

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ

УДК 534.29

ПРОБЛЕМЫ ДВИЖЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПЕНЕТРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ В ДИСПЕРСНЫХ СРЕДАХ ПРИ БУРЕНИИ РЕГОЛИТА ЛУНЫ

© 2016 г. Ю. И. Матвеев, В. И. Костенко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований РАН
117997 Москва, ул. Профсоюзная 84/32

E-mail: yu.matveev@mail.ru

Поступила в редакцию 07.09.2015 г.

Рассмотрены проблемы бурения реголита в районах Южного полюса Луны: влияние водяного льда на упругие свойства реголита, движение ультразвукового пенетрационного устройства в дисперсной среде. Показано, что с помощью низкочастотного вибрационного воздействия можно управлять вязкостью дисперсных систем. Рассчитана гидродинамика движения пенетрационного устройства в дисперсной среде. Выполнены оценки скорости бурения на различных глубинах и режимах бурения для того, чтобы обеспечить сохранение летучих компонентов грунта.

Ключевые слова: ультразвук, реголит Луны, слоистые структуры, дисперсные системы, вязкость, вибрация.

DOI: 10.7868/S0320791916050117

ВВЕДЕНИЕ

Исследования тепловых характеристик и химического состава реголита (лунного грунта) тесно связаны с созданием пенетрационных устройств (ПУ) для разведочного бурения, которые при минимальном воздействии на равновесное состояние реголита позволили бы определить требуемые характеристики (температуру, содержание воды и летучих компонент в образцах грунта) на различных глубинах погружения ПУ в реголит.

В последние годы эти задачи приобрели особую актуальность в связи с тем, что в районах полюсов Луны были обнаружены достаточно большие запасы воды, которые позволяют говорить о возможном освоении Луны, создания в районах полюсов обитаемых баз.

Миссия Луна-27, которая планируется в 2021 г., в качестве одной из задач рассматривает оценку запасов воды в районе Южного полюса Луны путем получения образцов грунта с помощью ПУ. После посадки в одном из кратеров Южного полюса выбор места бурения будет осуществляться с помощью технического зрения и манипулятора, на котором устанавливается ПУ (рис. 1). ПУ должно обладать такими характеристиками, чтобы обеспечить бурение реголита, содержащего лед, до глубины 2 м.

В настоящее время во многих лабораториях занимают вопросы создания ПУ [1–6]. Некоторые из них были установлены на посадочных

космических аппаратах: Curiosity (Марс), Philae (комета Чурюмова–Герасименко), и были предприняты попытки осуществления бурения на этих космических телах с разной степенью успеха.

При создании ПУ закладываются разные принципы бурения, большинство из которых реализованы на Земле. Специфика бурения в условиях Луны заключается в том, что приходится бурить в условиях вакуума, низких температур (–120...10°C) и ограниченного веса и габаритов ПУ, а также выделяемых для этих целей времени и энергии. По этому многие приемы, используемые при бурении в земных условиях, исключаются. Но взамен появляются такие проблемы, как течение концентрированных дисперсных систем (разбуренного реголита) между стенкой скважины и ПУ, охлаждение инструмента ПУ, создание осевой силы для движения ПУ вглубь скважины и т.д.

Среди различных типов ПУ, предлагаемых для бурения Луны на воду в районах Южного полюса, ПУ с ультразвуковым (УЗ) приводом имеют большее будущее. Их перспективность обусловлена несколькими причинами [7, 8]:

– высокой скоростью бурения при относительно малых потреблении энергии и габаритах;

– незначительной силой прижима рабочего инструмента к грунту, что позволяет уменьшить размеры толкающего устройства;

