

Разработка ультразвуковой колебательной системы для бурения лунного грунта

В. Н. Хмелев, В. А. Нестеров, Д. В. Генне, Е. В. Ильченко

Бийский Технологический институт (филиал) филиал Алтайского технического университета им. И.И. Ползунова Бийск, Россия.

Центр ультразвуковых технологий Бийск Россия.

Аннотация – Работа посвящена созданию экспериментального образца ультразвукового оборудования для проведения исследований по сверлению имитатора лунного грунта. Проведенные исследования подтвердили возможность создания аппарата для обеспечения заданных условий сверления имитатора лунного грунта при наложении ультразвуковых колебаний на рабочий инструмент.

Ключевые слова (Index Terms) – Ультразвук, преобразователь, сверление, рабочий инструмент, лунный грунт.

- малым износом рабочего инструмента.
Как известно, при наложении на рабочий инструмент УЗ колебаний для сверления проявляются недостатки, к числу которых можно отнести:

- снижение скорости сверления с увеличением глубины сверления, вследствие демпфирования инструмента и наличия частиц грунта между инструментом и образующимся каналом;

- нагрев, вследствие трения инструмента об обрабатываемый грунт и поглощения колебаний;

В связи с этим возникла необходимость в разработке макетного образца оборудования для сверления имитатора лунного грунта, проведении лабораторных исследований функциональных возможностей созданного образца для последующего анализа и выработки предложений по практической реализации проекта создания оборудования для выполнения задач в неземных условиях.

I. ВВЕДЕНИЕ

СВЕРЛЕНИЕ НЕЗЕМНОГО ГРУНТА путем выполнения отверстий малого диаметра и забор образцов без изменения структуры и состава исследуемого материала остается одной из сложнейших проблем при исследовании поверхности других планет [1-3].

Известно, что при использовании сверлильно-долбежного оборудования, наиболее теплонагруженными участками являются зоны соприкосновения инструмента с обрабатываемым материалом. Такая обработка требует значительных усилий прижима инструмента, и характеризуется высоким нагревом обрабатываемого грунта и большими значениями потребляемой энергии.

При этом, одна из основных проблем, возникающих при заборе образцов в неземных условиях, заключается в невозможности обеспечения сохранности замороженных и летучих компонентов в отбираемых образцах из-за интенсивного нагрева рабочего инструмента за счет трения.

В связи с этим, наиболее перспективной технологией сверления отверстий малого диаметра, для забора образцов неземного грунта является ультразвуковое бурение. Перспективность метода обусловлена его несомненными достоинствами:

- высокой скоростью сверления при относительно малом потреблении энергии;
- незначительной силой прижима рабочего инструмента к грунту;
- малым выделением энергии на нагрев рабочего инструмента и обрабатываемого грунта;

II. РАЗРАБОТКА МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

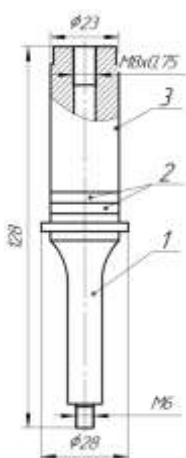
Макетный образец оборудования для проведения ультразвукового сверления имитатора лунного грунта должен содержать в своем составе ультразвуковую колебательную систему с пьезопреобразователем, преобразующую электрическую энергию в энергию высокоинтенсивных механических колебаний ультразвуковой частоты и электронный генератор, предназначенный для питания преобразователя. В связи с этим, далее рассматривается разработка отдельных узлов и элементов макетного образца.

III. РАЗРАБОТКА ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

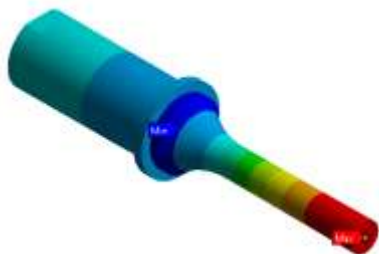
Пьезоэлектрические преобразователи, используемые в ультразвуковом оборудовании, являются резонансными системами, работающие на частотах основного резонанса. Чаще всего используются составные или пакетные преобразователи (преобразователи Ланжевена). Такой преобразователь компактен, обладает высоким КПД, хорошо согласуется с различными сменными инструментами.

