

**ОСОБЕННОСТИ  
УЛЬТРАЗВУКОВОГО  
ВОЗДЕЙСТВИЯ  
В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ  
(Создание практических  
конструкций малогабаритных  
аппаратов)**

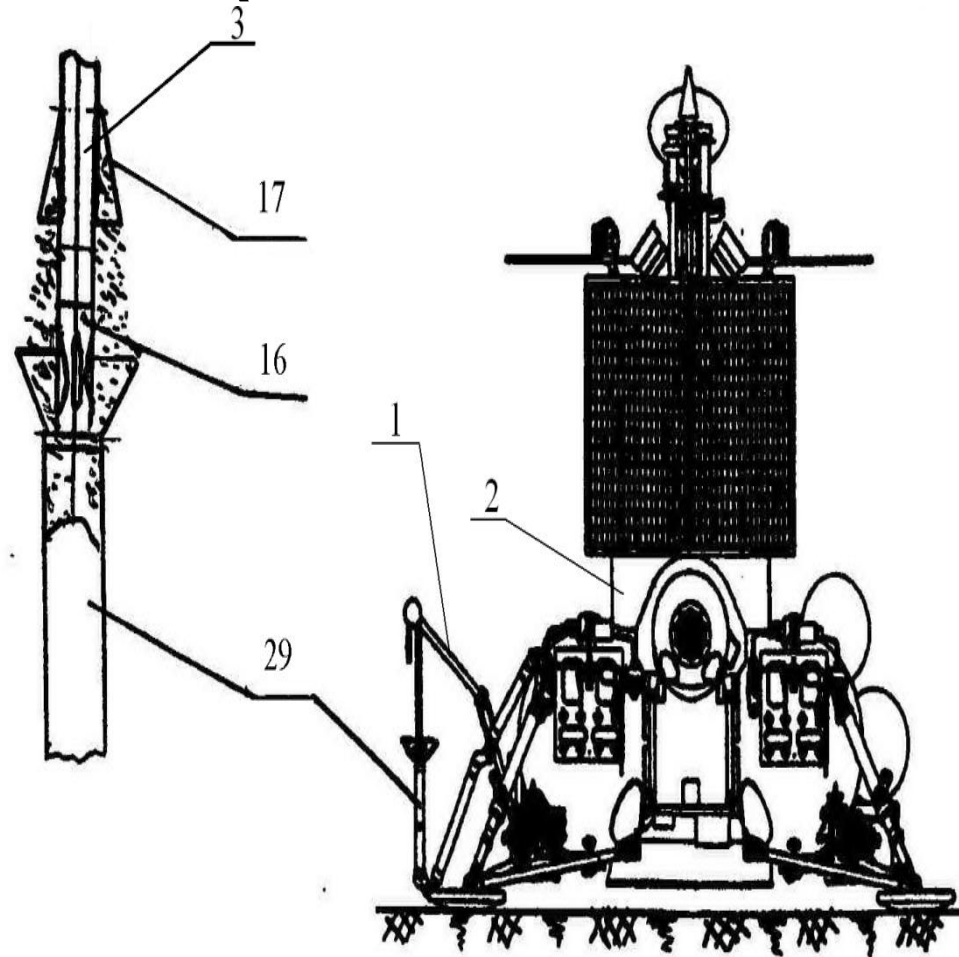
# ***Хмелёв Владимир Николаевич***



***Доктор технических наук, профессор,  
Заслуженный изобретатель РФ, Senior  
Member IEEE. Лауреат премии  
Правительства РФ в области науки и  
техники, автор более 1200 научных  
публикаций (в т.ч. более 130  
патентов, более 20 монографий и  
учебников)  
Зам. директора по научной работе  
Бийского технологического  
института ФГБОУ ВО "Алтайский  
государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова".***

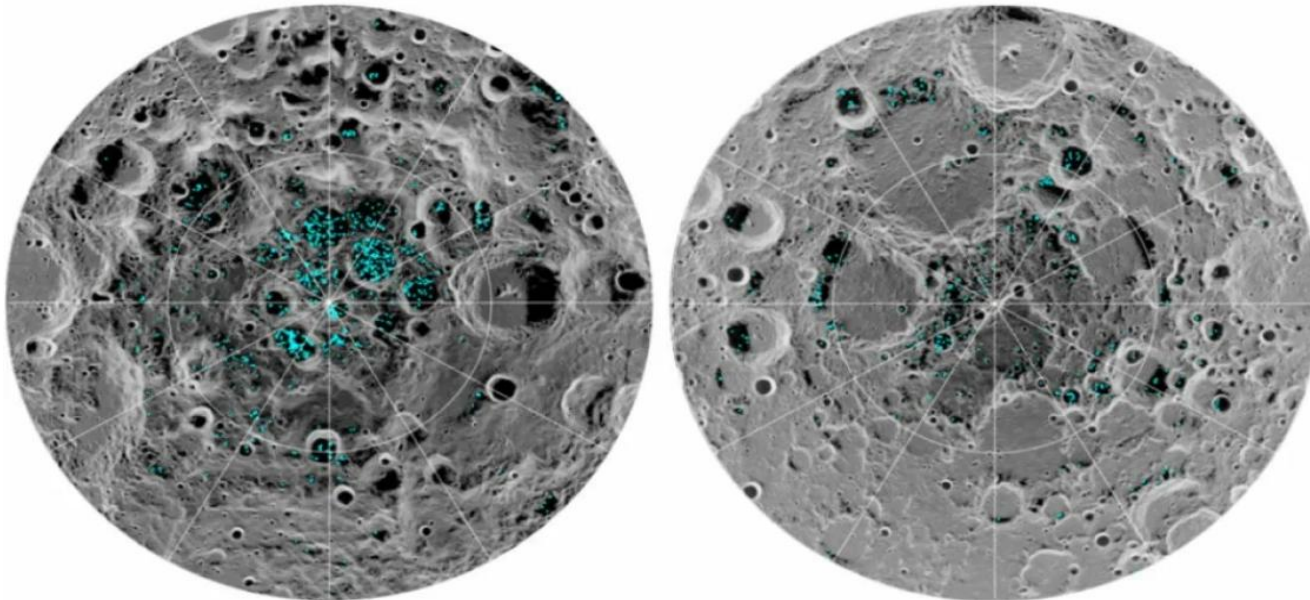
+7 9039925120  
[vnh@u-sonic.ru](mailto:vnh@u-sonic.ru)

# Бурение грунта на планетах и астероидах (Т от 0 К до 1000К)



# Необходимость бурения грунта на планетах и астероидах

- Большой научный интерес (возможное наличие жизни, проведение экспериментов невозможных на Земле);
- Возможность колонизации (добыча кислорода, выращивание растений, выживание человечества в случае глобальных катастроф на Земле);
- Добыча водорода для получения топлива (запуск космических аппаратов с Луны для исследования дальнего космоса).



