

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОНТРОЛЯ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ ВНЕЗЕМНЫХ ПОЧВ ПРИ ПОМОЩИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

В.Н. Хмелёв¹, Р.Н. Голых¹, QiQuan Quan², Р.В. Барсуков¹, В.Д. Минаков¹, Д.В. Генне¹,
Д.С. Абраменко¹, В.А. Нестеров¹, М.В. Хмелёв³

¹ Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск

² Harbin Institute of Technology, Harbin, China

³ ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ», г. Бийск

На сегодняшний день существуют несколько способов определения свойств грунта, но для исследования грунта внеземного объекта подобные способы не подходят. Однако существует направление ультразвукового бурения с целью изучения свойств грунтов внеземных объектов, обнаружения ценных веществ в глубинных слоях или обеспечения максимальной скорости выполнения каналов на заданную глубину для закрепления посадочных модулей. Оптимальная реализация ультразвукового бурения требует непрерывного получения информации о процессе воздействия на грунт с неизвестными свойствами. С помощью всей добываемой информации имеется возможность обеспечить повышение эффективности процесса ультразвукового воздействия. Однако на сегодняшний день определение свойств среды в процессе воздействия ультразвука реализовано только для жидкостей. В статье предложена и разработана модель взаимодействия ультразвукового пьезоэлектрического излучателя с грунтом, учитывающая ударно-контактный характер воздействия. Анализ модели позволил установить взаимосвязь механического импеданса грунта с его свойствами. Выявленная взаимосвязь может быть использована для определения свойств заранее неизвестного грунта в режиме реального времени в ходе ультразвукового бурения для создания бурильных устройств, гарантирующих оптимальное воздействие на широкий класс грунтов.

Ключевые слова: Ультразвук, бурение, эксперименты.

ВВЕДЕНИЕ

Определение свойств внеземных грунтов в процессе их бурения может обеспечить не только максимальную энергетическую эффективность (скорость) процесса [1–3], но и осуществить определение свойств, структуры и содержания грунтов без их забора и транспортирования в исследовательские отсеки. Решение проблемы определения свойств, структуры и содержания грунтов в экстремальных условиях (по температуре и давлению) позволит не только осуществлять закрепления посадочных модулей на объектах с малой силой тяжести с максимальной скоростью, но и осуществлять обнаружение ценных веществ в глубинных слоях грунта на любых внеземных объектах.

Необходимость обеспечения максимально эффективного ультразвукового воздействия при бурении неизвестных по свойствам грунтов во внеземных условиях и при наличии существенных ограничений на ресурсы посадочного модуля требуют реализации оптимальных режимов работы устройства бурения.

Оптимальные режимы работы устройства ультразвукового бурения зависят от механических свойств грунта, поскольку они определяют

акустическую нагрузку на излучатель и, как следствие, определяют зависимость между переменным напряжением и током через пьезоэлектрический преобразователь ультразвуковой колебательной системы. Эти величины поддаются прямым измерениям. Из этого следует, что по электрическим параметрам пьезоэлектрической ультразвуковой колебательной системы можно автоматически определять одно или несколько механических свойств грунта, а по выявленным свойствам определять и устанавливать оптимальные режимы ультразвукового воздействия.

Однако на сегодняшний день такой способ определения свойств сред реализован лишь для жидкостей, и он позволяет определять по величине акустической нагрузки на излучатель эквивалентное волновое сопротивление жидкости.

Особенность воздействия на твёрдофазные грунты заключается в том, что такое воздействие является ударно-контактным, т.е. рабочее окончание ультразвукового излучателя контактирует с поверхностью грунта только часть периода колебаний [1–3]. Из-за ударного характера воздействия перемещение рабочего окончания не только включает основную гармонику ультразвуковой частоты, равной частоте колебаний первичного преобразователя, но и как высшие гармоники за счёт ударов (каждый удар

излучателя о поверхность грунта вносит последовательность дельта-функций в ускорение рабочего окончания), так и низшие из-за свободного падения излучателя на поверхность грунта за счёт гравитации и дополнительного усилия прижима.

