

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО БУРА В СОСТАВЕ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРУНТА НА НЕБЕСНЫХ ТЕЛАХ

С.Г. Некрасов<sup>1</sup>, [nekrasovsg@susu.ru](mailto:nekrasovsg@susu.ru)  
С.В. Перминов<sup>2</sup>, [info@medpribor.net](mailto:info@medpribor.net)  
Е.В. Гусев<sup>1</sup>, [gusevev@susu.ru](mailto:gusevev@susu.ru)  
В.Л. Кодкин<sup>1</sup>, [kodkinvl@susu.ru](mailto:kodkinvl@susu.ru)  
А.И. Телегин<sup>3</sup>, [teleginai@susu.ru](mailto:teleginai@susu.ru)

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

<sup>2</sup> АО «Медприбор», Челябинск, Россия

<sup>3</sup> Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе, Миасс, Россия

**Аннотация.** В статье рассматриваются теоретические вопросы разработки ультразвукового бура для проведения бурения грунта на небесных телах в составе роботизированной платформы и формулируются задачи ее управления. Специфика применения бура предполагает широкий диапазон температур при эксплуатации, малое потребление энергии, эффективный рабочий цикл и требование обеспечения сохранности структуры и состава грунта при воздействии на него инструмента. Одним из перспективных направлений разработки являются устройства с вибрационной развязкой от грунта по ультразвуку за счет трансформации ультразвуковых колебаний в повторяющиеся удары звуковой частоты с помощью специально введенного «свободного» тела между ультразвуковой и ударной частью бура (бит). Это позволяет проводить непрерывное бурение независимо от состояния ударного бита, включая его заклинивание. **Цель работы** состоит в выборе наиболее эффективной конструкции бура и составлении математической модели, обеспечивающей проведение имитационного моделирования. **Материалы и методы.** Рассмотрены технические решения как отечественных, так и зарубежных авторов, выбран прототип. Проанализированы теоретические работы и обнаружено, что изложенные в них материалы не содержат развернутых математических моделей, необходимых для имитационного моделирования на стадии проектирования и оптимизации конструкции. В теоретической части статьи предлагаются математические модели, полученные на основе эквивалентных параметров, найденных из распределенного описания элементов конструкции бура. Используются методы математической физики, классической механики и теории подобия. **Результаты заключаются** в том, что разработаны две альтернативные математические модели. Одна из моделей имеет непрерывное описание с существенно нелинейной жесткостью «стенки» при ударе, при этом ударное движение рассматривается как разновидность автоколебаний. Вторая модель основана на теории удара. **Заключение.** Проведено параметрическое исследование и получены зависимости частоты колебаний свободного тела от величины ударного зазора, массы тела и амплитуды колебаний концентратора и др. Рассмотренные модели могут быть использованы для имитационного моделирования при разработке конструкции бура. Сформулированы задачи управления роботизированной буровой платформой с позиции обеспечения работоспособности бура при бурении различных грунтов.

**Ключевые слова:** грунт, ультразвук, удар, бурение, пьезоэлектрический привод, трансформация колебаний, уравнения движения, автоколебания, имитационная модель, программный комплекс

**Для цитирования:** Моделирование ударного воздействия ультразвукового бура в составе роботизированной платформы для исследования грунта на небесных телах / С.Г. Некрасов, С.В. Перминов, Е.В. Гусев и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2024. Т. 24, № 3. С. 40–53. DOI: 10.14529/ctcr240304

## SIMULATION OF THE IMPACT OF AN ULTRASONIC DRILL AS A COMPOSITION OF A ROBOTIC PLATFORM FOR INVESTIGATION OF SOIL ON CELESTIAL BODIES

S.G. Nekrasov<sup>1</sup>, nekrasovsg@susu.ru

S.V. Perminov<sup>2</sup>, info@medpribor.net

E.V. Gusev<sup>1</sup>, gusevev@susu.ru

V.L. Kodkin<sup>1</sup>, kodkinvl@susu.ru

A.I. Telegin<sup>3</sup>, teleginai@susu.ru

<sup>1</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

<sup>2</sup> Medpribor, JSC, Chelyabinsk, Russia

<sup>3</sup> South Ural State University, Miass, Russia

**Abstract.** The article discusses the theoretical issues of developing an ultrasonic drill for drilling soil on celestial bodies as part of a robotic platform and formulates the tasks of its control. The specifics of using the drill require a wide temperature range during operation, low energy consumption, an efficient operating cycle and the requirement to ensure the preservation of the structure and composition of the soil when exposed to the tool. One of the promising areas of development is devices with vibration decoupling from the ground by ultrasound due to the transformation of ultrasonic vibrations into repeated impacts of sound frequency using a specially introduced “free” body between the ultrasonic and impact parts of the drill (bit). This allows continuous drilling regardless of the condition of the impact bit, including jamming. **The purpose of the work** is to select the most effective drill design and compile a mathematical model that provides simulation modeling. **Materials and methods.** Technical solutions of both domestic and foreign authors were considered, and a prototype was selected. Theoretical works were analyzed and it was found that the materials presented in them do not contain detailed mathematical models necessary for simulation modeling at the stage of design and optimization of the structure. In the theoretical part of the article, mathematical models are proposed, obtained on the basis of equivalent parameters found from a distributed description of the drill design elements. Methods of mathematical physics, classical mechanics and similarity theory were used. **The results are** that two alternative mathematical models are developed. One of the models has a continuous description with a significantly nonlinear rigidity of the “wall” upon impact, while the impact motion is considered as a type of self-oscillation. The second model is based on the theory of impact. **Conclusion.** A parametric study was carried out and the dependences of the oscillation frequency of a free body on the size of the impact gap, body mass and amplitude of oscillations of the concentrator, etc. were obtained. The considered models can be used for simulation modeling when developing a drill design. The tasks of controlling a robotic drilling platform are formulated from the position of ensuring the operability of the drill when drilling various soils.

**Keywords:** soil, ultrasound, impact, drilling, piezoelectric drive, vibration transformation, equations of motion, self-oscillations, simulation model, software package

**For citation:** Nekrasov S.G., Perminov S.V., Gusev E.V., Kodkin V.L., Telegin A.I. Simulation of the impact of an ultrasonic drill as a composition of a robotic platform for investigation of soil on celestial bodies. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2024;24(3):40–53. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr240304

### Введение

Отбор проб грунта, анализ на месте и, возможно, возвращение образцов на землю становятся все более важными в миссиях по исследованию планет, комет и других космических тел. Существующие способы бурения, пригодные для использования на небесных телах, обычно требуют значительных продольных усилий на бурильный инструмент, имеют сравнительно большое потребление мощности и не всегда эффективный рабочий цикл. Глубина бурения зависит от конструкции бура и может достигать 20 и более метров. Критическими являются требования к суточному перепаду температур (от  $-270$  до  $+500$  °C), что требует использования в устройствах специально разработанных материалов.

Устройство бура должно обеспечивать длительный период автономной работы с использованием солнечных батарей при разных видах грунта, причем грунт может быть представлен различным составом от гранита и базальта до льда в различных фазовых состояниях. Известные грунтозаборные устройства пробивного действия [1] – пенетраторы – можно использовать только один раз при их ускоренном падении на поверхность планеты, и, следовательно, они не пригодны для непрерывного исследования грунта.

Одним из вариантов обеспечения этих требований является использование ультразвуковых преобразователей с частичной или полной трансформацией вибрации в удары [2–7]. Эти устройства имеют вибрационную развязку от грунта по ультразвуку за счет трансформации ультразвуковых колебаний в повторяющиеся удары звуковой частоты с помощью специально введенного «свободного» тела между ультразвуковой и ударной частью бура (бит). Это позволяет проводить непрерывное бурение независимо от состояния ударного бита, включая даже его заклинивание. При надлежащем выборе материалов и конструкции КПД таких устройств может достигать 90 % и более в вышеуказанных диапазонах внешних условий.