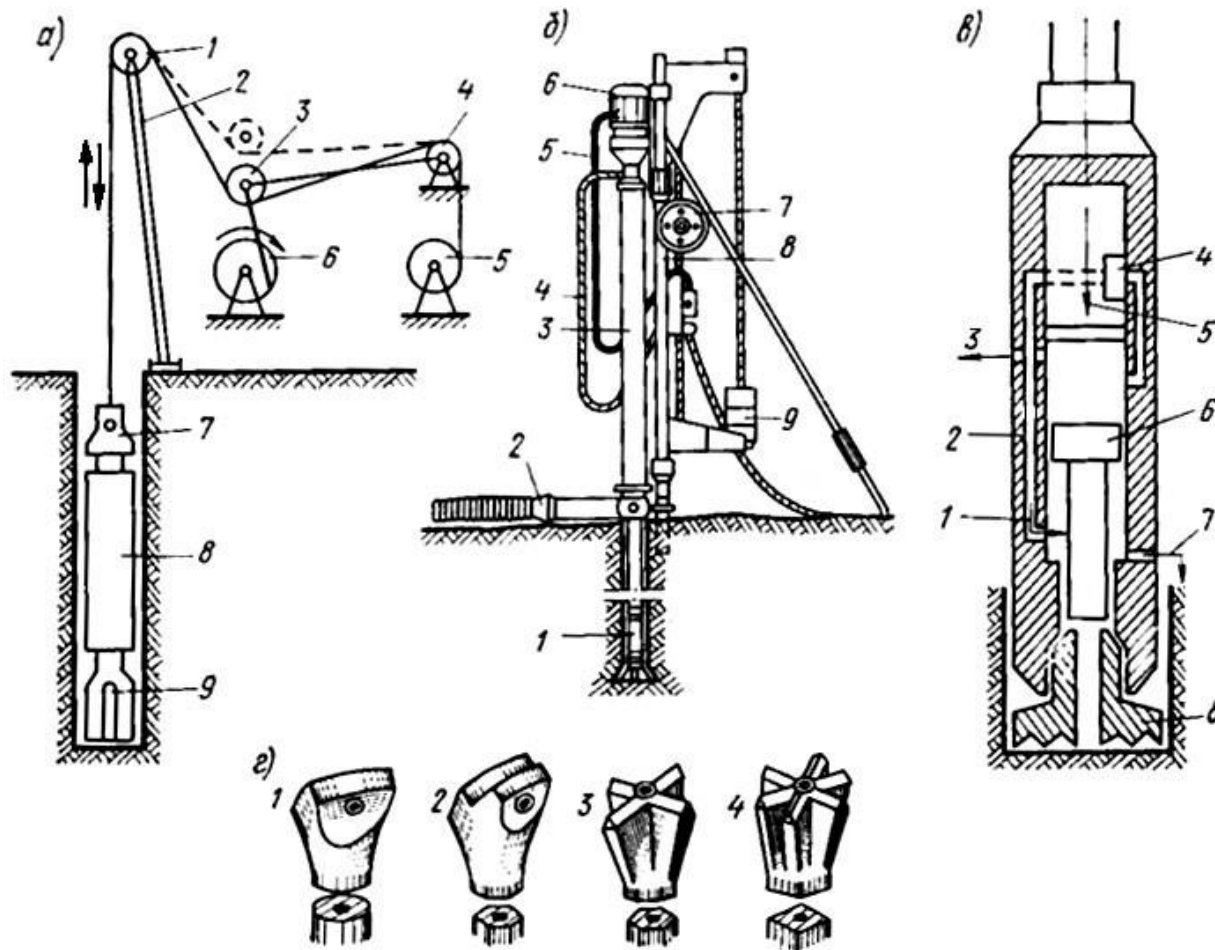
# Решаемые проблемы внеземного бурения

- Ускоренное закрепление посадочных модулей на объектах с малой силой тяжести и неизвестным составом грунта (например, астероидах).
- Выявление состава и свойств неизвестного до посадки грунта на предмет наличия летучих и легко испаряющихся веществ на различных глубинах при минимальном влиянии инструмента исследования на состав грунта и сохранность ценных веществ.
- Определение состава и свойств неизвестного до посадки грунта для оптимизации режимов и условий воздействия (бурения) с целью обеспечения максимальной скорости при минимальных энергозатратах