Для исследования влияния свойств грунта на параметры основных гармоник предложена модель, которая описывает взаимодействие ультразвукового излучателя с упругим грунтом. Модель и результаты её численного анализа описаны далее.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

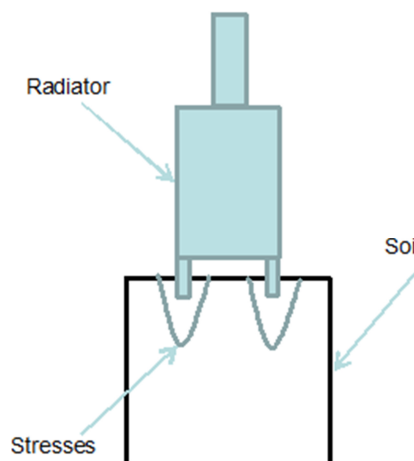
Модельная постановка задачи основана на представлении излучателя в виде эквивалентной подсистемы двух взаимодействующих тел конечной массы (рисунок 1). Сила взаимодействия между телами эквивалентной подсистемы обусловлена обратным пьезоэффектом при подаче переменного напряжения на пьезопреобразователь. Наличие пружины в эквивалентной подсистеме обусловлено упругими свойствами излучателя. Наличие демпфера обусловлено внутренним трением в материале излучателя.

В свою очередь грунт представляется в виде двухполосника, поведение которого также эквивалентно телу, закреплённому на пружине с демпфером.

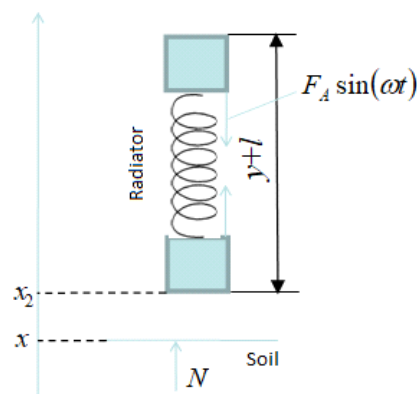
Модель предполагает, что, поскольку ею обосновывается способ детектирования типа и контроля свойств грунта, амплитуда колебаний ультразвукового излучателя достаточно мала и процесс разрушения не вызывает (т.е. вопросы хрупкости грунта, накопления микротрещин, усталостной прочности в статье не рассматриваются). Предполагаемый способ контроля заключается в первичном воздействии на грунт с малой амплитудой для определения типа и свойств (воздействие в режиме ожидания), затем на основании полученной информации о свойствах амплитуда колебаний излучателя программно увеличивается на основании полученной в ходе контроля информации о грунте. Аналогичный способ контроля реализован для воздействия на жидкие среды [4].

Система «ультразвуковой излучатель-грунт» может находиться в двух режимах:

- наличие контакта излучателя с грунтом;
- отсутствие контакта излучателя с грунтом.



а) обобщённая схема реализации воздействия излучателя на грунт



б) эквивалентное представление взаимодействия излучателя с грунтом (контакт отсутствует)



в) эквивалентное представление взаимодействия излучателя с грунтом (контакт присутствует)

Рис. 1. Схематичное изображение системы «ультразвуковой излучатель-грунт»

При отсутствии контакта излучателя с грунтом, грунт находится в режиме свободных колебаний, а излучатель находится в ненагруженном режиме со свободным падением. Период отсутствия контакта излучателя с грунтом описывается уравнениями:

$$\frac{d^2y}{dt^2} = F_A \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) \sin(\omega t) - \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) \left(ky + \alpha \frac{dy}{dt} \right) - \frac{F_p}{m_1}, \quad (1)$$

$$\frac{d^2x_2}{dt^2} = -F_A \frac{1}{m_2} \sin(\omega t) + \frac{1}{m_2} \left(ky + \alpha \frac{dy}{dt} \right) - g, \quad (2)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{k_g}{m_g} x - \frac{\alpha_g}{m_g} \frac{dx}{dt}, \quad (3)$$