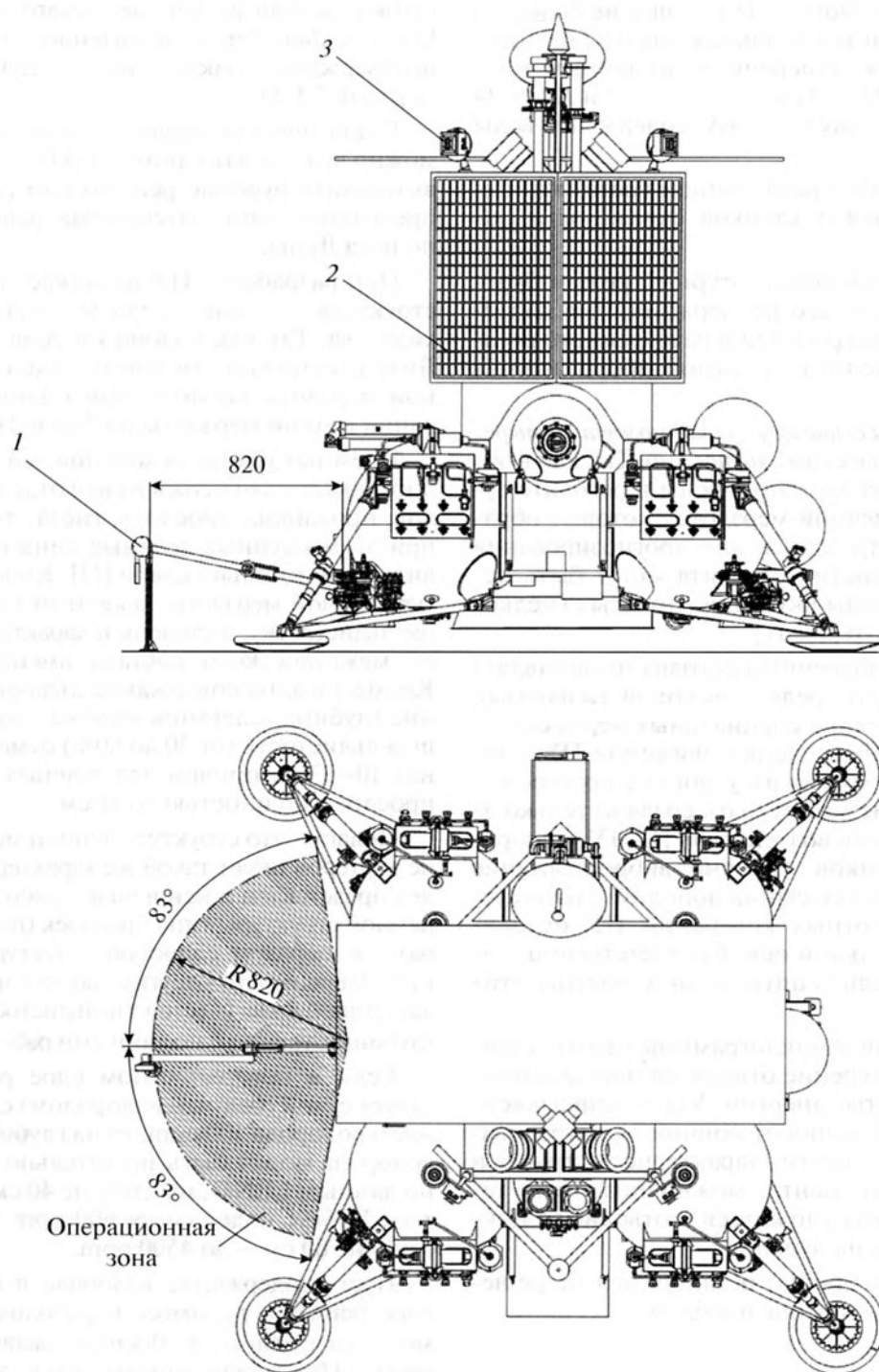


Рис. 1. Операционная зона лунного модуля: 1 – ультразвуковое пенетрационное устройство, 2 – солнечные батареи, 3 – камера системы технического зрения.

– благодаря использованию процесса дробления УЗПУ могут свободно проходить через лед и более прочные породы грунта;

– размеры частиц раздробленного грунта таковы, что его образцы могут быть использованы

(без дополнительного дробления) при хроматографическом анализе.

Чтобы обеспечить движение ПУ с УЗ-приводом на больших глубинах необходимо знать или хотя бы прогнозировать:

– влияние водяного льда на упругие свойства реголита до глубины 2 м, так как упругие характеристики реголита, измеренные по данным миссий Apollo (США) и Луна-16, Луна-20 и Луна-24 соответствуют сухому реголиту (содержание воды ~0.1% [9]);

– движение ПУ в разбуренной среде (канале, образующемся между стенкой скважины и поверхностью ПУ);

– определенный температурный режим бурения и возможности его поддержания (не допускать перегрева инструмента и разбуренного реголита, чтобы выполнить условия забора летучих компонентов).

Перечисленный выше круг задач может быть решен чисто акустическими методами. Так как в области большого содержания воды в реголите существуют зоны вечной мерзлоты, которые образуют слоистые структуры, для прогнозирования упругих характеристик реголита могут быть использованы подходы акустики слоистых (мелко-слоистых) структур [10, 11].

Поскольку разбуренный реголит представляет собой дисперсную среду с высокой вязкостью, требуется применение специальных мер (псевдосжижения) для обеспечения движения ПУ в такой среде. В космических условиях псевдосжиженное состояние может быть создано только за счет вибрационного воздействия [12, 13] – виброожижение порошков. Обычно виброожижение достигается за счет создания дополнительных угловых низкочастотных колебаний ПУ относительно его продольной оси. Соответственно, необходимо определить оптимальную частоту этих колебаний.

В соответствии с циклограммой работы станции Луна-27 на бурение отводится определенное время и количество энергии. Установив зависимость скорости бурения от мощности, затрачиваемой на бурение, упругих характеристик грунта и УЗ-частоты инструмента, можно подобрать такую частоту, чтобы уложиться в отводимое циклограммой время на бурение.

Ниже более подробно остановимся на решении перечисленных выше проблем.

УПРУГИЕ СВОЙСТВА РЕГОЛИТА В ЗОНЕ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ ЛУНЫ

В работе [14] по данным исследований с помощью нейтронного детектора LEND, разработанного в ИКИ РАН и установленного на американском спутнике Луны LRO, было высказано предположение, что в районах Южного полюса Луны за пределами “ловушек” (не освещенных Солнцем областей Луны, где сохраняется водяной лед) существуют зоны “вечной мерзлоты” с высоким содержанием воды, находящиеся на определенной

глубине реголита. Данные другого прибора Diviner Lunar Radiometer, установленного на LRO, также подтверждают заключение о лунной “вечной мерзлоте” [15].

Геологическую разведку залежей воды на Луне можно выполнить с помощью ПУ, позволяющего выполнить бурение реголита до глубины 2 м за пределами вечно затененных районов Южного полюса Луны.

При разработке ПУ возникает вопрос, какова структура “вечной мерзлоты” на Луне, ее упругие свойства. Так как подобного рода информация о Луне отсутствует, то при оценке структуры лунной мерзлоты воспользуемся данными исследования вечной мерзлоты на Земле [16, 17].

В земных условиях водяной лед в вечной мерзлоте может находиться в виде отдельных кристаллов, прожилок, прослоев, гнезд, линз и клиньев, при этом крупные ледяные линзы и клинья развиты сравнительно слабо [17]. Криогенная структура вечной мерзлоты зависит от содержания льда (ее льдистости), а степень и характер льдистости – от механического состава вмещающих пород. Кроме того, на содержание льда оказывает влияние глубина залегания мерзлых пород. Наибольшая льдистость (от 30 до 80%) отмечена на глубинах 10–33 м, причем лед залегают в виде линз и прослоек мощностью до 11 см.

Полагая, что структура лунной мерзлоты в районе кратеров имеет такой же характер, как земная, и лед представлен в ней в виде наиболее распространенной структуры типа прослоек (шлировая текстура), т.е. образует слоистую структуру, можно оценить зависимость упругих свойств и концентрации замерзшей воды C_i (степень льдистости) реголита от глубины бурения h по данным работы [14].

Если в поверхностном слое реголита существует сухой (бедный водородом) слой с содержанием водорода 100 ppm, то на глубине содержание водорода может быть значительно выше. Согласно данным LEND, на глубине 40 см в районе кратера Кабеус содержится 600 ppm водорода, а на глубине 60 см – до 4500 ppm.