Анализ литературных источников показывает, что за рубежом и в России имеются исследования [8–15], в которых приводятся результаты расчетов таких преобразователей с использованием различных программных комплексов, но, к сожалению, не приводятся математические модели, необходимые для имитационного моделирования на стадиях проектирования. Данная работа призвана частично устранить этот недостаток.

### 1. Анализ некоторых конструкторских решений

Вариант осуществления устройства, в котором частично устранены вышеуказанные недостатки, представлен в патенте от 2005 года [3]. Устройство реализует ультразвуковой (УЗ) принцип работы, который модифицирован ударом специального бита, взаимодействующего с введенным в конструкцию «свободным» телом, размещенным в «пучности» УЗ-колебаний буровой головки в конце волновода [3].

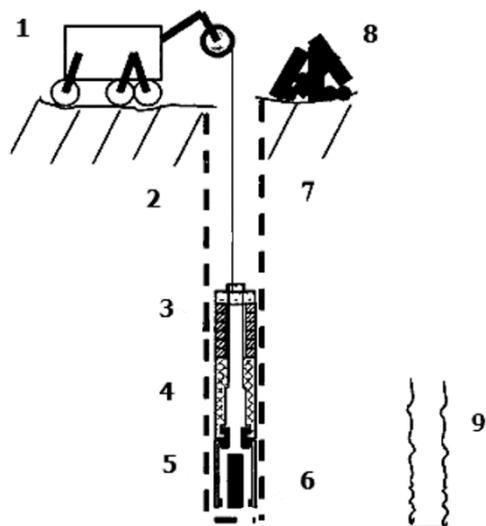


Рис. 1. Буровая установка  
Fig. 1. Drilling rig

Для обеспечения большой глубины бурения использован принцип циклической работы грызуна в норке, когда он извлекает осыпавшийся грунт, разрывает и удерживает его и, наконец, извлекает и переворачивает этот «кern» на поверхности. Аналогично действует и устройство, которое состоит из силового привода и буровой головки. Блок питания расположен в стационарной части силового привода 1 (рис. 1) на поверхности 7 и генерирует колебания обычно частотой 5–25 кГц для активации механизма. Напряжение УЗ-частоты подается на пьезопривод посредством кабеля 2, который служит также для транспортировки грунта на поверхность. Заявляется, что какой-либо существенной продольной статической нагрузки (пригруза) здесь не требуется, однако при наличии некоторых видов сыпучих грунтов, например, слежавшегося песка, без пригруза не обойтись, о чем говорит отрицательный опыт эксплуатации марсохода InSight [16].

Буровая головка (см. рис. 1) состоит из пьезопривода, свободной массы и бурового бита. Привод состоит из пьезокерамического источника УЗ-вибрации 3 и волновода-концентратора рупорной конфигурации 4, который усиливает амплитуду вибрации в сторону бурового бита. Полость внутри волнового рупора обеспечивает также пространство для размещения датчиков, необходимых для автоматизации буровой платформы.

Ультразвуковой привод приводит в действие встроенное свободное тело (элемент 105 на рис. 2), и оно тем самым забивает бит, причем свободное тело работает как развязывающий по ультразвуку трансформатор, понижающий частоту УЗ-вибрации до звуковой частоты ударного действия.

Волновод-рупор приводится в действие на его резонансной частоте, а свободное тело отскакивает назад и вперед между ультразвуковым рупором и буровым битом в частотном диапазоне

от десятка до 1000 Гц [3]. Рупорная форма ударной части буровой головки защищает центральную часть керна от механического воздействия и сохраняет тем самым структуру и состав грунта.

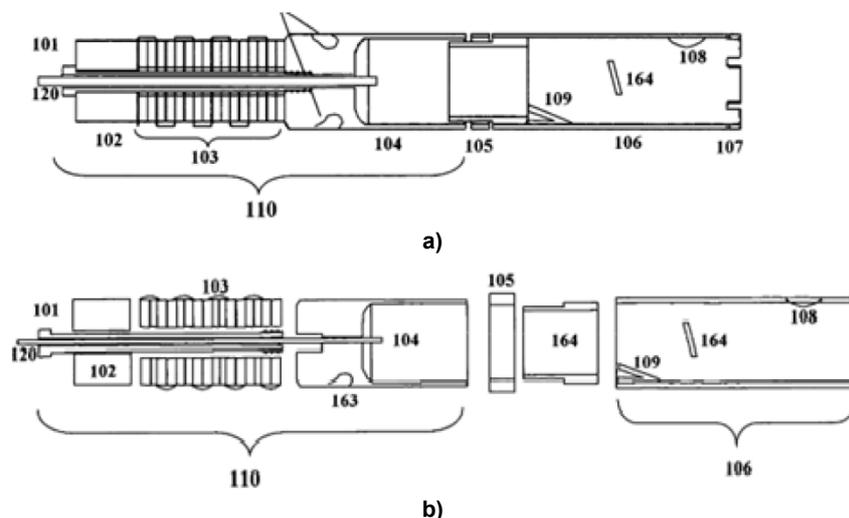


Рис. 2. Сборочный (а) и детализировочный (б) чертеж устройства в соответствии с описанием патента US 6968910 B2  
Fig. 2. Assembly (a) and detail (b) drawing of the device in accordance with the description of the patent US 6968910 B2

Предложенное устройство способно выполнять глубокое бурение с низким предварительным натягом (пригруз) и малой мощностью, а также обладает высокой устойчивостью к перекоосу. Авторами патента было продемонстрировано, что устройство работает с различных роботизированных платформ, с помощью которых можно бурить такие твердые породы, как гранит и базальт, а также мягкие, как песчаник и туф.

Устройство обладает высокой устойчивостью к изменениям условий эксплуатации, поскольку оно приводится в действие пьезоэлектрической керамикой, которая может быть синтезирована для работы в широком диапазоне температур, включая те, которые существуют на Марсе и Венере. Подобное устройство бура было включено в состав марсохода Curiosity, который до недавнего времени успешно работал на Марсе.

Отсюда следует **первая (естественная) задача управления**: управление рабочим циклом буровой платформы.

Далее последовал ряд изобретений [4–7], например, патент US 7156189 B1 [4]. В России аналогичной проблемой занималось ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ». Например, в патенте [7] описывается конструкция бура для забора образцов грунта без изменения его состава. Наиболее близким по технической сущности предлагаемому устройству является рассмотренное выше ультразвуковое грунтозаборное устройство по патенту [3], принятое авторами за прототип.

В устройство (рис. 3) включено свободное тело 5, прижимаемое пружиной 6 к тор-

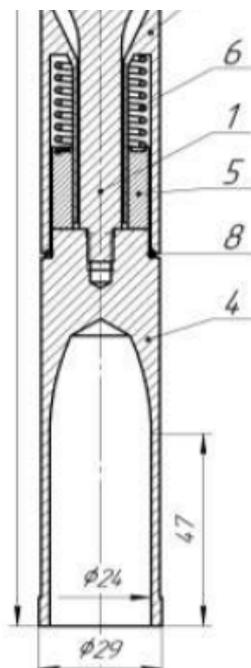


Рис. 3. Ультразвуковой концентратор рупорного типа с ударом по патенту RU 2503815: 1, 4 – составной ультразвуковой преобразователь-концентратор; 5 – свободное тело; 6 – пружина; 8 – виброуплотнение  
Fig. 3. Horn-type ultrasonic concentrator with impact according to patent RU 2503815: 1, 4 – composite ultrasonic transducer-concentrator; 5 – free body; 6 – spring; 8 – vibration seal

цевой поверхности бурового инструмента 4. Испытания по предлагаемому патенту, по заявлению авторов, показали невысокую эффективность его работы [15].