При разработке пьезопреобразователя, а так же других составных элементов УЗКС расчет ведется по методикам инженерного расчета, предложенным в работах различных авторов [4-14]. Разработанная конструкция пьезоэлектрического преобразователя и распределение колебаний представлена на рис. 1.

Преобразователь состоит из частотопонижающей излучающей накладки 1, отражающей частотопонижающей накладки 2 и пьезоэлектрических элементов 3. При разработке преобразователя использовались пьезоэлектрические элементы размером 23x10x3,6, марки APC-841. Использованный пьезоматериал характеризуется высоким пьезомодулем, большой добротностью, малыми диэлектрическими потерями, малой гигроскопичностью, сравнительно большой электрической и механической прочностью.



а)



б)

а – Эскиз разработанного пьезоэлектрического преобразователя, б – распределение колебаний

1 – излучающая накладка; 2 – пьезоэлектрические кольца; 3 – отражающая накладка

Рис. 1. Разработанный пьезоэлектрический преобразователь

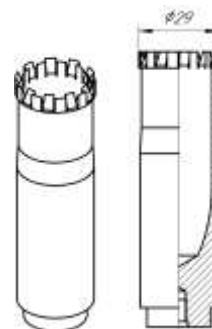
Присоединение к пьезоэлементам 2 дополнительных масс частотопонижающих накладок увеличивает общую высоту полуволнового преобразователя и снижает его частоту. Излучающая и отражающая накладка 1 и 2 в разработанном преобразователе изготавливается из титанового сплава VT5. Корректировка размеров преобразователя, определенных с помощью методик инженерного расчета осуществлялась с помощью программ, основанных на методе конечных элементов (МКЭ). Для

автоматизации разработки и проектирования использовался известный подход [6,9,11].

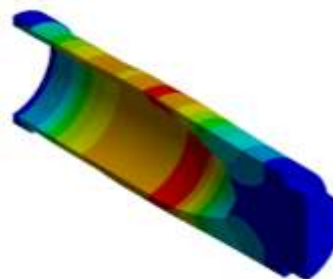
IV. РАЗРАБОТКА РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА

На текущем этапе исследований процесса ультразвукового бурения был разработан рабочий инструмент, позволяющий производить извлечение грунта в виде керна. Разработанный резонансный рабочий инструмент имеет внутренний профиль переменной сечения. Использование инструментов такой конструктивной формы позволяет получить дополнительный коэффициент трансформации колебаний. В качестве материалов для изготовления рабочих инструментов был выбран титановый сплав VT5, характеризующийся хорошей износостойкостью.

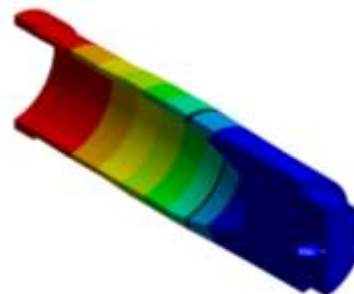
На рис. 2 показаны: эскиз разработанного рабочего инструмента (А), распределение механических напряжений рабочего инструмента (Б) и распределение колебаний рабочего инструмента (В).



а)



б)



в)

а – Эскиз разработанного рабочего инструмента, б – распределение механических напряжений, рабочего инструмента

в – Распределение колебаний рабочего инструмента

Рис. 2. Разработанный рабочий инструмент

Для обеспечения низких механических напряжений внутренний диаметр инструмента был выбран равным 24 мм, при этом наружный диаметр составил 29 мм, таким образом площадь торца инструмента составила 208 мм². Для уменьшения площади торцевой части, одновременно контактирующей с разрушаемым грунтом, рабочий инструмент был заточен в соответствие с рис. 2А. Однако, при такой заточке наиболее эффективное бурение будет обеспечиваться при вращении УЗКС вокруг своей оси на угол не менее 36 градусов.