Пусть содержание водорода в поверхностном слое реголита p_H имеет параболическую зависимость от глубины h . Воспользовавшись данными работы [14], можно считать, что $p_H = 100 - 109.2h + 3.042h^2$. Эта зависимость обращается в нуль при $h_1 = 0.94$ см и $h_2 = 35$ см. Физический смысл имеет $h_2 = h_0 = 35$ см.

Допустим, что функция C_i от h имеет следующий вид: $C_i = 1 - \exp(-k(h - h_0))$, где h_0 – толщина сухого слоя. Для определения коэффициента k воспользуемся данными работ [18]: средняя концентрация $\langle C_i \rangle = h_b^{-1} \int_0^{h_b} C_i dh = 5.6\%$ при выбросе реголита с глубины $h_b = 400$ см после бомбарди-

Таблица 1. Прогнозируемые мощности ледяных прослоек h_l , прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ грунта при различных глубинах бурения h

h , см	C_i , %	h_l , см	$\sigma_{рег}$, МПа	$\sigma_{сж}$, МПа
35	0	0	0.006	0.006
50	0.51	0.17	0.0084	0.291
60	0.85	0.3	0.0084	0.479
100	2.2	0.74	0.0096	1.208
150	3.83	1.29	0.015	2.135
200	5.45	1.83	0.0192	3.04
217	6.0	2.02	0.0192	3.34

ровки Луны последней ступенью “Атласа”. При определении k выражение для C_i разложим в ряд. Ограничившись квадратичным членом по $k(h - h_0)$, получим следующее выражение для k : $k = 2\langle C_i \rangle / (h_b - h_0)$. Найденное значение k при $h_0 = 35$ см равно $k = 3.4 \times 10^{-4}$ см $^{-1}$. В табл. 1 приведены значения C_i и мощности ледяной прослойки h_l , оцененной из условий, что на глубине 12 м при $C_i = 32.7\%$ можно взять $h_l = 11$ см как в работе [17], а на меньших глубинах h_l в случае слоистых структур пропорционально C_i [19]. Как видно из табл. 1, прослойки льда уже с глубины 60 см могут представлять серьезное препятствие для бурения.

Для оценки упругих характеристик лунной мерзлоты воспользуемся данными работы [19]. Так как мерзлота образует в основном слоистую структуру, при вертикальном внедрении ПУ в реголит (ось z) будут преимущественно возбуждаться продольные волны смещений $u(z)$. Полагая, что зависимость волны смещения от координаты z задается выражением $\sim \exp(ik_z z)$, выражение для продольной волны с характерной амплитудой C_0 в слоистой среде можно записать, согласно [19], следующим образом:

$$u(z) = -\frac{q}{A} C_0 \cos\left(\frac{k^2 \sqrt{az}}{q}\right), \quad (1)$$

$$\text{где } q^2 = k^2 \left(\left\langle \frac{E}{1-\sigma^2} \right\rangle \left\langle \frac{1}{\mu} \right\rangle - \left\langle \frac{\sigma}{1-\sigma} \right\rangle \right), A = ik^3 \left\langle \frac{E}{1-\sigma^2} \right\rangle, \\ a = \left\langle \frac{\sigma}{1-\sigma} \right\rangle^2.$$

Рассмотрим аргумент косинуса в выражении (1):

$$\frac{k^2 \sqrt{az}}{q} = \frac{k \left\langle \frac{\sigma}{1-\sigma} \right\rangle z}{\left(\left\langle \frac{E}{1-\sigma^2} \right\rangle \left\langle \frac{1}{\mu} \right\rangle - \left\langle \frac{\sigma}{1-\sigma} \right\rangle \right)^{1/2}} = \\ = \frac{\omega \left\langle \frac{\sigma}{1-\sigma} \right\rangle z}{C \left(\left\langle \frac{E}{1-\sigma^2} \right\rangle \left\langle \frac{1}{\mu} \right\rangle - \left\langle \frac{\sigma}{1-\sigma} \right\rangle \right)^{1/2}}. \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что учет слоистости среды приводит к изменению скорости продольной волны C_l на соответствующий коэффициент, который выражается через усредненные характеристики модулей упругости и коэффициентов Пуассона. В случае сухого слоя C_l будет выражаться через модуль Юнга реголита. При $z > h_0$ величина C_l будет расти под влиянием льда на коэффициент

$$\left(\left\langle \frac{E}{1-\sigma^2} \right\rangle \left\langle \frac{1}{\mu} \right\rangle - \left\langle \frac{\sigma}{1-\sigma} \right\rangle \right)^{1/2} / \left\langle \frac{\sigma}{1-\sigma} \right\rangle, \quad (3)$$

большой единицы.

Оценим с помощью выражения (3) степень льдистости и глубину, начиная с которой модуль упругости мерзлоты будет определяться модулем Юнга льда. Так как скорость продольной волны в пресном льде $(C_l)_i = 4100$ м/с при $t = -25^\circ\text{C}$, $\sigma = 0.34$, согласно [20], а в реголите, $(C_l)_{рег} = 165$ м/с, согласно [21], $\sigma = 0.2$, согласно [22], то

$$\frac{(C_l)_i}{(C_l)_{рег}} = \left(\left\langle \frac{E}{1-\sigma^2} \right\rangle \left\langle \frac{1}{\mu} \right\rangle - \left\langle \frac{\sigma}{1-\sigma} \right\rangle \right)^{1/2} / \left\langle \frac{\sigma}{1-\sigma} \right\rangle \approx 25. \quad (4)$$

Учитывая, что модуль Юнга льда $E_i \gg E_{рег}$, а $\mu_i^{-1} \ll \mu_{рег}^{-1}$, выражение (4) можно записать следующим образом:

$$\left(\frac{E_i}{1-\sigma_i^2} C_i \frac{1}{\mu_{рег}} (1-C_i) \right) = \\ = 625 \left(\frac{\sigma_i}{1-\sigma_i} C_i + \frac{\sigma_{рег}}{1-\sigma_{рег}} (1-C_i) \right)^2. \quad (5)$$

Из уравнения (5) найдем степень льдистости $C_i = 6\%$ и глубину $h = 217$ см, начиная с которой модуль упругости лунной мерзлоты будет определяться модулем Юнга льда. Соответственно, при определении скорости бурения на глубинах > 2 м прочность реголита на сжатие будет определяться прочностью водяного льда на сжатие.