Заявлено также, что осуществляется контроль скорости бурения, температуры пьезопривода и подстройка частоты генератора на резонансную частоту волновода, согласование выходного импеданса генератора с нагрузкой и другое. Не очень понятно, для чего нужно согласовывать рупорный преобразователь с нагрузкой, когда лучше рассогласовать его для обеспечения максимальных амплитуд движения бита в узкой полосе грунта и тем самым обеспечить сохранность добываемых образцов. Кроме того, для повышения эффективности конструкция ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ» должна обеспечивать развязку устройства с грунтом по ультразвуку, как это сделано, например, в патенте [4].

Во всех рассмотренных устройствах не учитываются резонансные свойства грунта, которые определяются размерами его частиц. Известно, например, что при устройстве дорог [17] с помощью виброплит используют частоты примерно 30 Гц, что возбуждает резонансные колебания частиц грунта диаметром около 40 мм, при этом окружающие их мелкие и крупные частицы мало перемещаются. Исправить ситуацию позволяет удар, который реализуется при воздействии виброплиты о грунт в сочетании со статическим пригрузом. Практикуется также использование кратных частот (60 и 90 Гц), что обеспечивает подвижность частиц размером уже 10–20 мм. Отсутствие учета этого параметра при бурении на Марсе могло привести к неудаче марсохода InSight [16]. Однако надо учитывать, что монолитный грунт (базальт, гранит, лед) имеет высокие собственные частоты, поэтому основным бурильным фактором будет оставаться удар, обладающий широкой спектральной характеристикой.

**Вторая задача управления** роботизированной системы: управление частотой ударов свободного тела до достижения резонанса доминирующих частиц исследуемого грунта. В результате возникает добавочная подвижность частиц и ускоренное проникновение бура в грунт (песчаный, гравийно-песчаный и подобные), скорость которого должна регистрироваться датчиком, на основе показаний которого и строится данный вид управления посредством влияющих величин.

## 2. Модель на основе эквивалентных параметров

Отметим, что эквивалентные параметры использовались в работе [8], однако выбор эквивалентных параметров и математическая модель не приводится.

Эквивалентные параметры этой модели могут быть получены из условия равенства полной энергии эквивалентной и реальной системы. Например, для определения эквивалентной массы концентратора, приведенной к его выходной грани, можно использовать условие равенства максимальной кинетической энергии эквивалентного и реального концентраторов в месте приведения на выбранной частоте. Необходимо численно или экспериментально найти частоту и форму собственных колебаний, что дает возможность интегрированием найти кинетическую энергию для выбранной формы колебаний:

$$W_{\max} = 0,5\rho\pi\Omega_k^2 \int_0^L y_n(x)_k^2 R(x)^2 dx, \quad (1)$$

где  $y_n(x)$  – распределение нормированных амплитуд с выбранной формой и частотой  $\Omega_k$  колебаний;  $R(x)$  – профиль концентратора;  $x$  – продольная координата;  $L$  – учитываемая длина концентратора. Условие равенства кинетических энергий позволяет найти эквивалентную массу концентратора  $M_k$  для  $k$ -й формы колебаний:

$$M_k = 2W_{\max} / \left[ \Omega_k^2 y_n(L)_k^2 \right]. \quad (2)$$

Эквивалентный коэффициент демпфирования  $\alpha = R_k / (2M_k\Omega_k^2)$  можно найти только экспериментально, например, методом квадрантных частот [18].

Отдельным вопросом стоит определение характера взаимодействия тел при ударе. К настоящему времени можно считать, что это взаимодействие достаточно изучено и большой вклад внесли работы Герца, Сен-Венана, Бусинеска, Гюгонио, Себерта и др. [19]. Принято полагать, что в месте удара действует контактная и волновая жесткость и реализуется два вида деформации сжатия – это упругие деформации со скоростью удара и «звуковые» деформации со скоростью звука («классический и волновой» подход) [20]. В классическом подходе вводится коэффициент вос-

становления как коэффициент потери импульса при ударе, который определяется обычно экспериментально, а в волновой теории существуют только волновые процессы и их комбинация.

На рис. 4 представлены графики зависимостей перемещений, полученные нами в вычислительной среде Simulation SW, характерных узлов вдоль продольной оси экспоненциального концентратора от времени (аналогичная картина и у рупорного концентратора с экспоненциальным профилем) при ударе по рабочему концу концентратора. Интересующий нас узел номер 13250 (кривая 5) находится в пучности колебаний на рабочем конце концентратора с наименьшим диаметром, в который наносится удар телом массой 2 г, и далее эта масса в расчетах продолжает находиться в составе концентратора. При ударе тело движется вместе с рабочим концом концентратора, вызывая его деформацию, с начальной скоростью, равной скорости тела в момент удара. Численное решение волнового уравнения дает нам траекторию движения этого тела по кривой 5 до точки 1, когда скорость перемещения уменьшается до нуля, при этом тело в интервале между точками 1 и 2 сохраняет набранную скорость, отрывается и движется далее по инерции до следующего удара уже с битом. Время от удара до отрыва свободного тела составляет величину  $\sim 10^{-5}$  с (см. рис. 4), а средний период соударений величину  $\sim 10^{-2}$  с [8], и можно считать, что время удара мало и им можно пренебречь (как и действием медленных и статических сил).