где $y+l$ – расстояние между рабочим окончанием ультразвукового излучателя и его входным торцом, м; l – начальное расстояние между рабочим окончанием ультразвукового излучателя и его входным торцом, м; F_A – амплитуда силы взаимодействия между эквивалентными массами, вызванная обратным пьезоэффектом, Н; m_1, m_2 – эквивалентные массы частей излучателя, кг; k – эквивалентный коэффициент жёсткости излучателя, Н·м⁻¹; α – эквивалентный коэффициент внутреннего трения в материале излучателя, Н·с·м⁻¹; g – ускорение свободного падения, м·с⁻²; F_p – усилие прижима, Н; x_2 – координата положения рабочего окончания излучателя, м; x – координата положения рабочей поверхности грунта, м; k_g – эквивалентный коэффициент упругости грунта, Н/м; m_g – эквивалентная масса грунта, кг; α_g – эквивалентный коэффициент внутреннего трения в грунте, Н·с·м⁻¹.

При наличии контакта излучателя с грунтом $x_2=x$, добавляется сила реакции со стороны грунта, действующая на излучатель, и система уравнений (1–3) модифицируется следующим образом:

$$\frac{d^2y}{dt^2} = F_A \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) \sin(\omega t) -$$

$$- \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) \left(ky + \alpha \frac{dy}{dt} \right) - \frac{F_p}{m_1} - \frac{N}{m_2}$$

$$\left(1 + \frac{m_g}{m_2} \right) \frac{d^2x_2}{dt^2} = -F_A \frac{1}{m_2} \sin(\omega t) +$$

$$+ \frac{1}{m_2} \left(ky + \alpha \frac{dy}{dt} \right) - g + \frac{-k_g x_2 - \alpha_g \frac{dx_2}{dt}}{m_2},$$

$$\frac{d^2x_2}{dt^2} = \frac{-F_A \frac{1}{m_2} \sin(\omega t) + \frac{1}{m_2} \left(ky + \alpha \frac{dy}{dt} \right) - g + \frac{-k_g x_2 - \alpha_g \frac{dx_2}{dt}}{m_2}}{1 + \frac{m_g}{m_2}}$$

$$N = -m_g \frac{d^2x_2}{dt^2} - k_g x_2 - \alpha_g \frac{dx_2}{dt}, \quad (6)$$

где N – сила реакции опоры со стороны грунта, Н.

При этом принимается гипотеза о прилипании, т.е. излучатель после установления контакта отрывается от грунта тогда и тогда, когда сила реакции опоры со стороны грунта станет равной нулю. Аргументом в пользу данной гипотезы может служить

шероховатость поверхности грунта и малая толщина стенок рабочего окончания излучателя (по сравнению с его диаметров), что способствует «зацеплению» излучателя с грунтом. При этом гипотеза о прилипании также принимается в задачах соударения стержней [5].

Эквивалентные коэффициенты F_A, k, α , относящиеся к параметрам излучателя, в уравнениях (1, 2, 4, 5) определялись исходя из экспериментальных исследований импедансных характеристик ультразвукового излучателя, а коэффициенты, относящиеся к свойствам грунта, m_g, k_g, α_g , определялись исходя из уравнений механики грунта с учётом внутреннего трения согласно линейной реологической модели:

$$-\omega^2 \rho U = \text{div}(\sigma), \quad (7)$$

$$\sigma = \Sigma - I\omega \Sigma', \quad (8)$$

где ρ – плотность грунта, кг; U – вектор комплексной амплитуды колебательной скорости грунта, м·с⁻¹; Σ – комплексная упругая составляющая тензор напряжений в грунте, Па; $-I\omega \Sigma'$ – комплексная вязкая составляющая тензора напряжений в грунте, Па; I – мнимая единица.