Как показали более поздние исследования [23], при понижении температуры ниже 273 К прочность водяного льда на сжатие растет по линейному закону с коэффициентом наклона ~ 7 кПа К $^{-1}$, и при температуре -153 К она будет составлять 3.34 МПа.

На основании приведенных выше соотношений и данных работы [22] определим прочность сухого реголита на сжатие $\sigma_{рег}$ и прочность грунта (реголита, содержащего воду) на сжатие $\sigma_{сж}$. Так как в работе [22] приведена прочность грунта на сдвиг $\tau_{рег}$, для оценки $\sigma_{рег}$ воспользуемся соотношением между модулем сдвига μ и модулем Юнга E при однородных деформациях [24], т.е. положим $\tau_{рег} = \sigma_{рег}/2(1 + \sigma)$, σ – коэффициент Пуассона. Для реголита $\sigma = 0.2$, согласно [22]. В табл. 1 при-

ведены значения $\sigma_{\text{рег}}$, пересчитанные таким образом по данным [22].

Для определения $\sigma_{\text{сж}}$ воспользуемся выражением для $\left\langle \frac{E}{1-\sigma^2} \right\rangle$, полагая $E_i = \alpha_i \sigma_i$, где α_i – некоторый коэффициент при i -й компоненте, σ_i – соответствующая прочность на сжатие. Тогда после некоторых преобразований выражение для $\sigma_{\text{сж}}$ примет следующий вид:

$$\sigma_{\text{сж}} = \beta(\sigma_i)_w C_i + \sigma_{\text{рег}}(1 - C_i),$$

где $(\sigma_i)_w$ – прочность водяного льда на сжатие, $(\sigma_i)_w = 3.34$ МПа, $\sigma_{\text{рег}}$ – прочность реголита на сжатие.

В табл. 1 и на рис. 2 приведены зависимости $\sigma_{\text{сж}}$ от глубины бурения h , которые далее будут использованы при определении скорости бурения v .

РАЗБУРЕННЫЙ РЕГОЛИТ КАК ДИСПЕРСНАЯ СИСТЕМА

Понятие “дисперсные системы” объединяет широкий класс объектов, содержащих частицы размером от нескольких нанометров до сотен микрометров. В лабораторных условиях при бурении твердых тел (например, имитаторов реголита) эти системы состоят из двух фаз: твердой и газовой. Фаза, являющаяся непрерывной (сплошной), называется дисперсионной средой; другая фаза, раздробленная и распределенная в этой среде, – дисперсной фазой. Дисперсных фаз в системе может быть несколько (например, в разбуренном реголите могут присутствовать частицы разного химического состава и строения, частицы водяного льда).

Переход от одной фазы к другой связан со скачкообразным изменением свойств вещества. Физические и физико-химические процессы вблизи поверхности раздела фаз ответственны за поверхностные явления, которые обусловлены различием в составе и строении соприкасающихся фаз, различием в энергии связи атомов и молекул, находящихся у поверхности раздела фаз и в их объеме. В результате вблизи межфазной границы возникает нескомпенсированное поле межатомных молекулярных сил, называемых поверхностными силами [25].

Дисперсные системы с размером первичных частиц больше 1 мкм рассматриваются как грубодисперсные. В ряду грубодисперсных систем выделяется класс частиц размером порядка от 1 до 100 мкм, у которых вклад броуновского движения пренебрежимо мал, а их инерционность и гидродинамический фактор становятся главенствующими. Такие системы называются микрогетерогенными. Верхняя граница характерного размера таких частиц задается критическим размером d_c , ниже которого сила сцепления в контактах между частицами f_c превышает вес частицы G . В этом

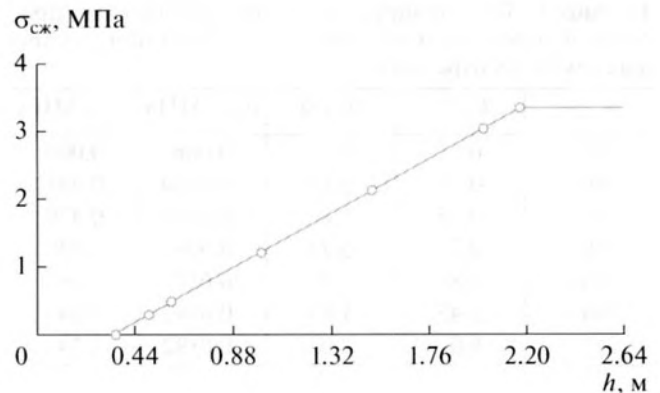


Рис. 2. Зависимость прочности на сжатие грунта $\sigma_{\text{сж}}$ от глубины бурения h .

случае под действием молекулярных сил образуются *пространственные структуры*.

Появление пространственных структур приводит к резкому росту прочности и вязкости η дисперсной среды, которая может на порядки превышать вязкость самой дисперсионной среды, т.е. полностью утрачивается способность к течению в статических условиях.

Вызывая дополнительное перемещение при течении разбуренного реголита внутри ПУ (например, создавая угловые колебания ПУ относительно его продольной оси), можно существенно снизить его вязкость, обеспечив минимальный ее уровень η_{min} . А это возможно лишь при полном разрушении пространственной структуры, образованной молекулярными взаимодействиями в контактах между частицами.

Характерная особенность этих контактов заключается в том, что, будучи разрушены внешними силами, они и образуемые ими структуры полностью восстанавливаются после прекращения внешнего воздействия.

Как следует из работы [22], реголит содержит 78% частиц, имеющих размеры >20 мкм. Если допустить, что в процессе бурения происходит дробление более крупных частиц (например, размером от 53 до 841 мкм [22]), то разбуренный порошок реголита можно рассматривать как концентрированную дисперсную систему [12, 13].

ВИБРООЖИЖЕНИЕ РАЗБУРЕННОГО РЕГОЛИТА

Для описания динамического состояния дисперсной системы достаточно установить зависимость эффективной вязкости η_{eff} системы от интенсивности механических воздействий на структуру в условиях равновесного и изотропного разрушения коагуляционной структуры.