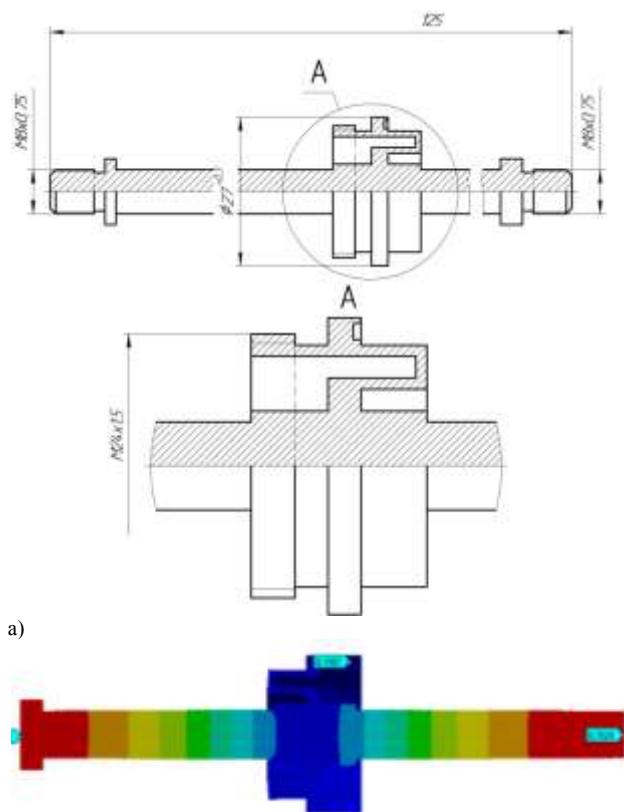
V. РАЗРАБОТКА ВИБРАЦИОННОЙ РАЗВЯЗКИ

Особенностью разрабатываемой системы является то, что при бурении грунта она должна полностью внедряться в создаваемый канал. При этом, диаметр деталей корпуса преобразователя не должен быть больше диаметра рабочего инструмента. Корпус пьезоэлектрического преобразователя необходим, как для защиты пьезокерамики от воздействия грунта, так и для крепления УЗКС к манипулятору, позиционирующего ее. При этом, корпус пьезоэлектрического преобразователя должен осуществлять эффективную вибрационную развязку для исключения передачи колебаний на конструкцию манипулятора.

Так как при разработке преобразователя были использованы пьезоэлектрические кольца диаметром 23 мм, при этом диаметр рабочего инструмента составил 29 мм, соответственно, толщина стенок пьезоэлектрического преобразователя не должна превышать 3 мм, что недостаточно для установки эффективного узла вибрационной развязки непосредственно на крепежном пояске преобразователя.

Было принято решение установить узел вибрационной развязки на тыльной стороне отражающей накладки пьезоэлектрического преобразователя.

В качестве узла вибрационной развязки было принято использовать резонансный стержень, рассчитанный на ту же частоту колебаний, что и преобразователь. Стержень представляет собой шток с установленным на нем резьбовым фланцем. Резьбовой фланец соединен со штоком тонкостенным элементом сложной формы. За счет выполнения вибрационной развязки в виде тонколистового материала сложной формы, снижается передача энергии на резьбовой фланец. На рис. 3 представлен эскиз штока.



а) – эскиз полуволнового резонансного штока, б) – Распределение колебаний полуволнового штока

Рис. 3. Конструкция полуволнового резонансного штока

Анализ распределения колебаний полуволнового резонансного штока показал, что амплитуда колебаний на резьбовом фланце составляет не более 3% от амплитуды колебаний торца штока, что является отличным показателем. Таким образом, разработанный узел который позволяет избежать передачи колебаний от УЗКС на сопутствующее оборудование.