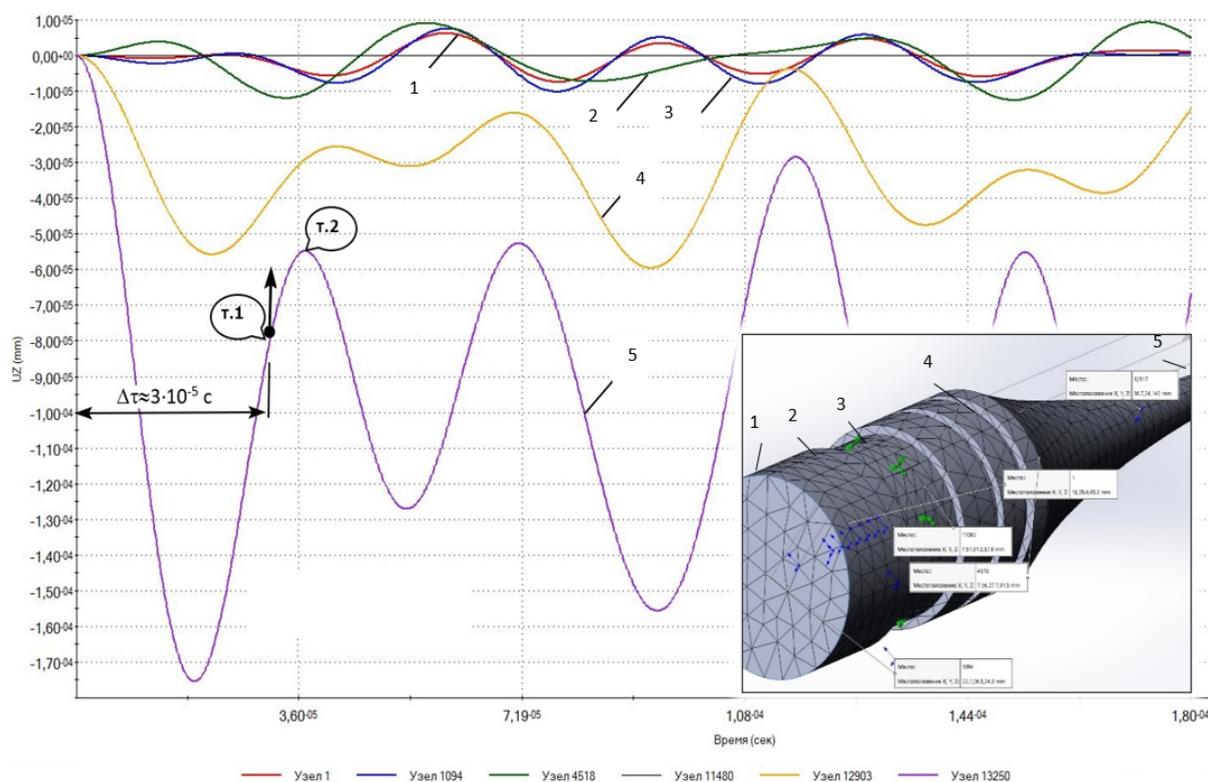


Рис. 4. Траектории движения различных узлов конечно-элементной сетки: 1 – пассивный конец УЗ-преобразователя (узел 1); 2, 3, 4 – промежуточные узлы; 5 – активный конец УЗ-преобразователя (узел 13250)

Fig. 4. Motion trajectories of various nodes of a finite element mesh: 1 – passive end of the ultrasonic transducer (node 1); 2, 3, 4 – intermediate nodes; 5 – active end of the ultrasonic transducer (node 13250)

Учитывая большое отличие времени контакта при ударе и среднего периода повторения ударов, можно определить **третью задачу управления**: минимизировать энергопотребление за счет выключения питания на ультразвуковой преобразователь сразу после удара/ударов о рабочую поверхность преобразователя и предварительного включения его не более чем за четверть периода движения свободного тела.

### 3. Две модели работы бура в квазиустановившемся режиме работы

Модифицируем теперь схему взаимодействия элементов конструкции по патенту RU 2503815 для повышения ее эффективности: параллельное соединение ультразвуковой и ударной части бура преобразуем в их последовательное соединение, как показано на рис. 5.

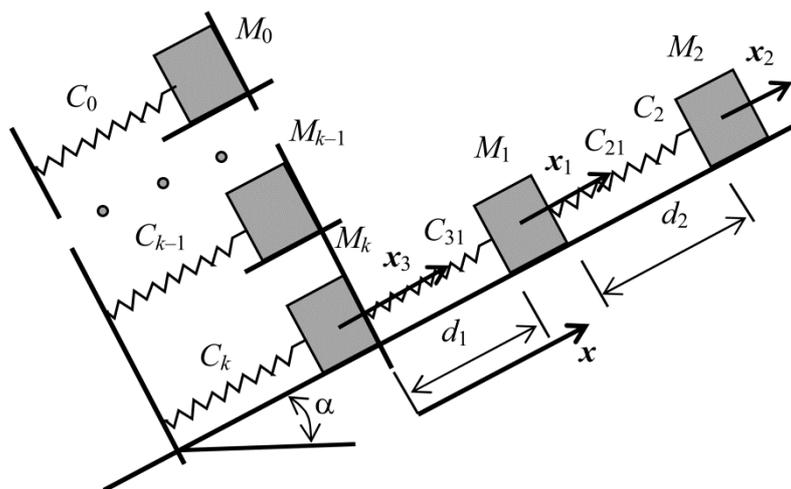


Рис. 5. Эквивалентная модель бура с последовательным соединением элементов  
Fig. 5. Equivalent model of a drill with a series connection of elements

На рис. 5 изображена модель последовательного взаимодействия эквивалентных тел модели  $M_1$ ,  $M_2$  и  $M_k$  (трехмассовая модель), пружины жесткостью  $C_2$ , расположенных на наклонной шероховатой плоскости под углом  $\alpha$  к горизонту. На рис. 5 также отражены модельные жесткости  $C_{21}$  и  $C_{31}$ , необходимые для реализации непрерывной модели устройства (не путать с жесткостью пружины  $C_2$ ). Из места, расположенного на расстоянии  $d_1$ , под действием веса и пружины начинает соскальзывать тело  $M_1$  и затем сталкивается с телом распределенной массы (концентратор), вибрирующим на некоторой резонансной частоте  $f_k$  с парциальной массой  $M_k$  и жесткостью  $C_k$ .

При ударе с достаточно широкополосной спектральной характеристикой могут одновременно возбуждаться колебания на собственных частотах  $\Omega_k$  и других, а статическая масса концентратора  $M_0$  удерживается пружиной с жесткостью  $C_0$ , являющейся элементом виброразвязки концентратора с корпусом. С другой стороны концентратора тело  $M_1$  взаимодействует с битом  $M_2$  посредством пружины  $C_2$  (или без нее), при этом бит поступательно перемещается в грунт при ударах тела массы  $M_1$ .

Особенность задачи заключается в том, что реальные свойства грунта неизвестны, поэтому в инженерной практике в этом случае рассматривают два крайних режима работы – режимы холостого хода и короткого замыкания, при этом реальная нагрузка на бур в этом случае меняется от нуля (вакуум или газ) до бесконечности (полное заклинивание). К счастью, разработчик должен стремиться реализовать именно режим короткого замыкания или близкий к нему, что означает фактическое рассогласование бура с нагрузкой за счет уменьшения площади контакта с грунтом и тем самым минимальное потребление им энергии, при этом происходит бережное воздействие бита на грунт во время работы, что и обеспечивает сохранность проб грунта. Итак, будем рассматривать уравнения движения тел модели в режиме короткого замыкания.

### 3.1. Непрерывная модель

Рассмотрим движение такой системы тел в установившемся режиме. Ниже представлена первая разработанная модель, которая представлена непрерывной системой уравнений динамики трехмассовой системы тел (см. рис. 5), в которой удар определяется с помощью введения в уравнения нелинейной жесткости, величина которой резко возрастает при контакте тел, когда  $x_1 + d_1 + x_3 \rightarrow 0$  (с учетом принятого положительного направления перемещений) или  $x_1 - d_2 + x_2 \rightarrow 0$ . Нелинейные жесткости  $C_{21} = C_2 + b_2 / (x_1 + x_2 - d_2)_2^n$  и  $C_{31} = b_1 / (x_1 + d_1 + x_3)_1^n$  стремятся к бесконечности при контакте с телом  $M_1$ , что и является эквивалентом контактной жесткости упругих тел при ударе. Здесь принято, что  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  – перемещения тел  $M_1$ ,  $M_2$  и  $M_k$ , определяемые относительно их положения равновесия  $\underline{x}_1 = d_1$ ,  $\underline{x}_2 = d_1 + d_2$  и  $\underline{x}_3 = 0$ , а степени знаменателей  $n_2$  и  $n_1$  являются параметрами аппроксимации модели.

$$\begin{aligned} M_1 \ddot{x}_1 + [C_2 + b_2 / (x_1 + x_2 + d_2)^{n_2}] (x_1 - x_2) + [b_1 / (x_1 + d_1 + x_3)^{n_1}] (x_1 - x_3) &= 0; \\ M_2 \ddot{x}_2 - [C_2 + (b_2 / (x_1 + x_2 + d_2)^{n_2})] (x_1 - x_2) &= 0; \\ M_k \ddot{x}_3 + R_k \dot{x}_3 + C_k x_3 - [b_1 / (x_3 + x_1 + d_1)^{n_1}] (x_1 - x_3) &= F_m \cos \omega t \end{aligned} \quad (3)$$