Впервые зависимости η_{eff} от скорости деформации $\dot{\epsilon}$ или напряжения сдвига P были изучены П.А. Ребиндером с сотрудниками в ИФХ РАН [26] с помощью ротационных вискозиметров. Эффективная вязкость определялась как $\eta_{\text{eff}} = P/\dot{\epsilon}$ для каждого установившегося значения P и $\dot{\epsilon}$.

Авторы ввели два важных параметра: наибольшую вязкость практически “неразрушенной структуры” η_0 и наименьшую ньютоновскую вязкость “предельно разрушенной структуры” η_{min} , которая отличалась почти на 10 порядков от η_0 .

Более поздние исследования показали, что разрушение структуры в дисперсной системе и увеличение степени ее разрушения по мере роста скорости сдвига носит анизотропный характер [27]: образуются плотные и прочные агрегаты и слои, чередующиеся со слоями маловязкой дисперсионной среды. При этом измеряемая величина кажущейся “псевдовязкости” системы η_{eff} определяется концентрацией этих маловязких зон-слоев, вязкость которых отличается от действительных значений η_{eff} на 7–8 порядков.

Эффективным средством повышения текучести порошка является технология псевдосжижения, когда псевдосжиженное состояние создается путем пропускания через слой порошка потока дисперсионной среды (газа или жидкости) или за счет вибрационного воздействия [12, 13] – виброожижения порошков. В этом случае вынужденные колебания частиц частично компенсируют их молекулярное взаимодействие. При этом удается снизить вязкость дисперсных систем на 1–2 порядка.

В работе [13] приводится интерполяционная формула для вязкости η псевдосжиженной компоненты порошка, которая заключена между квазитвердыми участками (агрегатами) и подвергается действию вибрации:

$$\eta \sim \frac{0.133\rho\delta(gL_0)^{1/2}}{(1-R)^{0.06}} \left[x + \frac{0.3276}{(1-R)^{0.01}x^3} \right], \quad (6)$$

где ρ – плотность псевдосжиженной компоненты порошка, δ – диаметр частиц порошка, R – коэффициент восстановления скорости при столкновении неупругих сфер, $x = \omega/\omega_{\text{min}}$, $\omega_{\text{min}} = 4.16(gL_0)^{1/2}(1-R)^{0.19}/A$, ω_{min} – круговая частота колебаний, при которой вязкость псевдосжиженной компоненты порошка имеет минимальное значение, A , ω – амплитуда и круговая частота колебаний внешнего вибрационного воздействия (в нашем случае сдвиговые колебания, создаваемые поворотным устройством), L_0 – толщина узкого слоя порошка, в котором происходит однородное ожигение. При $\omega \leq \omega_{\text{min}}$ преобладает процесс разрушения пространственных структур, который выходит на плато вязкости η_{min} . Одновременно с разрушением пространственных структур вклад в вязкость вносят квазитвердые агрегаты частиц,

вязкость которых линейно растет с увеличением частоты.

В дальнейшем будем полагать, что коэффициент R имеет постоянное значение для различного типа псевдосжиженных систем. Для оценки его воспользуемся данными работы [28]. Так как, согласно [28], $A = 3 \cdot 10^{-3}$ м, $\omega_{\text{min}} = 160$ рад/с, средний диаметр частиц порошка $\delta \sim 2.2 \times 10^{-3}$ м, полагая $L_0 = n\delta$, оценим из выражения для ω_{min} число частиц порошка n , укладываемых по толщине ожигенного слоя. При этом будем учитывать, что выражение (6) получено в работе [13] при $R \rightarrow 1$. Тогда $n \sim 2$, $(1-R)^{0.19} = 0.55$ и выражение для ω_{min} можно записать следующим образом:

$$\omega_{\text{min}} = 2.3(gL_0)^{1/2}/A. \quad (7)$$

Выражение (6) при $x = 1$ примет следующий вид:

$$\eta_{\text{min}} \sim 0.093\rho\delta\omega_{\text{min}}A. \quad (8)$$

Однородное сжижение можно достичь лишь в достаточно узком слое порошка. Реально используются слои гораздо большей высоты. Поэтому добиться их ожигения за счет одной только вибрации невозможно. Обычно вибрационное воздействие сочетают со сдвиговой деформацией порошка.

В случае ПУ могут быть реализованы два вида воздействия: вибрационное, действующее на структуру потока раздробленных частиц в поперечном направлении, и сдвиговая деформация, возникающая при движении потока в канале за счет осевого усилия T . Поэтому эффективная вязкость порошка η_{eff} будет иметь следующий вид [13]:

$$\eta_{\text{eff}} \approx \eta^{1/3} (\sigma_c/s)^{2/3}, \quad (9)$$

где η определяется согласно выражению (6), σ_c – прочность пространственной структуры (агрегата), s – скорость сдвига в потоке.

Оценим вязкость псевдосжиженной компоненты η сыпучей массы при $\omega = \omega_{\text{min}}$. Для этого воспользуемся данными работы [28]: при $\rho = 770$ кг/м³, $\delta \sim 2.2 \times 10^{-3}$ м, η_{min} , согласно (8), будет равна $\eta_{\text{min}} = 0.0756$ Па с, а $\eta_{\text{eff}} = 200$ Па с. Значение $(\sigma_c/s)^{2/3}$ определим из выражения (9), которое будет равно

$$(\sigma_c/s)^{2/3} = 473(\text{Па с})^{2/3}. \quad (10)$$

В дальнейшем при оценках η_{eff} других материалов будем пользоваться выражением

$$\eta_{\text{eff}} \approx 473\eta^{1/3}. \quad (11)$$

Для снижения вязкости разбуренного реголита при его движении в кольцевом канале между стенкой скважины и поверхностью ПУ используется поворотное устройство с шаговым двигателем, вызывающее угловые колебания ПУ относительно его продольной оси в азимутальной плоскости (рис. 3). Путем подбора оптимальной частоты

угловых колебаний ПУ $\omega_{\text{уг}}$ можно обеспечить минимальную вязкость дисперсной среды.