# Механическое бурение земного грунта вращением

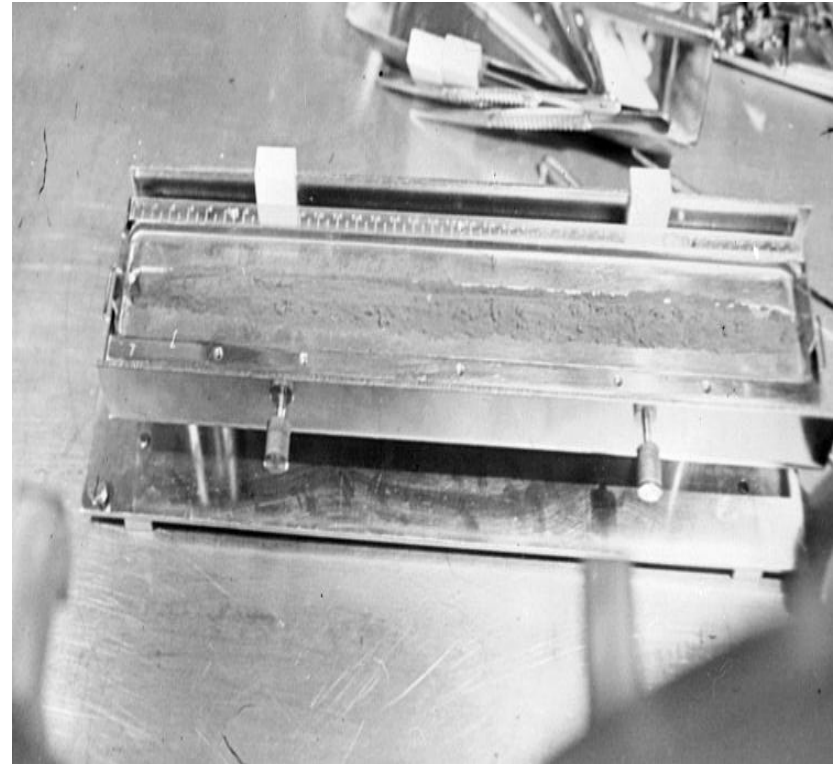
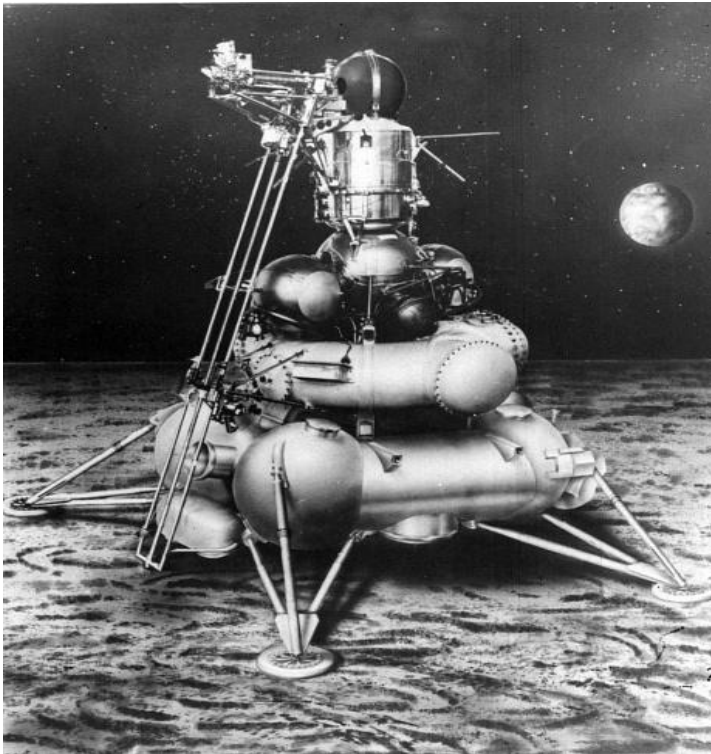


# Устройства механического бурения грунта



# Опыт бурения лунного грунта Луна-24.

Осуществлено механическое бурение на глубину 2,25 м,  
Станция доставила на Землю образцы лунного грунта массой 170 грамм.  
Проведенные исследования привели к открытию воды в лунном грунте



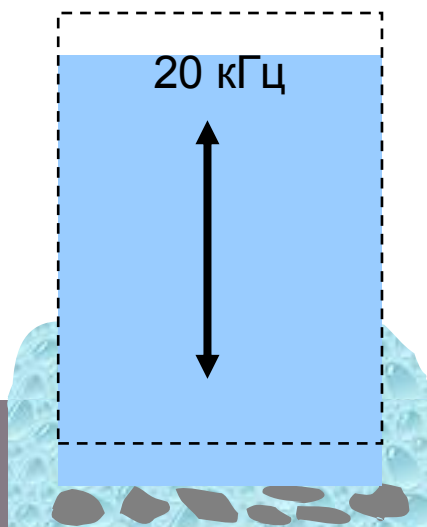
# Бурильное устройство Американского национального агентства по астронавтике (NASA)



# Проблемы механического бурения

- невозможность бурения на объектах с малой силой тяжести для крепления посадочных модулей на астероидах (из-за сил инерции, препятствующих бурению, которые превышают гравитационные силы);
- высокая степень нагрева грунта из-за сил трения, приводящая к испарению, сублимации следов воды и льда, летучих и других полезных веществ;
- невозможность получения информации о свойствах и составе грунта в режиме реального времени без дорогостоящей доставки образцов грунта на Землю для детального исследования.

# Ультразвуковое бурение



## Возможности

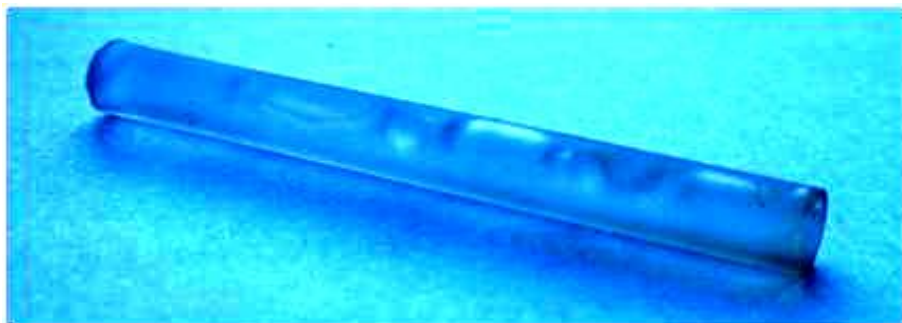
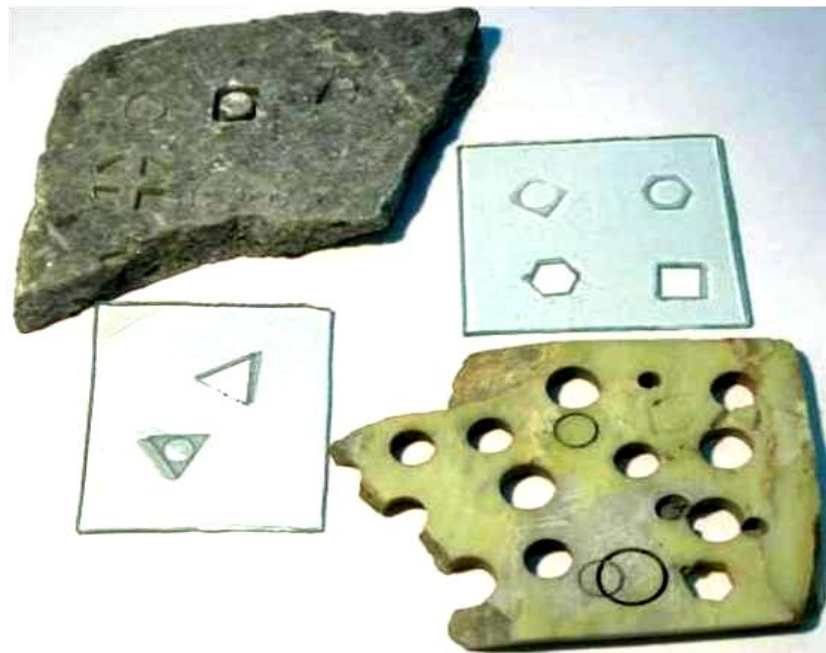
- Энергоемкость  $< 10 \text{ Дж/см}^3$
- Скорость  $> 10 \text{ мм/с}$
- Отсутствие трещин
- Диаметр от 1 до 120 мм