Таким образом, для расчёта положений грунта и излучателя в течение периода наличия контакта решается задача Коши для системы уравнений (1–3), а для расчёта положений в течение периода отсутствия контакта решается система уравнений (4–6).

Временные границы между периодами наличия и отсутствия контакта определяются следующим образом. Если в текущий период излучатель контактирует с грунтом, момент времени перехода в режим отсутствия контакта определяется согласно выражению (когда сила реакции со стороны грунта станет равной нулю) (9):

$$t_{\text{contact} \rightarrow \text{free}} = \inf \left\{ t_1 \geq t \mid -m_g \frac{d^2x_2}{dt^2} - k_g x_2 - \alpha_g \frac{dx_2}{dt} = 0 \right\}, \quad (9)$$

В этом случае начальные условия для бесконтактной задачи движения грунта и излучателя выглядят следующим образом:

$$y(t_{\text{contact} \rightarrow \text{free}} + 0) = y(t_{\text{contact} \rightarrow \text{free}} - 0), \quad (10)$$

$$\frac{dy}{dt}(t_{\text{contact} \rightarrow \text{free}} + 0) = \frac{dy}{dt}(t_{\text{contact} \rightarrow \text{free}} - 0), \quad (11)$$

$$x_2(t_{\text{contact} \rightarrow \text{free}} + 0) = x_2(t_{\text{contact} \rightarrow \text{free}} - 0), \quad (12)$$

$$\frac{dx_2}{dt}(t_{\text{contact} \rightarrow \text{free}} + 0) = \frac{dx_2}{dt}(t_{\text{contact} \rightarrow \text{free}} - 0), \quad (13)$$

$$x(t_{\text{contact} \rightarrow \text{free}} + 0) = x_2(t_{\text{contact} \rightarrow \text{free}} - 0), \quad (14)$$

$$\frac{dx}{dt}(t_{contact \rightarrow free} + 0) = \frac{dx_2}{dt}(t_{contact \rightarrow free} - 0), \quad (15)$$

Временные границы между периодами отсутствия и наличия контакта определяются по формуле:

$$t_{free \rightarrow contact} = \inf \{t_1 \geq t | x_2 = x\}, \quad (16)$$

В этом случае начальные условия для контактной задачи движения грунта и излучателя выглядят следующим образом (учитываются законы сохранения энергии, импульса и изменение скорости при упругом соударении):

$$y(t_{free \rightarrow contact} + 0) = y(t_{free \rightarrow contact} - 0), \quad (17)$$

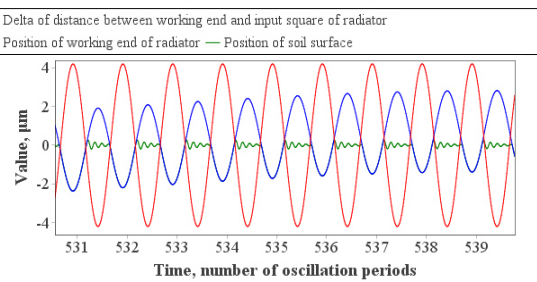
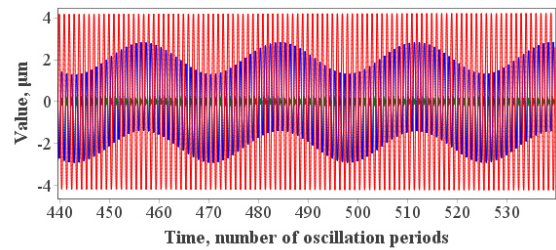
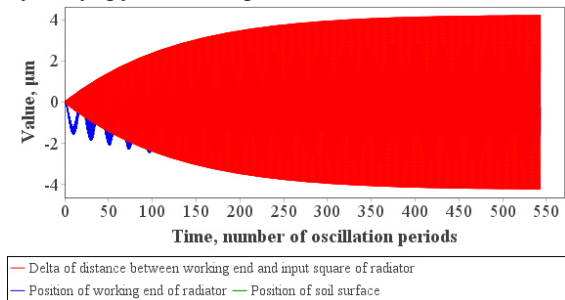
$$\begin{aligned} (m_2 + m_g) \frac{dy}{dt}(t_{free \rightarrow contact} + 0) &= \\ &= (m_2 + m_g) \frac{dy}{dt}(t_{free \rightarrow contact} - 0) + \\ &+ m_g \left(\frac{dx_2}{dt}(t_{free \rightarrow contact} - 0) - \right. \end{aligned} \quad ; \quad (18)$$