с начальными условиями

$$\begin{aligned} x_1(0) = -d_1, x_2(0) = d_1 + d_2, x_3(0) = 0; \\ \dot{x}_1(0) = 0, \dot{x}_2(0) = 0, \dot{x}_3(0) = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Введем в рассмотрение следующие безразмерные параметры:

$$\begin{aligned} \Omega_0 = \sqrt{C_k / M_k}, \tau = \Omega_0 t, \eta = \omega / \Omega_0, h_0 = F_m / M_k \Omega_0^2; \\ w_1 = x_1 / h_0, w_2 = x_2 / h_0, w_3 = x_3 / h_0. \end{aligned} \quad (5)$$

С использованием этих параметров система уравнений (3) примет безразмерный вид:

$$\begin{aligned} \ddot{w}_1 + \frac{\Omega_1^2}{\Omega_0^2} (w_1 - w_2) + \left( \frac{b_2 h_0^{1-n_2}}{e_1 F_0} \right) \left( \frac{w_1 - w_2}{(w_2 + w_1 + d_2 / h_0)^{n_2}} \right) + \left( \frac{b_1 h_0^{1-n_1}}{e_1 F_0} \right) \left( \frac{w_1 - w_3}{(w_3 + w_1 + d_1 / h_0)^{n_1}} \right) &= 0; \\ \ddot{w}_2 - \frac{\Omega_2^2}{\Omega_0^2} (w_1 - w_2) - \left( \frac{b_2 h_0^{1-n_2}}{e_2 F_0} \right) \left( \frac{w_1 - w_2}{(w_2 + w_1 + d_2 / h_0)^{n_2}} \right) &= 0; \\ \ddot{w}_3 + 2\alpha \dot{w}_3 + w_3 - \left( \frac{b_1 h_0^{1-n_1}}{F_0} \right) \left( \frac{w_1 - w_3}{(w_3 + w_1 + d_1 / h_0)^{n_1}} \right) &= \frac{F_m}{F_0} \cos \eta \tau, \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$F_0 = M_k h_0 \Omega_0^2; \alpha = \frac{R_k}{2M_k \Omega_0}; \Omega_1 = \sqrt{\frac{C_2}{M_1}}; \Omega_2 = \sqrt{\frac{C_2}{M_2}}; e_2 = \frac{M_k}{M_2}; e_1 = \frac{M_k}{M_1}. \quad (7)$$

Коэффициенты модельных жесткостей  $b_1$  и  $b_2$  должны учитывать характер нелинейности и иметь соответствующую размерность. В уравнениях также пренебрегаем трением при вертикальном бурении (невесомость) тела  $M_1$  в установившемся режиме, так как, во-первых, его стараются избежать конструктивным путем, выбирая сравнительно большие боковые зазоры, и, во-вторых, остаточное трение обычно самоустраняется после приработки ударного механизма, а если после этого трение вновь появляется, то это свидетельствует об аварийной работе.

### 3.2. Дискретная модель

Вторая модель является, по сути, дискретной и основана на известных результатах теории удара [19, 20], при этом уравнения движения тел в интервале времени между ударами имеют вид:

$$\begin{aligned} M_1 \ddot{x}_1 + C_2 (x_1 - x_2) &= 0; \\ M_2 \ddot{x}_2 - C_2 (x_1 - x_2) &= 0; \\ M_k \ddot{x}_3 + k_k \dot{x}_3 + C_k x_3 &= F_m \cos \omega t. \end{aligned} \quad (8)$$

Приведем уравнения к безразмерному виду, используя уже введенные безразмерные параметры (5) и (7):

$$\begin{aligned} \ddot{w}_1 + \frac{\Omega_1^2}{\Omega_0^2} (w_1 - w_2) &= 0; \\ \ddot{w}_2 - \frac{\Omega_2^2}{\Omega_0^2} (w_1 - w_2) &= 0; \\ \ddot{w}_3 + 2\alpha \dot{w}_3 + w_3 &= \frac{F_m}{F_0} \cos \eta \tau. \end{aligned} \quad (9)$$

Задача замыкается применением условий ударного сопряжения тел. Используя безразмерные величины, запишем выражение коэффициента восстановления [21] при ударе тел  $M_1$  и  $M_2$ :

$$k_1 = -(-\dot{w}'_1 - \dot{w}'_2) / (\dot{w}_1 + \dot{w}_2), \quad (10)$$

где точка и символ штрих над обозначением переменной определяют соответствующее значение скорости после удара. Применим теперь закон сохранения количества движения при упругом ударе:

$$\dot{w}_1 + \frac{e_1}{e_2} \dot{w}_2 = \dot{w}'_1 + \frac{e_1}{e_2} \dot{w}'_2 \quad / \quad (w_1 - d_2 / h_0) + w_2 = 0, \quad (11)$$

и, аналогично, при ударе тел  $M_1$  и  $M_k$ :

$$k_2 = -(-\dot{w}'_1 - \dot{w}'_3) / (\dot{w}_1 + \dot{w}_3); \quad (12)$$

$$\dot{w}_1 + \frac{e_2}{e_1} \dot{w}_3 = \dot{w}'_1 + \frac{e_2}{e_1} \dot{w}'_3 \quad / \quad (w_1 + d_1 / h_0) + w_3 = 0. \quad (13)$$

Соотношения (11) и (13) выполняются при выполнении условий контакта, которые записаны здесь через слэш, и служат для определения начальных значений перемещения и скорости, необходимых в качестве начальных условий для уравнений движения (9).

### Описание программы для расчета ударов свободного тела

Для расчёта траектории движения свободного тела  $M_1$  были созданы имитационные модели в среде имитационного математического моделирования Simulink. Первая система уравнений сведена к форме Коши и решается методом Рунге – Кутты четвертого порядка с переменным шагом по времени (ode45). Возможно аналитическое построение решения подобно работам [22–24], при этом ударное движение свободного тела нужно рассматривать как разновидность автоколебаний. Вторая модель также реализована в системе Simulink и требует введения дискретного времени для выявления моментов контакта. Подробное описание решения на основе первой и второй модели выходит за рамки данной статьи.

Рассмотрим лишь некоторые особенности и результаты расчетов на основе уравнений (8)–(13). Одновременно рассматривается движение свободного тела, бита и концентратора. Имитационная модель задачи представлена в виде схемы на рис. 6. Видим, что, в случае совпадения перемещений взаимодействующих тел, вычисляются значения послеударных скоростей, которые совместно используются в качестве новых начальных условий. Расчет значений перемещения и скорости ударных тел условно разбит на две взаимосвязанные части: блок расчета значений перемещения и скорости концентратора и свободного тела и блок расчета значений перемещения и скорости свободного тела и бита на каждом временном шаге. Вычисление начальных условий происходит только для соударяющихся тел и вводится в программу расчета при определенном сочетании логических переменных (см. рис. 6).

Удар считаем упругим с коэффициентом восстановления 0,9. Собственная масса бита  $M_2$  примерно равна парциальной массе концентратора на частоте  $\omega_k$  и составляет 50 г. На рис. 7 представлены временные зависимости перемещения и скорости свободного тела вблизи рабочей поверхности концентратора (без удара по биту) при вышеуказанных параметрах модели. Наблюдается неравномерное распределение амплитуд перемещений от времени, что свидетельствует, по сути, о случайном характере столкновений рабочей поверхности концентратора и свободного тела, при этом диапазон колебаний свободного тела лежит в пределах от 1 до 3 мм, а частота колебаний составляет примерно 580 Гц.

Эта неравномерность связана с несинхронностью и несинфазностью движения этих тел, что существенно снижает эффективность работы бура. Такая проблема может быть решена с помощью определенных средств настройки.

Отсюда следует **четвертая задача управления**: обеспечение кратности частоты ультразвука и частоты колебаний свободного тела.