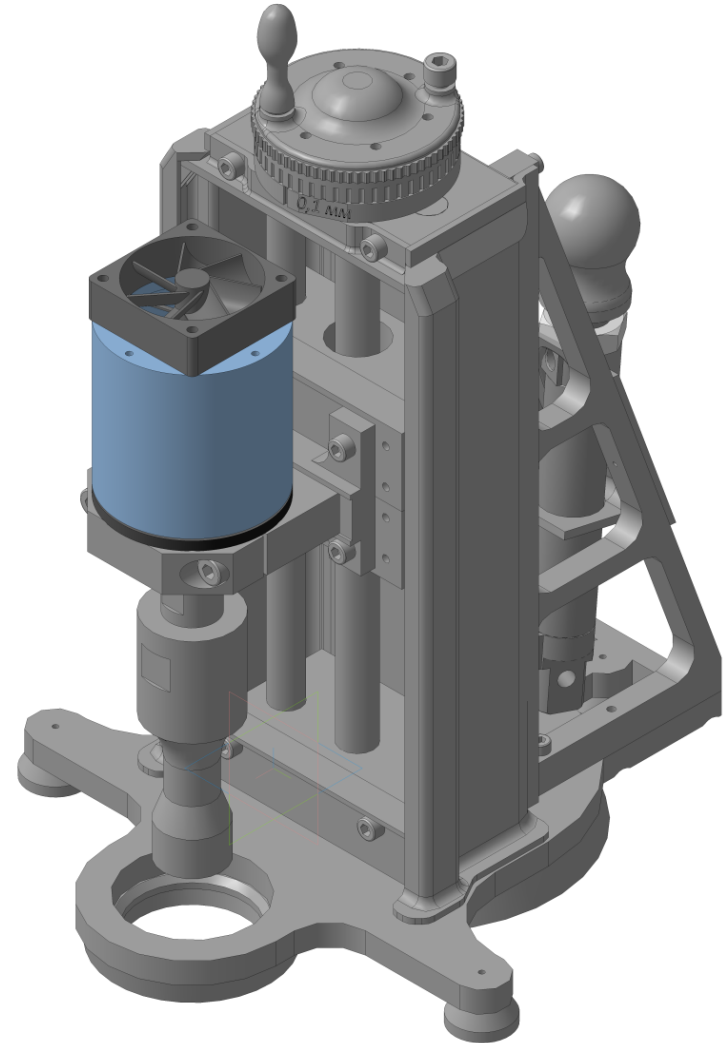
1. Ударное воздействие абразивных частиц

2. Циркуляция и смена абразива

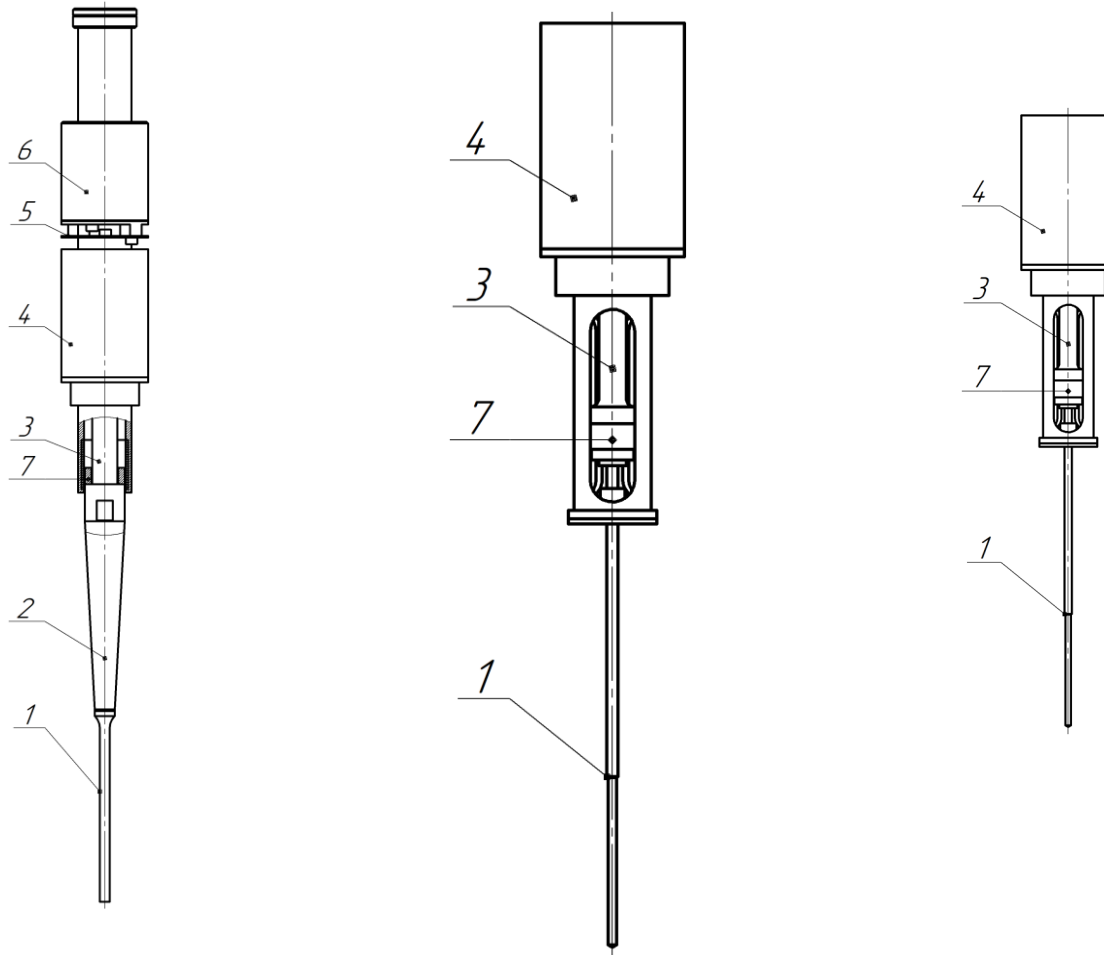
# *Выполнение каналов различной формы и глубины*