$$\begin{aligned} &\left. - \frac{dx}{dt}(t_{free \rightarrow contact} - 0) \right) \\ x_2(t_{free \rightarrow contact} + 0) &= x_2(t_{free \rightarrow contact} - 0), \quad (19) \end{aligned}$$

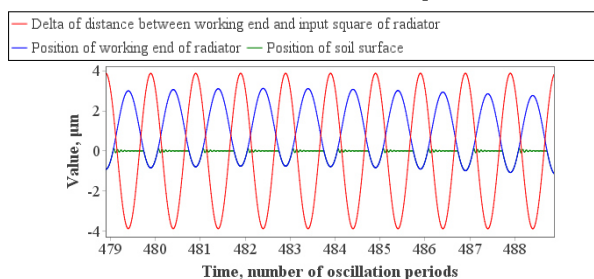
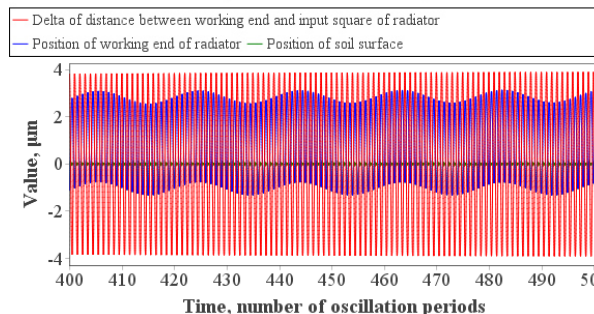
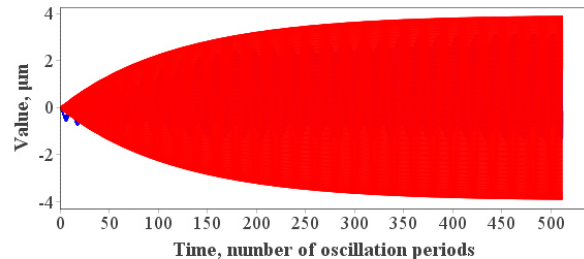
$$\begin{aligned} (m_2 + m_g) \frac{dx_2}{dt}(t_{free \rightarrow contact} + 0) &= \\ &= m_2 \frac{dx_2}{dt}(t_{free \rightarrow contact} - 0) + \\ &+ m_g \frac{dx}{dt}(t_{free \rightarrow contact} - 0) \end{aligned} \quad , \quad (20)$$

Далее приведены полученные результаты численного анализа модели.

На рисунке 2 представлены осциллограммы положений излучателя и грунта при различных модулях упругости E в различных масштабах.