VI. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ УЗКС

Разработка всех составных частей позволила перейти к разработке, согласованию и отладке конструкции УЗКС. Конструкция УЗКС представлена на рис. 4.

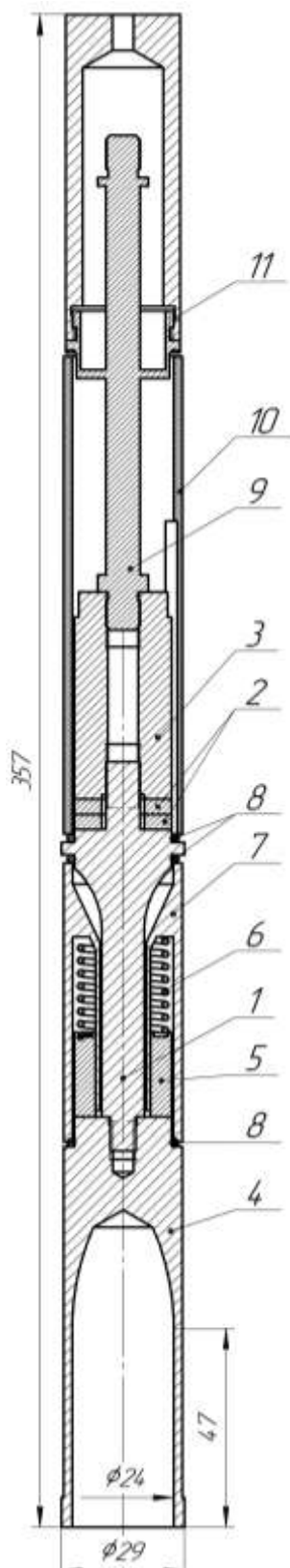


Рис. 4. Разработанная конструкция УЗКС

Разработанная ультразвуковая колебательная система состоит из пьезоэлектрического преобразователя (поз. 1-3), рабочего инструмента (поз.4), ударного

механизма (свободная масса (поз. 5) и пружина (поз.6)), корпуса концентратора (поз. 7), кольцевых резиновых уплотнений (поз. 8), полуволнового резонансного штока (поз.9), корпуса преобразователя (поз. 10) и кронштейна (поз.11).

Ударный механизм (поз. 5-6) обеспечивает преобразование части энергии ультразвуковых колебаний в низкочастотное ударное воздействие, увеличивающее эффективность бурения [8,12].

Наличие корпуса (поз. 10), в предложенной конструкции обеспечивает защиту преобразователя от воздействия грунта. Для установки защитного корпуса (поз. 10), предусмотрен крепежный пояс, расположенный в минимуме механических колебаний («нуле колебаний») пьезоэлектрического преобразователя, что исключает передачу УЗ колебаний на элементы корпуса. Корпус 7 предназначен для исключения попадания грунта в ударный механизм.

Кронштейн (поз.11) устанавливается на узел вибрационной развязки (поз.9) и предназначен для соединения УЗКС с манипулятором.

Технические характеристики разработанной УЗКС приведены в таблице I.

ТАБЛИЦА I
ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРАБОТАННОЙ УЗКС

Характеристика	Значение
Резонансная частота, кГц	23,5
Максимальная амплитуда (размах) механических колебаний рабочего инструмента, мкм	60
Масса, гр	700
Габаритные размеры, мм	29x357
Потребляемая мощность на холостом ходу, Вт	12
Потребляемая мощность под максимальной нагрузкой, Вт	50

VII. ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОЗДАННОГО МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА УЛЬТРАЗВУКОВОГО АППАРАТА

На начальном этапе работ для определения возможностей созданного макетного образца были проведены лабораторные исследования по сверлению имитатора лунного грунта. Для этого был разработан стенд, показанный на рис. 5. Особенностью стенда является наличие системы вращения, которая обеспечивает максимальный угол поворота 320 градусов.



Рис. 5. Фото станда для исследования процесса ультразвукового бурения

Для проведения исследования в качестве образца (объекта для сверления – имитатора лунного грунта) был использован пенобетон марки D400.