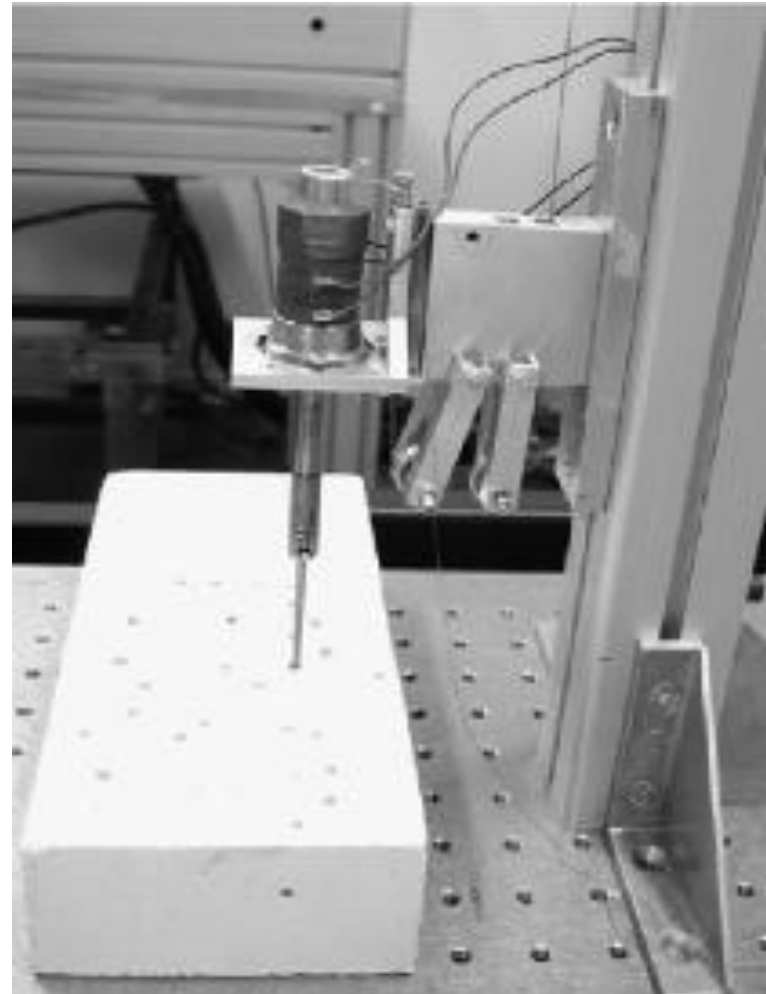
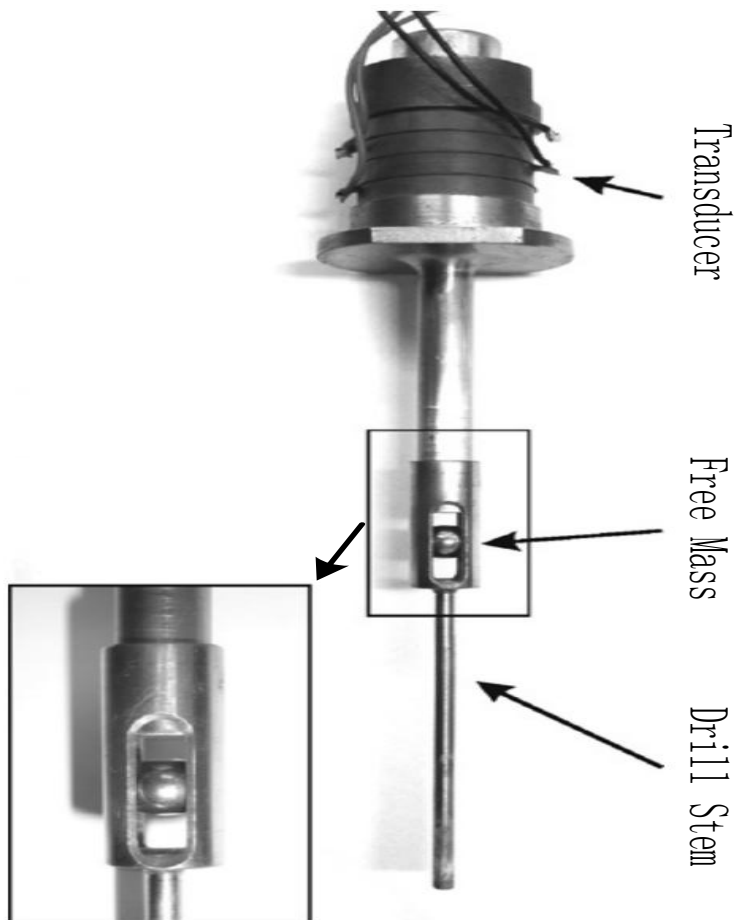
# Ультразвуковой станок для размерной обработки