На рис. 8 показано влияние параметров модели на частоту  $f_1$  и амплитуду колебаний свободной массы  $x_1$ ; очевидно, что для параметров модели, указанных выше, велика роль пружины и поведение свободной массы соответствует типичному поведению одномассовой колебательной

системы. Отсутствие жесткости  $C_2$  приводит к ударному взаимодействию всех тел при определенном наборе параметров, например, указанных на рис. 8. Видим, что уменьшение зазора и увеличение амплитуды колебаний концентратора  $x_{30}$  приводит к существенному увеличению частоты колебаний свободного тела, при этом надо учитывать случайный характер ударных взаимодействий, поэтому результат является средним по достаточно длинной выборке. Полученная модель является, по сути, имитационной и обладает присущими им недостатками, включая невозможность получения обобщающих результатов при ограниченном числе вычислений, однако это хороший инструмент для разработки и оптимизации устройства.

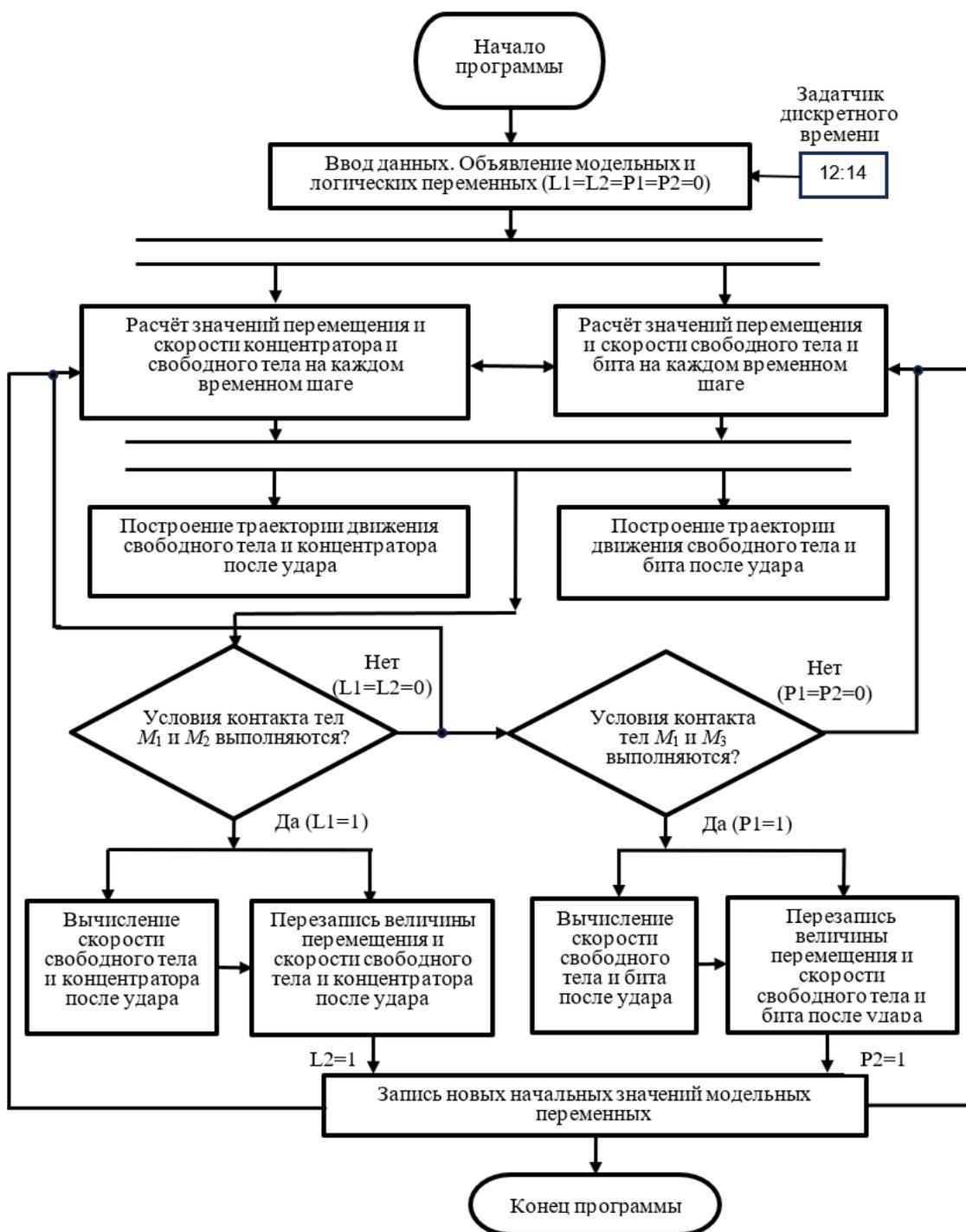


Рис. 6. Укрупненная структурная схема программы для расчета траектории движения ударных тел  
Fig. 6. Enlarged block diagram of the program for calculating the trajectory of impact bodies

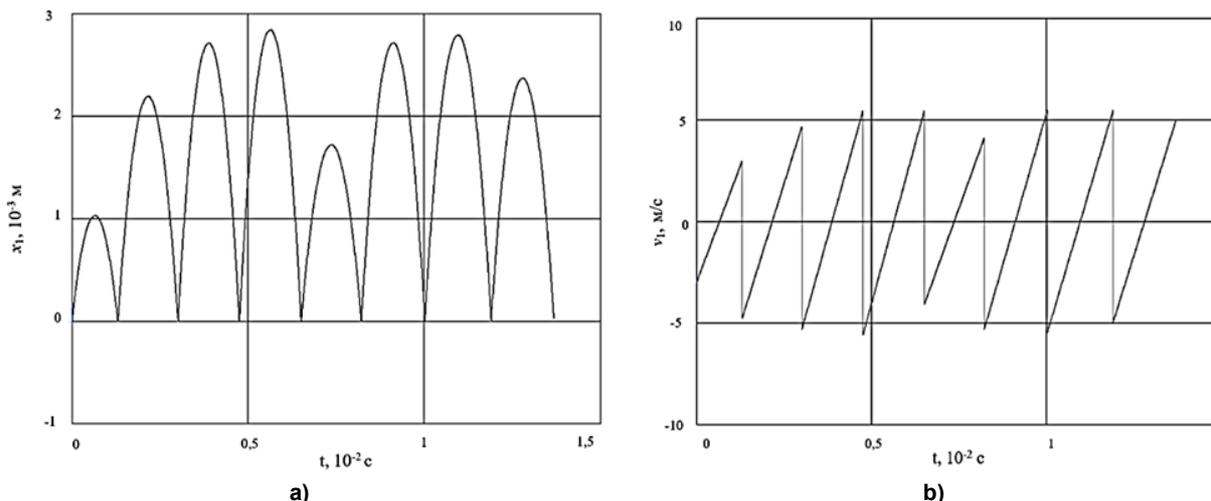


Рис. 7. Перемещение (а) и скорость (б) свободного тела с массой 4 г  
Fig. 7. Displacement (a) and velocity (b) of a free body with a mass of 4 g

