. М. Воробьев, О. И. Клименко, С. В. Угольников, А. О. Островский. Использование неориентируемых гелиоконцентраторов в энергосистемах//Збірник наукових праць УкрДАЗТ 2010. Вип. 114. С. 184.
13. Техническое описание и инструкция по эксплуатации Solarbeam-7M. <http://www.solartronenergy.com/wp-content/uploads/2014/05/SolarBeam-7M-Datasheet-1NC.pdf>.
14. В. П. Легостаев, В. А. Лопота, В. В. Сиянский. Перспективы и эффективность применения космических ядерных энергетических установок и ядерных электроракетных двигательных установок//Космическая техника и технологии, № 1, 2013. С. 12.

Technical and economic requirements of mining processes and equipment in the extraction of water from the lunar soil

P. P. Anan'ev, Candidate of technical Sciences.

K. O. Belyakov, Vice-President of Strategic Development Eлецard.

P. N. Ivanov, student, National research technological university «MISiS».

G. V. Merzlikin, student, National research technological university «MISiS».

A. V. Plotnikova, National research technological university «MISiS».

The article describes the method of determining the limits of specific indicators, the estimated space mining and processing complexes, including their consumption of materials and energy consumption of the process.

Keywords: Moon, regolith, water production, costs, productivity.

ТАЛОН ПОДПИСКИ ЖУРНАЛА



Подписка в редакции — это получение журнала сразу после тиража.

В редакции можно оформить подписку на 2016 год (с 1 по 12 номер) по льготной цене **18840 руб. 00 коп.** (Восемнадцать тысяч восемьсот сорок рублей 00 коп.), в том числе НДС — 1 712 руб. 73 коп.

Название организации _____

Фамилия, имя, отчество _____

Должность _____

Почтовый адрес (адрес доставки) _____

Просим высылать нам журнал «Инновации» в количестве _____ экземпляров.

Нами уплачена сумма _____

Платежное поручение № _____ от _____ 20 __ г.

Банковские реквизиты редакции:

ОАО «ТРАНСФЕР», ИНН 7813002328, КПП 781301001
р/с 40702810727000001308 в ДОО Приморский ПАО «Банк Санкт-Петербург», г. Санкт-Петербург»,
к/с 30101810900000000790, БИК 044030790

Дата заполнения талона подписки _____ Подпись _____

Подписка оформляется с любого номера.

Заполненный талон подписки мы принимаем по факсу: **(812) 234-09-18**

Контактное лицо: А. Б. Каминская.



ТАЛОН ПОДПИСКИ ЖУРНАЛА