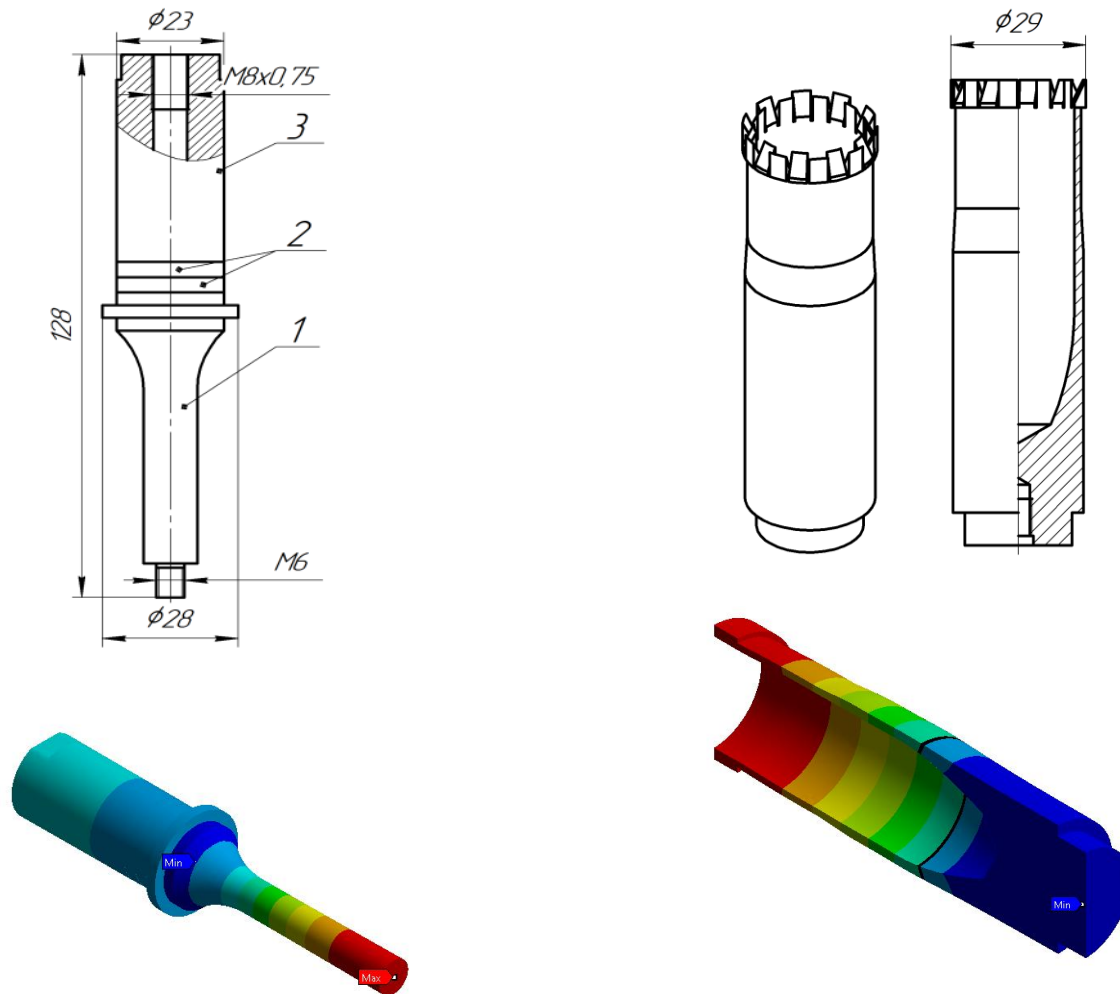
# Устройства УЗ бурения



# Устройство УЗ бурения со свободной массой

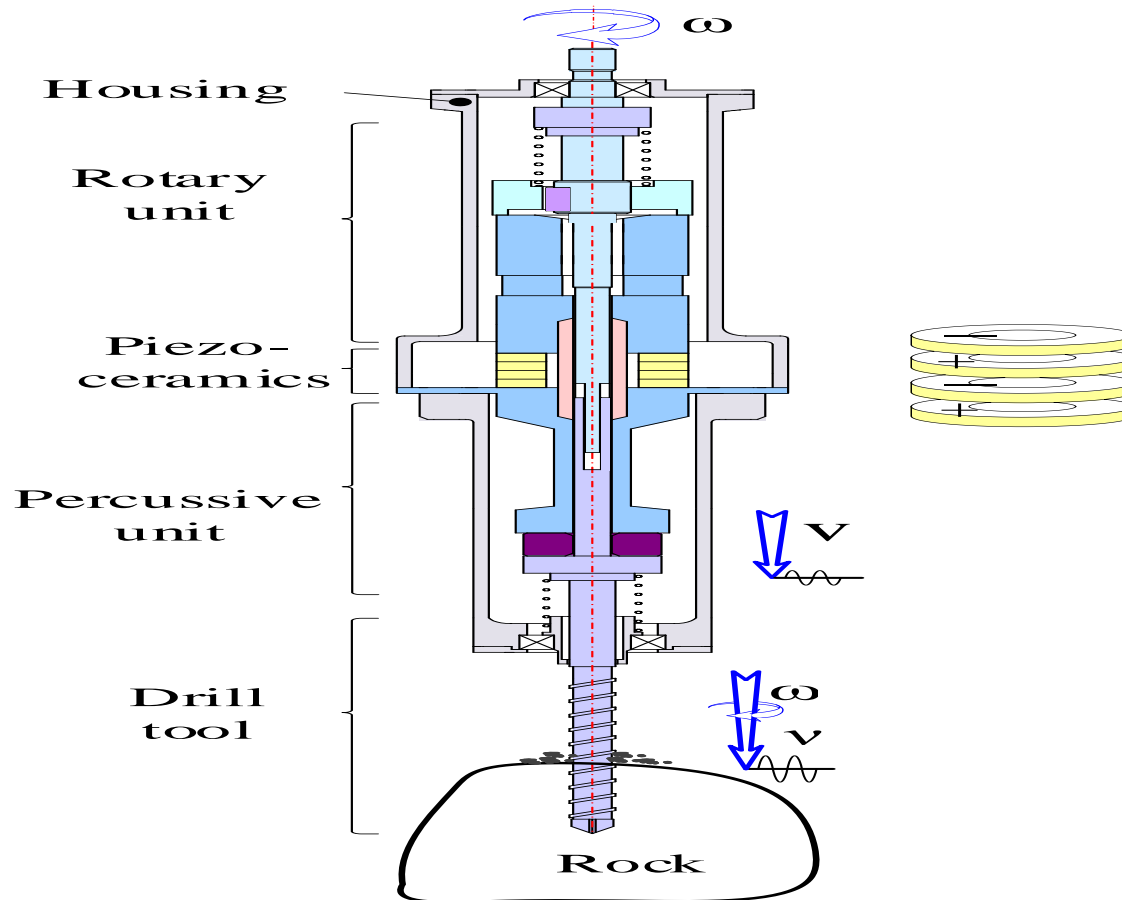


# УЗКС для бурения грунта (составляющие)



1 – концентратор; 2 – пьезоэлектрические кольца; 3 – отражатель.

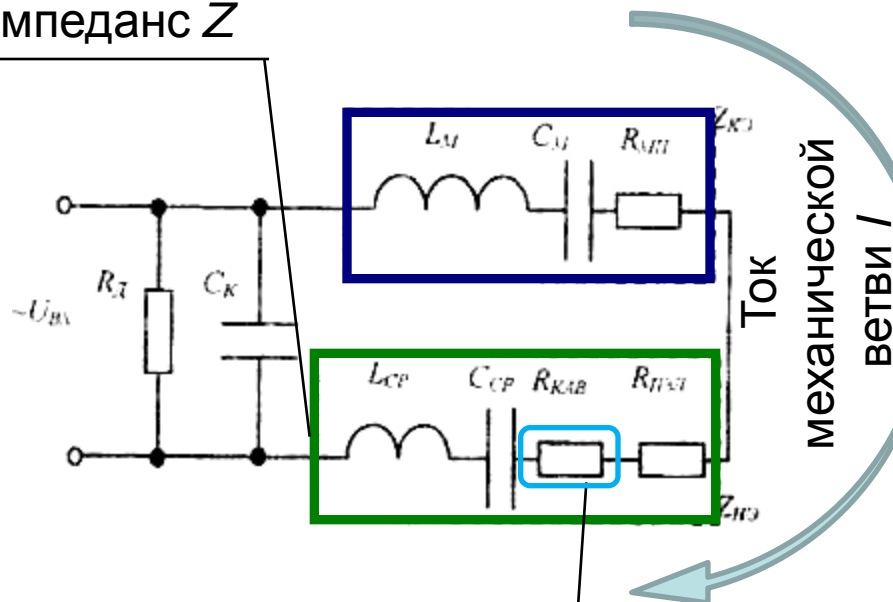
# Система ультразвукового бурения с ударным и вращательным воздействием