Выполним некоторые оценки ω_{min} и $\eta_{\text{эф}}$ применительно к опытному образцу ПУ при $\delta \sim 20$ мкм, $L_0 \sim 2\delta$, $A = 0.785$ рад или $A = 0.393D_{\text{ПУ}}$, $D_{\text{ПУ}} = 25 \times 10^{-3}$ м, $\omega_{\text{min}} = 4.64$ рад/с или $f_{\text{min}} = 0.74$ Гц, т.е. f_{min} близка к частоте угловых колебаний, создаваемых шаговым двигателем в опытном образце ПУ $f_{\text{уг}} = 0.5$ Гц. Частоте колебаний шагового двигателя соответствует $\delta \sim 9$ мкм. Согласно [22], содержание частиц с $\delta > 9$ мкм составляет 92%.

Оценим теперь $\eta_{\text{эф}}$ при бурении пенобетона D400 ($\rho = 400$ кг/м³, $\delta \sim 9$ мкм, $\omega_{\text{уг}} = 3.14$ рад/с, $A = 9.8 \times 10^{-3}$ м). В этом случае $\eta^{1/3} = 0.0225(\text{Па с})^{1/3}$, а $\eta_{\text{эф}} \approx 10.6$ Па с. Далее при проведении гидравлических расчетов канала ПУ будем пользоваться именно этим значением.

СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ЗАТРАТАМИ ЭНЕРГИИ НА БУРЕНИЕ, ЧАСТОТОЙ КОЛЕБАНИЙ ИНСТРУМЕНТА, УПРУГИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ГРУНТА И СКОРОСТЬЮ БУРЕНИЯ

Разрушение горных пород при ударном способе бурения, который в основном реализуется в ультразвуковых ПУ, происходит следующим образом, согласно [29]. Под действием силы удара $P_{\text{уд}}$ режущая часть бурового инструмента внедряется в грунт на глубину h , обратно пропорциональную прочности породы на сжатие $\sigma_{\text{сж}}$:

$$h = \frac{P_{\text{уд}}}{2\xi d \sigma_{\text{сж}}}, \quad \xi = \varepsilon \eta \left(\text{tg} \frac{\alpha}{2} + f_{\text{тр}} \right), \quad (16)$$

где ξ – коэффициент, учитывающий свойства инструмента; ε – коэффициент формы лезвия инструмента, меняется от 2 до 4; α – угол заточки, находящийся в пределах 90–120°; $f_{\text{тр}}$ – коэффициент трения инструмента о породу, меняется от 0.5 до 1; η – коэффициент затупления лезвия, равный 1.2–1.3; d – диаметр скважины.

При глубине внедрения инструмента h работа одного удара $A_{\text{уд}}$ составит

$$A_{\text{уд}} = P_{\text{уд}} h / 2, \quad (17)$$

и выражение (16) можно записать следующим образом:

$$h^2 = \frac{A_{\text{уд}}}{\xi d \sigma_{\text{сж}}}, \quad (18)$$

Так как скорость бурения $v = h_0 \omega_{\text{уд}}$, а мощность, затрачиваемая на удар $W_{\text{уд}} = A \omega_{\text{уд}}$, из выражения (18) получим следующее соотношение для определения скорости бурения:

$$v = \sqrt{\frac{W_{\text{уд}} \omega_{\text{уд}}}{\xi \sigma_{\text{сж}} d}}. \quad (19)$$

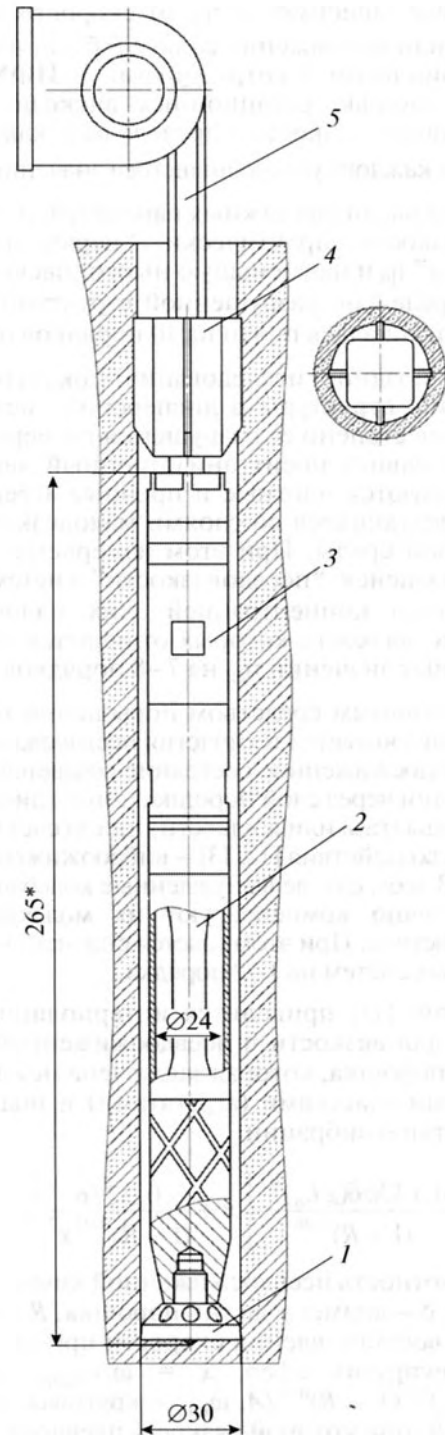


Рис. 3. Ультразвуковое пенетрационное устройство: 1 – рабочий инструмент, 2 – концентратор, 3 – пьезоэлектрический преобразователь, возбуждающий УЗ-колебания инструмента вдоль оси ПУ с частотой $\omega_{\text{уд}}$, 4 – шаговый двигатель, возбуждающий инфразвуковые угловые колебания ПУ в азимутальной плоскости относительно вертикальной оси с частотой $\omega_{\text{уг}}$ для ожигения разбуренного грунта, 5 – ленточный толкатель, создающий усилие вдоль вертикальной оси, необходимое для движения ПУ вглубь грунта и сдвиговые деформации в разбуренном грунте для усиления эффекта его ожигения.