a) $E=1 \cdot 10^{10}$ Па



б) $E=3 \cdot 10^{10}$ Па

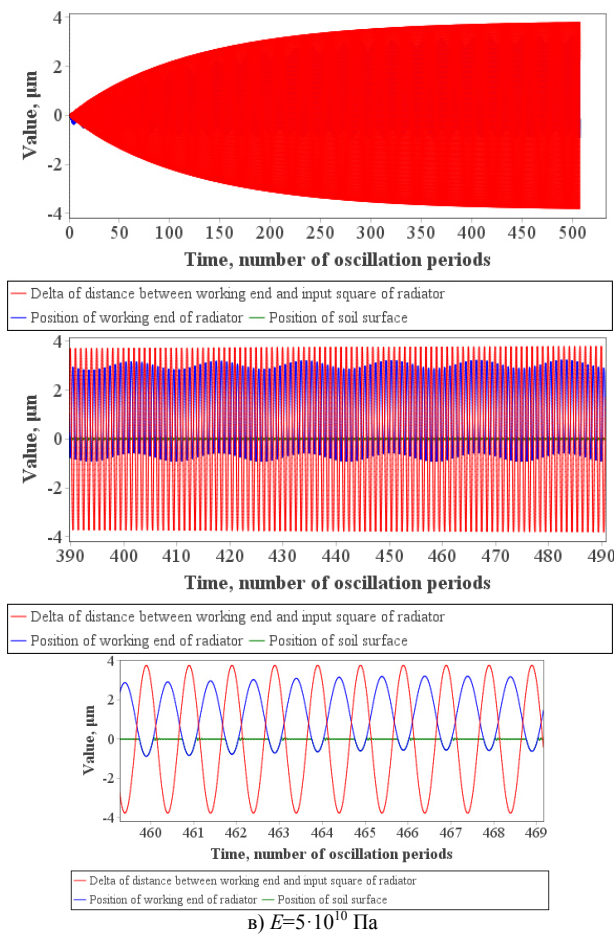


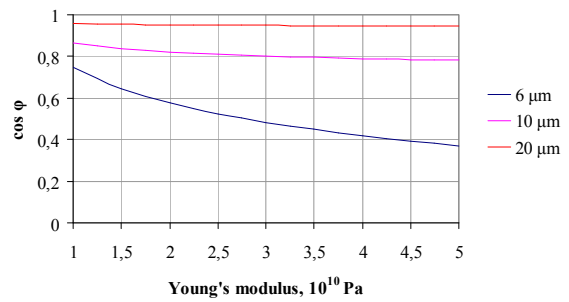
Рис. 2. Осциллограммы колебаний положений излучателя и грунта при различных модулях упругости (плотность грунта – 1000 кг·м⁻³; размах колебаний излучателя – 10 мкм; частота колебаний – 22 кГц; усилие прижима – 5 Н)

Далее проведены исследования влияния свойств грунта на механический импеданс ультразвукового излучателя, который определяется согласно выражению:

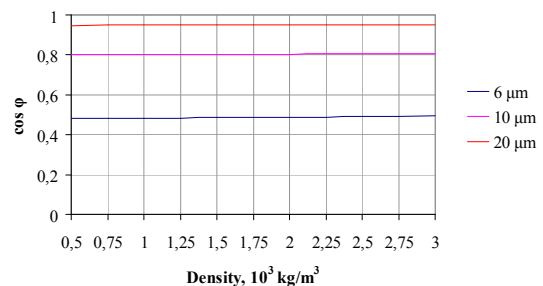
$$Z = \frac{iF_A}{\frac{2}{T_\Omega} \int_0^{T_\Omega} dy e^{i\alpha t} dt}$$

Расчёты показали, что основной параметр, который меняется при изменении свойств грунта – это фазовый сдвиг между усилием и скоростью смещения рабочего окончания излучателя относительно входного торца.

На рисунках 3а, б представлены зависимости косинуса угла сдвига фаз между силой, обусловленной обратным пьезоэффектом, и скоростью смещения рабочего окончания излучателя относительно входного торца от свойств грунта при различных амплитудах колебаний.



а) обобщённая схема реализации воздействия излучателя на грунт



б) от плотности грунта

Рис. 3. Зависимости косинуса угла сдвига фаз между силой, обусловленной обратным пьезоэффектом, и скоростью смещения рабочего окончания излучателя относительно входного торца от свойств грунта

Представленные зависимости свидетельствуют, что существенное влияние на косинус угла сдвига фаз между силой и скоростью смещения оказывает модуль упругости грунта. При этом для детектирования модуля упругости и, следовательно, типа грунта необходимо использовать как можно меньшую амплитуду колебаний. При высоких амплитудах колебаний, ниже пороговой, при которой происходит разрушение, влияние свойств грунта уменьшается из-за увеличенной длительности периода отсутствия контакта между излучателем и грунтом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная и разработанная модель, описывающая взаимодействие ультразвукового излучателя с упругим грунтом, может быть использована для исследования влияния свойств грунта на параметры основных гармоник.