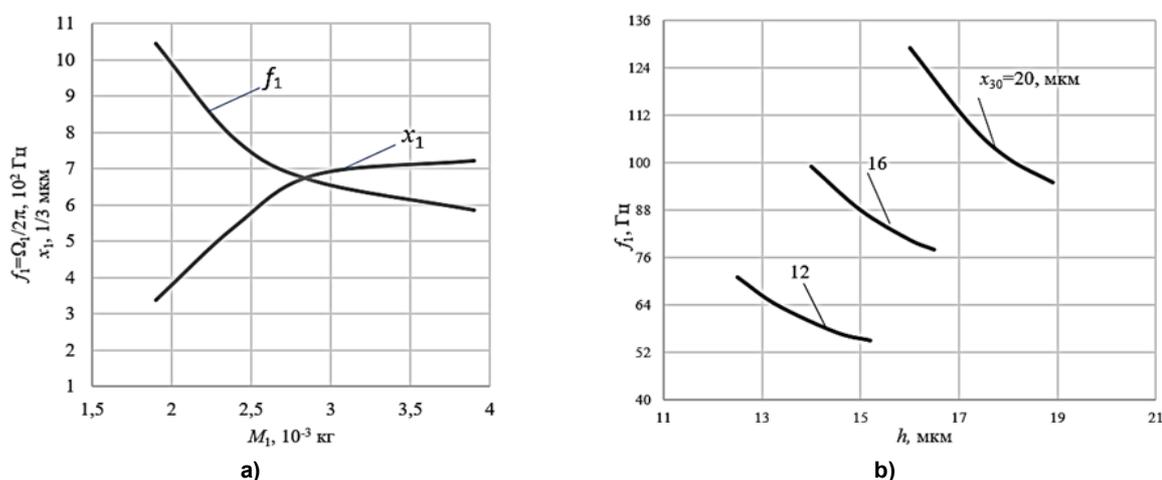


Рис. 8. Зависимости частоты и амплитуды свободного тела (а) от его массы и частоты от ударного зазора при разных амплитудах УЗ-колебаний (б)  
Fig. 8. Dependences of the frequency and amplitude of a free body (a) on its mass and frequency on the impact gap at different amplitudes of ultrasonic vibrations (b)

### Выводы

В результате выполненных исследований удалось выявить конструкцию бура с развязкой от грунта по ультразвуку, что обеспечивает работоспособность бура даже при заклинивании ударного бита в грунте. Данная конструкция представлена в виде схемы замещения с последовательным соединением элементов с эквивалентными параметрами, полученными из распределенного описания конструкции бура. Рассмотрены непрерывная и дискретная трехмассовая математическая модель бура, описана работа программы расчета движения свободного тела, выполнено параметрическое исследование на основе этой модели.

Одним из основных результатов работы является формулировка задач управления работой буровой роботизированной платформы:

- первая (естественная) задача: управление рабочим циклом буровой платформы;
- вторая задача: управление частотой ударов свободного тела до достижения резонанса доминирующих частиц исследуемого грунта;
- третья задача: минимизация энергопотребления за счет выключения питания на ультразвуковой преобразователь сразу после удара/ударов о рабочую поверхность преобразователя и предварительного включения его не более чем за четверть периода движения свободного тела;
- четвертая задача управления: обеспечение и поддержание кратности отношения частоты ультразвука к частоте колебаний свободного тела.

### Список литературы

1. Патент RU 2111900. Пенетратор для исследования поверхности небесных тел / Ю.П. Акулов, 1998.
2. Pat. US 6863136 B2. Smart Ultrasonic/Sonic Driller/Corer (SUSDC) / Y. Bar-Cohen, S. Sherrit, B. Dolgin, X. Bao, 2005.
3. Pat. US 6968910 B2. Ultrasonic/sonic mechanism of deep drilling (USMOD) / Y. Bar-Cohen, S. Sherrit, B. Dolgin, X. Bao, 2005.
4. Pat. US 7156189 B1. Self mountable and extractable ultrasonic/sonic anchor / Y. Bar-Cohen, S. Sherrit, 2007.
5. Pat. US 8640786 B2. Percussive augments of rotary drills for operating as a rotary-hammer drill / J.B. Aldrich, Y. Bar-Cohen et al., 2014.
6. Патент RU 2598947. Ультразвуковой бур / Д.В. Генне, В.И. Костенко, И.Г. Митрофанов и др., 2016.
7. Патент RU 2503815. Ультразвуковое грунтозаборное устройство / Д.В. Генне, В.И. Костенко, И.Г. Митрофанов и др., 2018.
8. Modeling and Computer Simulation of Ultrasonic/Sonic Driller/Corer (USDC) / X. Bao, Y. Bar-Cohen, Z. Chang, S. Sherrit // IEEE Transactions of Ultrasonics, Sonics and Frequency Control. 2003. Vol. 50 (9). P. 1147–1160. DOI: 10.1109/tuffc.2003.1235326
9. Subsurface sampler and sensors platform using the ultrasonic/sonic driller/corer (USDC) / Y. Bar-Cohen, S. Sherrit, X. Bao, M. Badescu // Paper 6529–18, Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials Symposium. San Diego, CA, March 19–22, 2007. P. 1–7. DOI: 10.1117/12.715048
10. Ultrasonic/sonic drilling/coring (USDC) for planetary applications / Y. Bar-Cohen, S. Sherrit, B. Dolgin et al. // Smart Structures and Materials 2001: Smart Structures and Integrated Systems. 2001. Vol. 4327. P. 441–449. DOI: 10.1117/12.436556
11. Design and analysis of ultrasonic actuator in consideration of length-reduction for a USDC (Ultrasonic/Sonic Driller/Corer) / Z. Chang, S. Sherrit, M. Badescu et al. // Proceedings of the SPIE Smart Structures Conference. 2005. Vol. 5762 (10). P. 563–571. DOI: 10.1117/12.598851
12. Sherrit S., Bar-Cohen Y., Dolgin B. Modeling of horns for sonic/ultrasonic applications // Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium. 1999. Vol. 1. P. 647–651. DOI: 10.1109/ULTSYM.1999.849482
13. Harkness P., Lucas M., Cardoni A. Maximization of the Effective Impulse Delivered by a High-Frequency/Low-Frequency Planetary Drill Tool // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2011. Vol. 58, no. 11. P. 2387–2396. DOI: 10.1109/TUFFC.2011.2096
14. Повышение эффективности работы ультразвуковой вибрационной системы для кавитационной обработки жидкости / В.Н. Хмелев, В.А. Нестеров, А.В. Шалунов, С.Н. Циганок // Международная конференция и семинар по микро/нанотехнологиям и электронным устройствам EDM 2018. Новосибирск: НГТУ, 2018. С. 287–291.
15. Хмелев В.Н., Нестеров В.А., Генне Д.В. Разработка ультразвуковой колебательной системы для бурения лунного грунта // 20 Международная конференция-семинар молодых специалистов по микро- и нанотехнологиям и электронным устройствам EDM 2019. Новосибирск: НГТУ, 2019. С. 174–186.
16. Ганиев Р. Марсоход InSight перестал бурить скважину на Марсе. Что произошло? URL: <https://hi-news.ru/technology/marsohod-insight-perestal-burit-skvazhinu-na-marse-cto-proizoshlo.html> (дата обращения: 04.04.2024).
17. Некрасов С.Г., Перминов С.В. Модель вибратора для проектирования вибромашин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2021. Т. 21, № 4. С. 15–25. DOI: 10.14529/engin210402
18. Кикучи Е. Ультразвуковые преобразователи: пер. с англ. / под ред. Е. Кикучи. М.: Мир, 1972. 424 с.
19. Прочность. Устойчивость. Колебания: справ.: в 3 т. Т. 1 / под общ. ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. М.: Машиностроение, 1968. 821 с.
20. Пановко Я.Г. Введение в теорию механического удара. М.: Наука, 1977. 224 с.
21. Кочетков А.В., Федотов П.В. Некоторые вопросы теории удара // Интернет-журнал «Наукоедение», 2013. № 5. С. 1–15. Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/110tvn513.pdf> (дата обращения: 04.04.2024).
22. Некрасов С.Г. Измерение количества растворенного газа в жидкости на основе резонанс-

ных характеристик высокооборотной электромеханической системы с локализованной кавитационной нагрузкой // Известия Челябинского научного центра УрО РАН. 2007. № 3. С. 38–44.