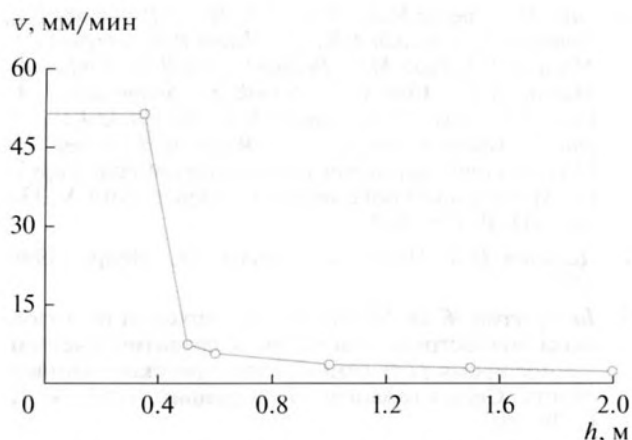


Рис. 4. Зависимость скорости v бурения ПУ от глубины бурения h .

Коэффициент ξ инструмента определим из выражения (19) по данным работы [8]: $d = 0.025$ м, для пенобетона D400 $\sigma_{сж} = 1.3$ МПа, частота колебаний инструмента $f_{уд} = 30.5$ кГц, $W_{уд} = \eta W$, W – мощность, подводимая к УЗ-преобразователю, η – коэффициент полезного действия УЗ-преобразователя, $W = 60$ Вт, $\eta = 0.6$, $v = 3.5$ мм/мин. Тогда $\xi^{-0.5} = 4 \times 10^{-6}$. В работе [30] при бурении породы, аналогичной по свойствам пенобетону, эта скорость была 3 мм/мин, т.е. примерно такой же величины.

В общем случае $\xi^{-0.5}$ будет зависеть от температуры нагрева инструмента ΔT из-за зависимости коэффициента трения $f_{тр}$ от температуры [31]. Так как в нашем случае нагрев инструмента ограничен $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ (условие сохранения летучих компонентов), $\xi^{-0.5}$ можно рассматривать как постоянную величину.

С помощью выражения (19) и значений $\sigma_{сж}$, приведенных в табл. 1, можно провести оценки изменения скорости бурения с глубиной (рис. 4). Увеличение содержания льда с глубиной приведет к уменьшению скорости бурения. Минимальная скорость бурения $v_{\min} = 2.3$ мм/мин. Далее с ростом глубины скорость бурения будет постоянной. Максимальная скорость бурения v_{\max} будет в

Таблица 2. Зависимость скорости v бурения ПУ от глубины бурения h

h , см	$\sigma_{сж}$, МПа	v , мм/мин
35	0.006	51.52
50	0.291	7.4
60	0.479	5.76
100	1.208	3.63
150	2.135	2.73
200	3.04	2.3

поверхностных слоях реголита, где $\sigma_{сж} = \sigma_{рег} = 6$ кПа и $v_{\max} = 52$ мм/мин.

Вычисления времени бурения на глубину 2 м при непрерывном бурении и выбранной частоте колебаний инструмента 30.5 кГц дают 8 ч. Однако при непрерывном бурении будет происходить нагрев инструмента. Начиная с некоторого момента времени, температуры инструмента и концентратора превысят границу удержания летучих компонентов. В условиях космоса единственный способ поддержания требуемого температурного диапазона нагрева инструмента сводится к чередованию режимов нагрева (активное бурение) и пауз (прекращения бурения), когда происходит охлаждение инструмента, т.е. к обеспечению определенной скважности процесса бурения.

Когда инструмент и концентратор изготовлены из одного материала (в случае опытного ПУ был использован титановый сплав ВТ-5), скважность $S = (t_a + t_p)/t_a = 31$, где $t_a \sim 0.1\tau$ – время активного бурения, $t_p \sim 3\tau$ – время охлаждения до исходной температуры (длительность паузы).

На самом деле величину скважности можно уменьшить. Так как $t_p/t_a \sim A(\lambda_{инн}/\lambda_{кон})$, где $\lambda_{инн}$ и $\lambda_{кон}$ – коэффициенты теплопроводности материалов инструмента и концентратора, путем подбора материала концентратора (например, использования магниевых сплавов) можно добиться уменьшения S до значения 2–3.

При скважности процесса бурения $S = 2...3$ время бурения на глубины 2 м будет равно 16–24 ч. Если этого времени окажется недостаточно для того, чтобы уложиться в циклограмму лунного модуля, необходимо изменить частоту УЗ-преобразователя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные выше оценки показывают, что с помощью ПУ с УЗ-приводом возможно проведение на Луне геологоразведочных работ в районе полюсов в разумные сроки.

Встреча с камнями обломочных пород, несмотря на малую вероятность такой встречи, может снизить скорость бурения ПУ, но не является препятствием для его движения.

ПУ может быть использовано как исследовательский прибор. Полученные аналитические выражения позволяют определить упругие свойства реголита по скорости бурения и мощности, затрачиваемой на дробление грунта.

При технически разумном решении процесса отвода тепла от ПУ (например, при помощи термоаккумуляторов, либо тепловых труб для отвода тепла на поверхность Луны) нет никаких препятствий для бурения на полную глубину реголита (12–15 м). Однако, начиная с глубины 2 м, скорость бурения меняется слабо, приближаясь к величине 2.2 мм/мин. Соответственно, время бурения возрастет до 4–5 земных суток. В этой связи нет не-