Для подтверждения работоспособности и определения характеристик оборудования был проведен ряд экспериментов по определению скорости сверления в зависимости от амплитуды механических колебаний

Методика проведения исследований заключалась в сверлении торцевой кромкой рабочего инструмента. Для этого инструмент прижимался с усилием 5 – 10 Н к поверхности сверлимого образца и запускалась генерация механических колебаний, под действием которых происходило разрушение образца в зоне контакта торцевой части рабочего инструмента с постепенным внедрением инструмента в образец. При этом происходило одновременное вращение УЗКС.

Иллюстрация процесса и результатов сверления представлена на рис. 6.



Рис. 6. Процесс сверление блока из пенобетона

Измерение скорости сверления производилось путем измерения глубины следа (длины высверленного образца), полученного за 1 минуту. Измерения скорости сверления, производилась при различных уровнях амплитуды механических колебаний, соответствующих 100,% 75% и 50% от максимального значения. В таблице II приведены результаты исследований.

ТАБЛИЦА II
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ СКОРОСТИ БУРЕНИЯ

Характеристика	Значение		
	100	75	50
Значение мощности, %	100	75	50
Время сверления, мин	1	1	1
Глубина сверления без свободной массы, мм	25	18	15
Глубина сверления со свободной массой, мм	32	20	15

Как показали результаты исследований, за счет использования дополнительной свободной массы возбуждаются низкочастотные колебания, способствующие увеличению скорости бурения. При снижении мощности генератора до 75% повышения эффективности почти не наблюдается. Это вызвано снижением амплитуды колебаний тыльной стороны рабочего инструмента, в результате чего свободная масса прекращает ударяться об поверхность рабочего инструмента и генерировать низкочастотные колебания. Также особенностью рассматриваемого способа бурения является снижение скорости с увеличением глубины сверления. Это связано с демпфированием стенок рабочего инструмента по мере его заглубления в образец, а также отсутствием системы извлечения разрушенного грунта из кольцевого зазора между инструментом и каналом.

Также, одним из недостатков такого способа бурения при сверлении глубоких отверстий, является необходимость обламывания, и удаления керна из канала.

VIII. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы был создан макетный образец УЗ оборудования, позволивший провести исследования бурения имитатора лунного грунта с использованием наложения колебаний на рабочий инструмент. При этом решены следующие задачи:

1. Разработана УЗ колебательная система, способная обеспечить ультразвуковое воздействие с амплитудой до 60 мкм.

2. Создан электронный генератор для питания пьезопреобразователя УЗ колебательной системы, который позволил обеспечить стабилизацию режимов работы по частоте и требуемой амплитуде механических колебаний при наличии воздействий температуры, нагрузки и других параметров внешней среды с минимизированным энергопотреблением.

3. Установлено, что за счет специальной заточки рабочей кромки инструмента, проворачивания УЗКС, а также установки подпружиненной свободной массы возможно бурение грунта с максимальной скоростью сверления до 32 мм/мин при потребляемой мощности 50 Вт при площади обработки более 200 мм².