23. Блехман И.И., Джанелидзе Г.Ю. Вибрационное перемещение. М: Наука, 1964. 410 с.

24. Герц М.Е., Герц М.М. Синтез авторезонансных машин // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2006. № 2. С. 22–27.

### References

1. Akulov Yu.P. *Penetrator dlya issledovaniya poverkhnosti nebesnykh tel* [Penetrator for studying the surface of celestial bodies]. Patent RU no. 2111900, 1998. (In Russ.)

2. Bar-Cohen Y., Sherrit S., Dolgin B., Bao X. Smart Ultrasonic/Sonic Driller/Corer (SUSDC). Pat. US no. 6863136 B2, 2005.

3. Bar-Cohen Y., Sherrit S., Dolgin B., Bao X. Ultrasonic/sonic mechanism of deep drilling (USMOD). Pat. US no. 6968910 B2, 2005.

4. Bar-Cohen Y., Sherrit S. Self mountable and extractable ultrasonic/sonic anchor. Pat. US 7156189 B1, 2007.

5. Aldrich J.B., Bar-Cohen Y. et al. Percussive augments of rotary drills for operating as a rotary-hammer drill. Pat. US no. 8640786 B2, 2014.

6. Genne D.V., Kostenko V.I., Mitrofanov I.G. et al. *Ul'trazvukovoy bur* [Ultrasonic drill]. Patent RU no. 2598947, 2016. (In Russ.)

7. Genne D.V., Kostenko V.I., Mitrofanov I.G. et al. *Ul'trazvukovoe gruntozabornoe ustroystvo* [Ultra-sonic soil sampling device]. Patent RU no. 2503815, 2018. (In Russ.)

8. Bao X., Bar-Cohen Y., Chang Z., Sherrit S. Modeling and Computer Simulation of Ultrasonic/Sonic Driller/Corer (USDC). *IEEE Transactions of Ultrasonics, Sonics and Frequency Control*. 2003;50(9):1147–1160. DOI: 10.1109/tuffc.2003.1235326

9. Bar-Cohen Y., Sherrit S., Bao X., Badescu M. Subsurface sampler and sensors platform using the ultrasonic/sonic driller/corer (USDC). In: *Paper 6529-18, Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials Symposium*. San Diego, CA, March 19–22, 2007. P. 1–7. DOI: 10.1117/12.715048

10. Bar-Cohen Y., Sherrit S., Dolgin B., Chang Z., Krahe R. Ultrasonic/sonic drilling/coring (USDC) for planetary applications. *Smart Structures and Materials 2001: Smart Structures and Integrated Systems*. 2001;4327:441–449. DOI: 10.1117/12.436556

11. Chang Z., Sherrit S., Badescu M., Bao X., Bar-Cohen Y. Design and analysis of ultrasonic actuator in consideration of length-reduction for a USDC (Ultrasonic/Sonic Driller/Corer). In: *Proceedings of the SPIE Smart Structures Conference*. 2005;5762(10):563–571. DOI: 10.1117/12.598851

12. Sherrit S., Bar-Cohen Y., Dolgin B. Modeling of horns for sonic/ultrasonic applications. In: *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*. 1999. Vol. 1. P. 647–651. DOI: 10.1109/ULTSYM.1999.849482

13. Harkness P., Lucas M., Cardoni A. Maximization of the Effective Impulse Delivered by a High-Frequency/Low-Frequency Planetary Drill Tool. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2011;58(11):2387–2396. DOI: 10.1109/TUFFC.2011.2096

14. 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. In: *International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2018: Conference proceedings*. Novosibirsk: NSTU; 2018. P. 287–291. (In Russ.)

15. Khmelev V.N., Nesterov V.A., Genne D.V. Development of an ultrasonic oscillatory system for drilling lunar soil. In: *International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2019: Conference proceedings*. Novosibirsk: NSTU; 2019. P. 174–186. (In Russ.)

16. Ganiev R. *Marsokhod InSight perestal burit' skvazhinu na Marse. Chto proizoshlo?* [The InSight rover has stopped drilling on Mars. What happened?]. (In Russ.) Available at: <https://hi-news.ru/technology/marsoxod-insight-perestal-burit-skvazhinu-na-marse-chto-proizoshlo.html> (accessed 4 April 2024).

17. Nekrasov S.G., Perminov S.V., Vibrator Model for Design of Vibration Machines. Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry. 2021;21(4):15–25. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin210402

18. Kikuchi E. (Ed.). *Ultrasonic Transducers*. Tokio: Corona Publishing Company; 1969. 472 p.

19. Birger I.A., Panovko Ya.G. (Eds.). *Prochnost'. Ustoychivost'. Kolebaniya: spravochnik: v 3 t. T. 1* [Strength. Stability. Vibrations: reference book: in 3 volumes. Vol. 1]. Moscow: Mashinostroenie; 1968. 821 p. (In Russ.)

20. Panovko Ya.G. *Vvedenie v teoriyu mekhanicheskogo udara* [Introduction to mechanical shock theory]. Moscow: Nauka; 1977. 224 p. (In Russ.)

21. Kochetkov A.V., Fedotov P.V. Some questions of the theory of blow. *Online journal "Naukovedenie"*. 2013;(5):1–15. Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/110tvn513.pdf> (accessed 4 April 2024).

22. Nekrasov S.G. Dissolved in liquid gas amount measurement on the basis of resonance characteristics of high-q electromechanical system with localized cavitation load. *Proceedings of the Chelyabinsk Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2007;(3):38–44. (In Russ.)

23. Blekhman I.I., Dzhanelidze G.Yu. *Vibratsionnoe peremeshchenie*. [Vibratory movement]. Moscow: Nauka; 1964. 410 p. (In Russ.)

24. Gerts M.E., Gerts M.M. [Synthesis of autoresonance machines]. *Problems of mechanical engineering and machine reliability*. 2006;(2):22–27. (In Russ.)

### **Информация об авторах**

**Некрасов Сергей Геннадьевич**, д-р техн. наук, проф. кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; [nekrasovsg@susu.ru](mailto:nekrasovsg@susu.ru).

**Перминов Сергей Васильевич**, главный инженер, АО «Медприбор», Челябинск, Россия; [info@medpribor.net](mailto:info@medpribor.net).

**Гусев Евгений Васильевич**, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры цифровой экономики и информационных технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; [gusev@susu.ru](mailto:gusev@susu.ru).

**Кодкин Владимир Львович**, д-р техн. наук, проф. кафедры электропривода, мехатроники и электромеханики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; [kodkinvl@susu.ru](mailto:kodkinvl@susu.ru).

**Телегин Александр Иванович**, д-р физ.-мат. наук, проф., проф. кафедры автоматизации, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе, Миасс, Россия; [teleginai@susu.ru](mailto:teleginai@susu.ru).

### **Information about the authors**

**Sergey G. Nekrasov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Information and Measuring Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; [nekrasovsg@susu.ru](mailto:nekrasovsg@susu.ru).

**Sergey V. Perminov**, Chief engineer, Medpribor, JSC, Chelyabinsk, Russia, [info@medpribor.net](mailto:info@medpribor.net).

**Evgeny V. Gusev**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Digital Economics and Information Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; [gusev@susu.ru](mailto:gusev@susu.ru).

**Vladimir L. Kodkin**, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; [kodkinvl@susu.ru](mailto:kodkinvl@susu.ru).

**Aleksandr I. Telegin**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Prof. of the Department of Automation, South Ural State University, Miass, Russia; [teleginai@susu.ru](mailto:teleginai@susu.ru).

**Статья поступила в редакцию 05.04.2024**

**The article was submitted 05.04.2024**