Анализ модели позволяет устанавливать взаимосвязь свойств грунта с механическим импедансом излучателя ультразвуковых колебаний.

Выявленная взаимосвязь показывает, что наиболее целесообразно контролировать косинус угла сдвига фаз между усилием и скоростью смещения рабочего окончания излучателя относительно входного торца (при размахе колебаний 6 мкм косинус угла сдвига

фаз уменьшается почти в 2 раза при увеличении модуля упругости с $1 \cdot 10^{10}$ до $5 \cdot 10^{10}$ Па).

Проведенные теоретические исследования позволяют обосновать возможность реализации способа определения типа и свойств грунта на основе измерения механического импеданса ультразвукового излучателя, измеряемого косвенно по току механической ветви ультразвуковой колебательной системы).

Предлагаемый способ контроля пригоден для внедрения в программное обеспечение электронных генераторов ультразвуковых бурильных устройств.

ACKNOWLEDGMENTS

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 21-52-53036 «Физические механизмы и закономерности ультразвукового бурения неизвестного до посадки грунта космических объектов в экстремальных условиях» ГФЕН_а.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Yu. I. Matveev and V. I. Kostenko, *Acoustical Physics* 62(5), 633–641 (2016).
2. H. Li and Y. Shen and Q. Wang and Y. Wang and D. Bai and Z. Deng, *Shock and Vibration* 12 (2018).
3. V.N. Khmelev and D.V. Genne and S.S. Khmelev and R.V. Barsukov and V.I. Kostenko, *South Siberian Scientific Bulletin* 4(2), 36–40 (2013).
4. V.N. Khmelev and R.V. Barsukov and D.V. Genne and A.V. Shalunov and D.S. Abramenko and E.V. Ilchenko, "Practical Investigations of the Method of Indirect Parameter Checkout of the Acoustic," *International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2011: Conference Proceedings* (NSTU, Novosibirsk, Russia, 2011), pp. 241–244.
5. P.P. Sabodash and A.I. Golyshev and M.M. Tatarin, *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings* 6, 37–40 (2015).

Хмелев Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, Заслуженный изобретатель Российской Федерации, заместитель директора по научной работе Бийского технологического института Бийского технологического

института (филиала) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», тел.: +73854432581, Электронная почта: vnh@bti.secna.ru

Гольх Роман Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Методы и средства измерений и автоматизации» Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», тел.: +79231629327, Электронная почта: grn@bti.secna.ru

Quan QiQuan – Ph. D., associate professor of Harbin Institute of Technology, E-mail: quanqiQuan@hit.edu.cn

Барсуков Роман Владиславович – кандидат технических наук, доцент Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», тел.: +73854432570, Электронная почта: rotan@bti.secna.ru

Минаков Вячеслав Дмитриевич – студент группы МИСТ-11 Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», тел.: +79833555916, Электронная почта: sla-va2926@mail.ru

Генне Дмитрий Владимирович – ведущий инженер Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», тел.: +73854432570, Электронная почта: gdv@bti.secna.ru

Абраменко Денис Сергеевич – кандидат технических наук, доцент Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», тел.: +73854432570, Электронная почта: ades@bti.secna.ru

Нестеров Виктор Александрович – кандидат технических наук, доцент Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», тел.: +73854432570, Электронная почта: nva@bti.secna.ru

Хмелёв Максим Владимирович – директор ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ», тел.: +73854432570, Электронная почта: maxx@u-sonic.ru

THEORETICAL DEVELOPMENT OF THE METHOD FOR ULTRASONIC CONTROLLING THE PROPERTIES OF SOLID EXTRATERRESTRIAL SOILS

V.N. Khmelev¹, R.N. Golykh¹, Qiquan Quan², R.V. Barsukov¹, V.D. Minakov¹, D.V. Genne¹,
D.S. Abramenko¹, V.A. Nesterov¹, M.V. Khmelev³