обходимости бурить на полную глубину. Исследование залежей воды можно осуществить с помощью георадара, используя результаты УЗ-бурения на глубину 2 м для калибровки данных георадара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Harkness P., Lucas M.* Development of a switchable system for longitudinal and longitudinal-torsional vibration extraction / In: 41st Annual Symposium of the Ultrasonic Industry Association, 16–18 April 2012, San Francisco CA, USA.
2. *Harkness P., Lucas M., Andrea Cardoni A.* Maximization of the effective impulse delivered by a high-frequency/low-frequency planetary drill tool // *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectr. Freq. Control.* 2011. V. 58. № 11. P. 2387–2396.
3. *Grygorczuk J., Banaszkiewicz M., Seweryn K., Spohn T.* MUPUS insertion device for the Rosetta mission // *J. Telecommunications and Information Technol.* 2007. V. 1. P. 50–53.
4. *Furutani K., Kagami E., Ohtake M., Honda C., Ohtsuki M., Kubota T., Okada T.* Machining performance of rock surface shaver driven with piezoelectric actuator for space exploration // *Proc. 11th Int. Conf. European Soc. Precis. Eng. Nanotechnol., Stockholm, Sweden.* 2012. V. 2. P. 481–484.
5. *Dolgin P., Sigel D., Askins S., Sherrit S., Bao X., Bar-Cohen Y., Chang Z.* Ultrasonic/sonic vibrating/rotating tool bits // *NASA New Technology Report.* 2001. Docket № 30370.
6. *Thomas R.G., Deviprasad Varma P.R., Mathews R.N.* Analysis of tool work interaction in ultrasonic percussive rock abrader for planetary rock abrading applications // *Int. J. Innovative Research in Advanced Engineering.* 2014. V. 1. № 8. P. 69.
7. *Bar-Cohen Y., Zacny K.* (Eds.) *Drilling in Extreme Environments: Penetration and Sampling on Earth and other Planets*, Weinheim, 2009.
8. *Khmelev V.N., Nesterov V.A., Khmelev S.S., Genne D.V., Tsyganok S.N., Kostenko V.I.* The development of experimental sample of ultrasonic equipment for the intake of lunar soil // *Proc. of XII Int. Conf. and Seminar of Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM.* 2012. P. 50.
9. *Ахманова М.В., Демьянов Б.В., Марков М.Н.* Вода в реголите Моря Кризисов (“Луна-24”) // *Геохимия.* 1978. № 5. С. 285–288.
10. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Изд-во АН СССР, 1958.
11. *Рытов С.М.* Акустические свойства мелкослойной среды // *Акуст. журн.* 1956. Т. 2. № 1. С. 71–83.
12. *Урьев Н.Б.* Высококонцентрированные дисперсные системы. М.: Химия, 1980. 310 с.
13. *Урьев Н.Б., Потанин А.А.* Текучесть суспензий и порошков. М.: Химия, 1992. 256 с.
14. *Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Boynton W.V., Chin G., Garvin J.B., Golovin D., Evans L.G., Harshman K., Kozyrev A.S., Litvak M.L., Malakhov A., Mazarico E., McClanahan T., Milikh G., Mokrousov M., Nandikotkur G., Neumann G.A., Nuzhdin I., Sagdeev R., Shevchenko V., Shvetsov V., Smith D.E., Starr R., Tretyakov V.I., Trombka J., Usikov D., Varenikov A., Vostrukhin A., Zuber M.T.* Hydrogen mapping of the lunar south pole using the LRO neutron detector experiment LEND // *Science.* 2010. V. 330. № 6003. P. 483–486.
15. *Paige D.A., Siegler M.A., Zhang J.A., Hayne P.O., Foote E.J., Bennett K.A., Vasavada A.R., Greenhagen B.T., Schofield J.T., McCleese D.J., Foote M.C., DeJong E., Bills B.G., Hartford W., Murray B.C., Allen C.C., Snook K., Soderblom L.A., Calcutt S., Taylor F.W., Bowles N.E., Bandfield J.L., Elphic R., Ghent R., Glotch T.D., Wyatt M.B., Lucey P.G.* Diviner lunar radiometer observations of cold traps in the Moon’s south polar region // *Science.* 2010. V. 330. № 6003. P. 479–482.
16. *Данилов И.Д.* Подземные льды. М.: Недра, 1990. 140 с.
17. *Белорусова Ж.М.* Многолетняя мерзлота на Тазовском полуострове и история ее развития в четвертичное время // *Вестник Ленинградского университета. Серия геологии и географии.* 1963. № 12. С. 79–89.
18. *Дорофеева В.А., Базилевский А.Т.* Экспериментальные данные о летучих компонентах на Луне // *Экспериментальная геохимия (электронный журнал).* 2013. № 1. PDF-файл.
19. *Матвеев Ю.И.* О поглощении антисимметричных колебаний мелкослойными структурами // *Акуст. журн.* 1974. Т. 20. № 4. С. 587–595.
20. *Богородский В.В.* Упругие характеристики льда // *Акуст. журн.* 1958. Т. 4. № 1. С. 19–23.
21. *Stesky R.M.* Experimental compressional wave velocity measurements in compacting powder under high vacuum: application to lunar crustal sounding // *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 9th.* 1978. P. 3637–3649.
22. *Слюта Е.Н.* Физико-механические свойства лунного грунта // *Астрономический вестник.* 2014. Т. 48. № 5. С. 358–382.
23. *Litwin K.L., Zygielbaum B.R., Polito P.J., Sklar L.S., Collins G.C.* Influence of temperature, composition, and grain size on the tensile failure of water ice: Implications for erosion on Titan // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. E08013. doi 10.1029/2012JE004101
24. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория упругости. М.: Наука, 1965.
25. *Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М.* Поверхностные силы. М.: Наука, 1985.
26. *Рибиндер П.А.* Поверхностные явления в дисперсных системах // *Избранные труды.* М.: Наука, 1979.
27. *Бардышев И.И., Урьев Н.Б.* Исследования тонкой структуры осадков концентрированных дисперсий методом аннигиляционного гамма-зонда // *Коллоид. журн.* 1994. Т. 56. № 3. С. 315–318.
28. *Гнездилов А.А., Пехтерев К.А., Пирожков Д.Н., Сорочкин С.А.* Изменение эффективной вязкости дисперсных сыпучих материалов под воздействием вибрации // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета.* 2006. № 4 (24). С. 50–53.
29. *Сулакшин С.С., Чубик П.С.* Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ. Томск: Изд-во ТПУ, 2011.
30. *Re E., Magnani P., Izzo M., Rizzi F., Senese S., del Campo F., Finotello R., Ferrario R.* EXOMARS multi-rod drill development and testing // *ASTRA 2008, Session 3, EoMars I, Noordwijk, The Netherlands.*
31. *Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.* Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.