Wang Yinchao, Quan Qiquan, и др.,  
Харбинский Институт Технологии, Китай

# Влияние грунта и температуры на параметры ультразвуковой колебательной системы

Механический импеданс  $Z$



Активное сопротивление, обусловленное нагрузкой со стороны среды  $R$  (потребляет активную мощность  $P$ )

**ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ**

Ограниченный температурный диапазон пьезоэлемента, при котором он сохраняет пьезоэлектрические свойства

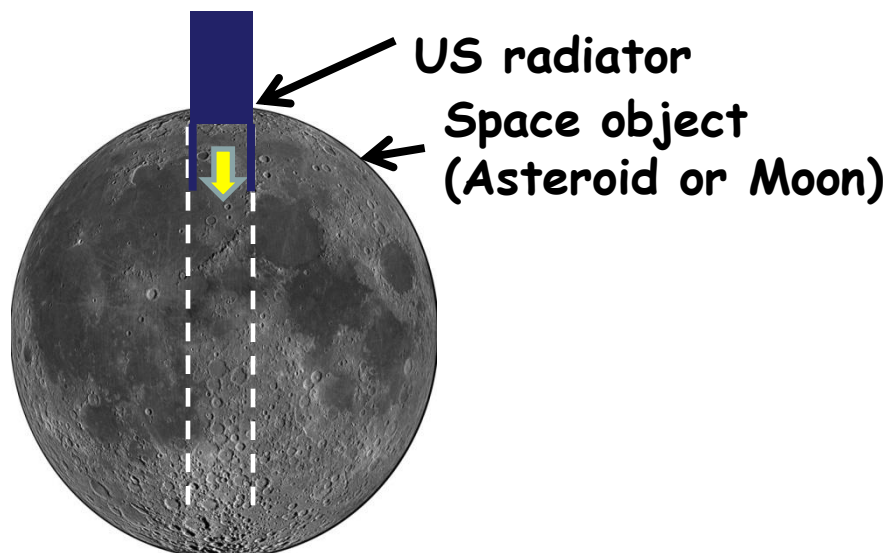
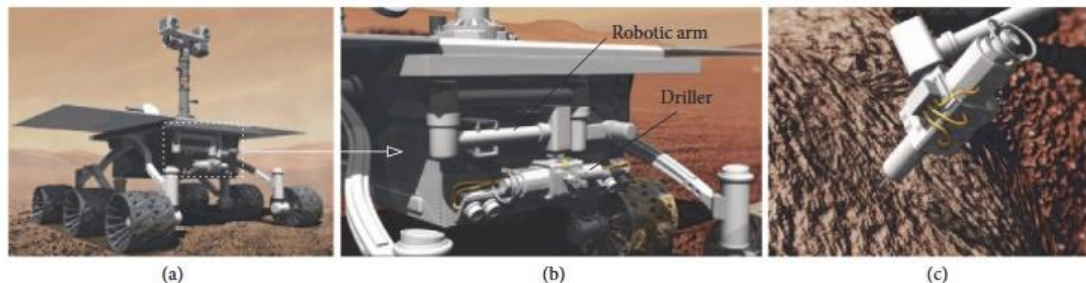
Изменяется ёмкость пьезоэлемента  $C_K$  -> изменяется резонансная частота колебательной системы с изменением температуры

Изменяются механические свойства материала излучателя (снижается предел прочности на растяжение и на сжатие, уменьшается предельное количество циклов нагружения, возникают начальные напряжения).



# Процессы ультразвукового воздействия на твёрдые среды в экстремальных условиях

## Бурение космических объектов



# Постановка задачи исследования процесса ультразвукового бурения для обнаружения воды и льда

Скорость бурения  $\frac{dh}{dt} \left( A, \Lambda \right) \rightarrow ?$       Массовая доля испарившейся воды  $\Delta \chi \left( A, \Lambda \right) \rightarrow ?$