¹ Biysk Technological Institute (branch) of Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Biysk, Russian Federation

² Harbin Institute of Technology, Harbin, China

³ Center of ultrasonic technologies, Biysk, Russian Federation

To date, there are several ways to determine the properties of the soil, but such methods are not suitable for studying the soil of an extraterrestrial object. However, there is a direction of ultrasonic drilling in order to study the properties of the soils of extraterrestrial objects, to detect valuable substances in the deep layers or to ensure the maximum speed of the channels to a given depth to secure the landing modules. The optimal implementation of ultrasonic drilling requires continuous acquisition of information about the process of impact on the soil with unknown properties. With the help of all the information obtained, it is possible to ensure an increase in the effectiveness of the ultrasonic exposure process. However, to date, the determination of the properties of the medium during the action of ultrasound is implemented only for liquids. The article proposes and develops a model of interaction of an ultrasonic piezoelectric emitter with the ground, taking into account the impact-contact nature of the impact. The analysis of the model allowed us to establish the relationship of the mechanical impedance of the soil with its properties. The revealed relationship can be used to determine the properties of previously unknown soil in real time during ultrasonic drilling to create drilling devices that guarantee optimal impact on a wide class of soils.

Index terms: ultrasonic, drilling, experiment

REFERENCES

1. Yu. I. Matveev and V. I. Kostenko, *Acoustical Physics* 62(5), 633–641 (2016).
2. H. Li and Y. Shen and Q. Wang and Y. Wang and D. Bai and Z. Deng, *Shock and Vibration* 12 (2018).
3. V.N. Khmelev and D.V. Genne and S.S. Khmelev and R.V. Barsukov and V.I. Kostenko, *South Siberian Scientific Bulletin* 4(2), 36–40 (2013).
4. V.N. Khmelev and R.V. Barsukov and D.V. Genne and A.V. Shalunov and D.S. Abramenko and E.V. Ilchenko, “Practical Investigations of the Method of Indirect Parameter Checkout of the Acoustic,” *International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2011: Conference Proceedings (NSTU, Novosibirsk, Russia, 2011)*, pp. 241–244.
5. P.P. Sabodash and A.I. Golyshev and M.M. Tatarkin, *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings* 6, 37–40 (2015).

Khmelev Vladimir Nikolaevich – doctor of technical sciences, professor, Honored Inventor of the Russian Federation, Deputy Director for scientific work of BTI AltSTU, phone: +7 (3854) 43-25-81, E-mail: vnh@bti.secna.ru

Golykh Roman Nikolaevich – doctor of technical sciences, professor of the chair of methods and means of measurement and automation of BTI AltSTU, phone: +79231629327, E-mail: grn@bti.secna.ru

Quan Qiquan – Ph. D., associate professor, Harbin Institute of Technology, E-mail: quanqiquan@hit.edu.cn

Barsukov Roman Vladislavovich – Ph. D., associate professor of BTI AltSTU, phone +73854432570, E-mail: roman@bti.secna.ru

Minakov Vyacheslav Dmitrievich – student of mIST-11 group of BTI AltSTU, phone: +79833555916, E-mail: slava2926@mail.ru

Genne Dmitry Vladimirovich – leading engineer of BTI AltSTU, phone +73854432570, E-mail: gdv@bti.secna.ru

Abramenko Denis Sergeevich – Ph. D., associate professor BTI AltSTU, phone +73854432570, E-mail: ades@bti.secna.ru

Nesterov Viktor Alexandrovich – Ph. D., associate professor BTI AltSTU, phone +73854432570, E-mail: nva@bti.secna.ru

Khmelev Maxim Vladimirovich – director of Center of ultrasonic technologies of AltSTU, Ltd., phone +73854432570, E-mail: maxx@u-sonic.ru