БЛАГОДАРНОСТИ

The reported study was funded by RFBR and NSFC according to the research project №19-52-53018.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Bar-Cohen Y. Zaczyn K. (Eds.). *Drilling in Extreme Environments: Penetration and Sampling on Earth and other Planets*, Weinheim, 2009.
- [2] Khmelev V.N., Khmelev S.S., Nesterov V.A., Genne D.V., Tsyganok S.N., Kostenko V.I. The development of experimental sample of ultrasonic equipment for the intake of lunar soil // *International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2012: Conference proceedings*. – Novosibirsk: NSTU, 2012. – pp. 162–169.
- [3] Y. Bar-Cohen, S. Sherrit, B. Dolgin, D. Pal, and T. Peterson, “Ultrasonic/sonic drilling/coring (USDC) for in-situ planetary applications,” *SPIE Smart Structures Conference*, Newport Beach, CA, no. 3992-101, Mar. 2000.
- [4] V. I. Babitsky, V. K. Astashev, and A. Meadows, “Vibration excitation and energy transfer during ultrasonically assisted drilling,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 308, no. 3-5, pp. 805-814, Dec. 2007.
- [5] Khmelev V.N., Nesterov V.A., Shalunov A.V., Tsyganok S.N., Slivin A.N. Increasing of efficiency of ultrasonic vibration system work for cavitation treating of liquid // *International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2018: Conference proceedings*. – Novosibirsk: NSTU, 2018. – pp. 287-291.
- [6] Khmelev V.N., Nesterov V.A., Genne D.V., Shalunov A.V. Features of designing of a specialized high-frequency ultrasonic sprayer // *International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2018: Conference proceedings*. – Novosibirsk: NSTU, 2018. – pp. 259-264.
- [7] S. Sherrit, B. P. Dolgin, Y. Bar-Cohen, D. Pal, J. Kroh, and T. Peterson, “Modeling of Horns for Sonic/Ultrasonic Applications,” *IEEE Ultrasonics Symposium*, 1999.
- [8] P. Harkness, M. Lucas and A. Cardoni, “Maximization of the Effective Impulse Delivered by a High-Frequency/Low-Frequency Planetary Drill Tool,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 58, no. 11, Nov. 2011.
- [9] Z. Chang, S. Sherrit, X. Bao, and Y. Bar-Cohen, “Design and analysis of ultrasonic horn for USDC (Ultrasonic/Sonic Driller/Corer),” in *Proceedings of the SPIE Smart Structures Conference*, San Diego, CA, vol. 5388, 2004.
- [10] X. Bao, Y. Bar-Cohen, Z. Chang, B. P. Dolgin, S. Sherrit, D. S. Pal, S. Du, and T. Peterson, “Modeling and computer simulation of ultrasonic/sonic driller/corer (USDC),” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Sonics and Frequency Control*, vol. 50, no. 9, pp. 1147-1160, Sep. 2003.
- [11] C. Potthast, J. Twiefel, and J. Wallaschek, “Modelling approaches for an ultrasonic percussion drill,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 308, no. 3-5, pp. 405-417, Dec. 2007.
- [12] L. Stanasel and F. Ardelean, “The parameter design of the ultrasonic exponential horns,” *Nonconventional Technologies Review*, no. 4, pp. 54-58, 2010.
- [13] K. Li and A. P. Darby, “Modelling a buffered impact damper system using a spring -damper model of impact,” *Structure Control and Health Monitoring*, vol. 16, pp. 287-302, 2009.
- [14] S. Sherrit, B.P. Dolgin, Y. Bar-Cohen, D. Pal, J. Kroh, T. Peterson “Modeling of Horns for Sonic/Ultrasonic Applications”, *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, pp. 647- 651, Lake Tahoe, Oct 1999



Vladimir N. Khmelev (SM'04) is deputy director for scientific and research activity at Biysk technological institute, professor and lecturer, Full Doctor of Science (ultrasound), honored inventor of Russia, laureate of Russian Government premium for achievements in science and engineering. IEEE member since 2000, IEEE Senior Member since 2004. His scientific interests are in field of application of ultrasound for an intensification of various technological processes.



Viktor A. Nesterov has got a higher education on information measuring engineering and technologies from Altay State Technical University. He is engineer in Biysk Technological Institute. His research interests is finite-element modeling and designing ultrasonic oscillation system.



Dmitry V. Genne has got engineer's degree on information science and measuring engineering at 2006. He is engineer and lecturer in Biysk Technological Institute. He is leading specialist in controlling of treating parameters of variously applied ultrasonic equipment. His research interests are in development of high -power electronic generators for ultrasonic technological devices.



Evgeniy V. Ilchenko has got engineer's degree at 2012. He specializes in development and tuning of electronic schemes, and software development. His research interests are in field of measurements which are related to the applying of ultrasonic technological devices.