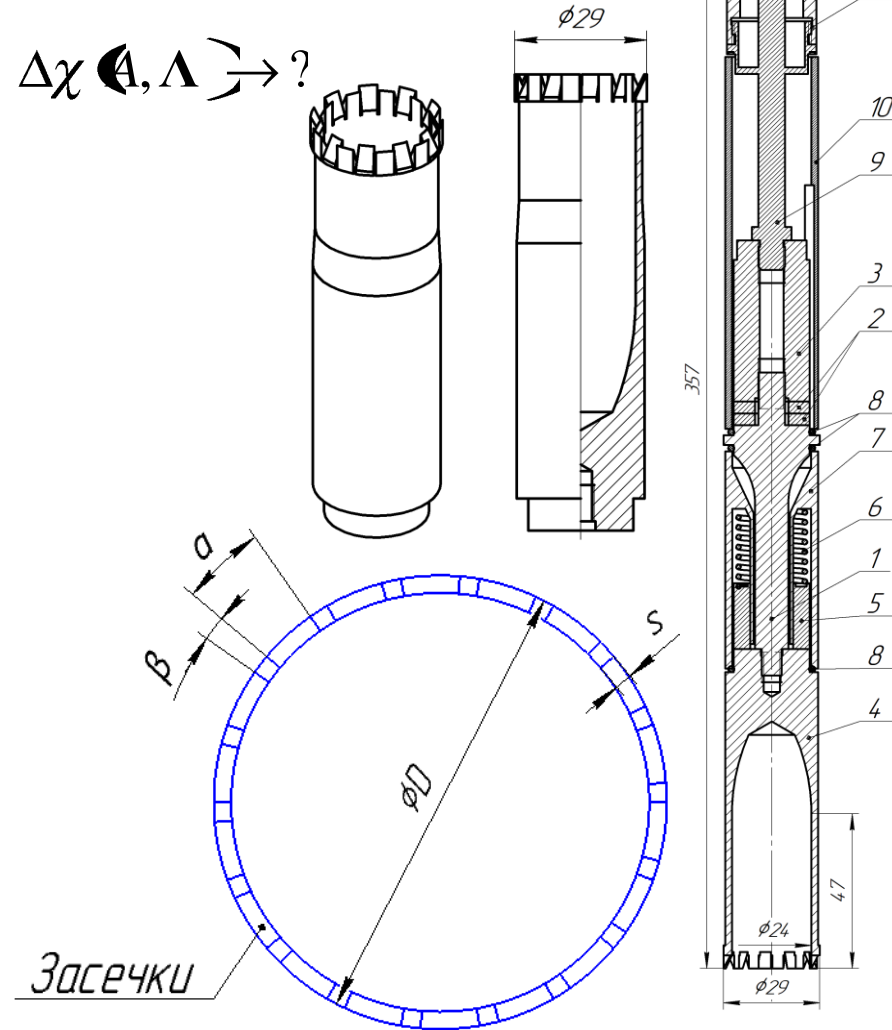
Критерий оптимальности процесса бурения

Минимальная масса испарившейся воды  $\Delta \chi \rightarrow \min$

**A** – амплитуда колебаний излучателя

**Λ** – параметры излучателя

1. D – диаметр;
2. S – толщина засечек;
3. α/β – скважность;
4. n – количество засечек.



# Экспериментальные исследования

Замороженная  
песчано-водная песчано- маслянная смесь



Амплитуда колебаний на торце инструмента – 30 мкм;  
Потребляемая мощность при бурении – до 75 Вт;  
Диаметр создаваемого канала – 25 мм

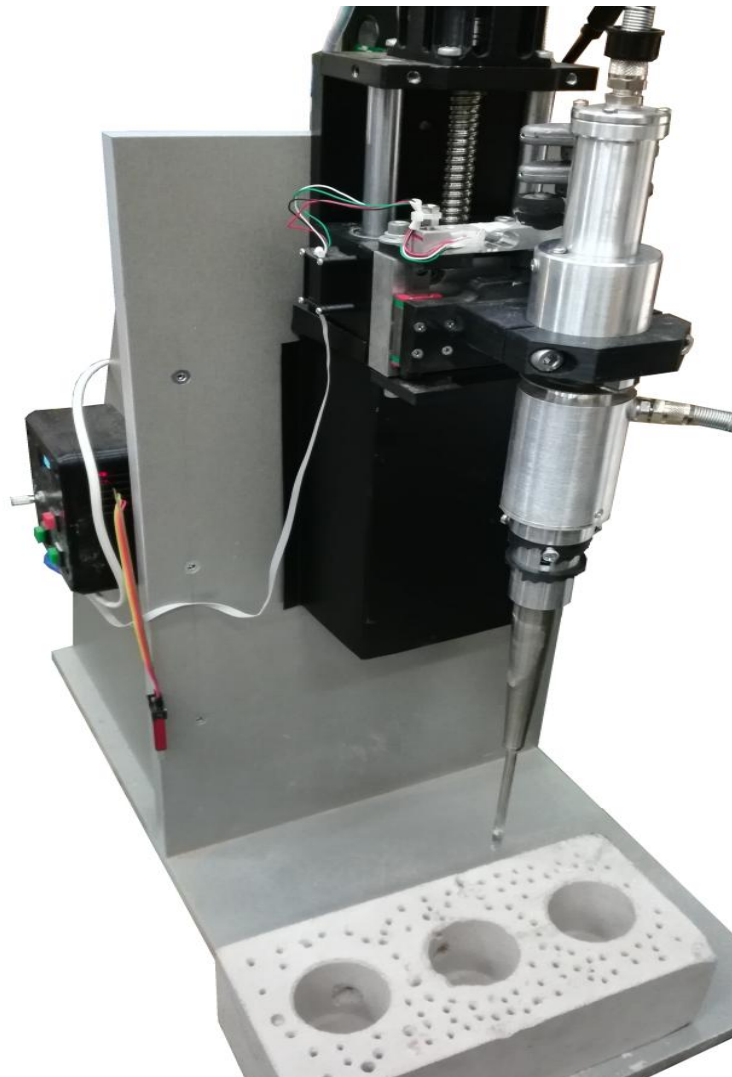
## Материалы, использованные при проведении экспериментов по ультразвуковому бурению

- Сыпучий песок
- Силикатный кирпич
- Замороженный песок – имитатор лунного грунта (размер частиц – не более 1 мм, содержание влаги по массе – 4 %)

# Аппарат для бурения имитаторов лунного грунта



# Стенд для исследования УЗ бурения



# Результаты ультразвукового бурения при дополнительных воздействиях

| Static pressure, N    | Drilling speed, mm/min |     |         |         |              |
|-----------------------|------------------------|-----|---------|---------|--------------|
|                       | DR                     | UV  | UV + DR | UV + LV | UV + LV + DR |
| <b>Silicate brick</b> |                        |     |         |         |              |
| 20                    | 4                      | 27  | 30      | 30      | 42           |
| 10                    | 2                      | 16  | 17      | 18      | 24           |
| 5                     | 2                      | 14  | 16      | 16      | 24           |
| <b>Red brick</b>      |                        |     |         |         |              |
| 20                    | 3                      | 9   | 11      | 10      | 13           |
| 10                    | 1                      | 14  | 14      | 15      | 17           |
| 5                     | 1                      | 13  | 13      | 14      | 18           |
| <b>Foam concrete</b>  |                        |     |         |         |              |
| 20                    | 11                     | 122 | 134     | 136     | 154          |
| 10                    | 10                     | 91  | 102     | 100     | 136          |
| 5                     | 5                      | 55  | 59      | 60      | 102          |

UV – ultrasonic vibrations

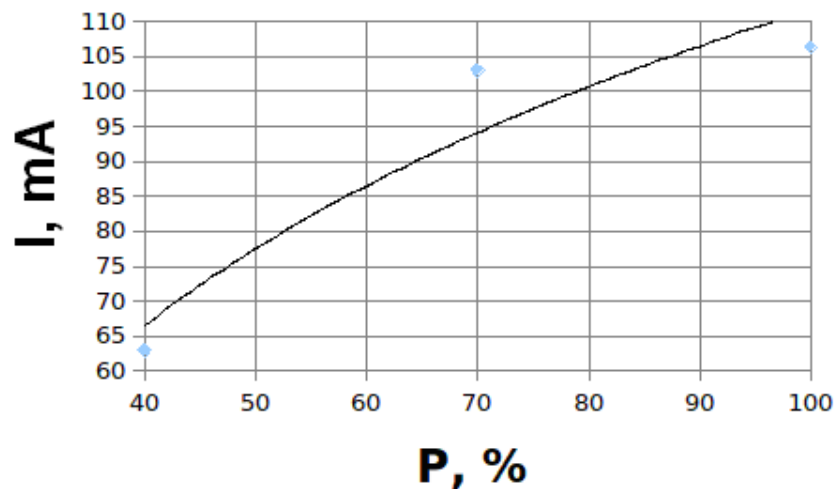
LV – low frequency shock vibrations due to additional mass

DR – pseudo-rotation

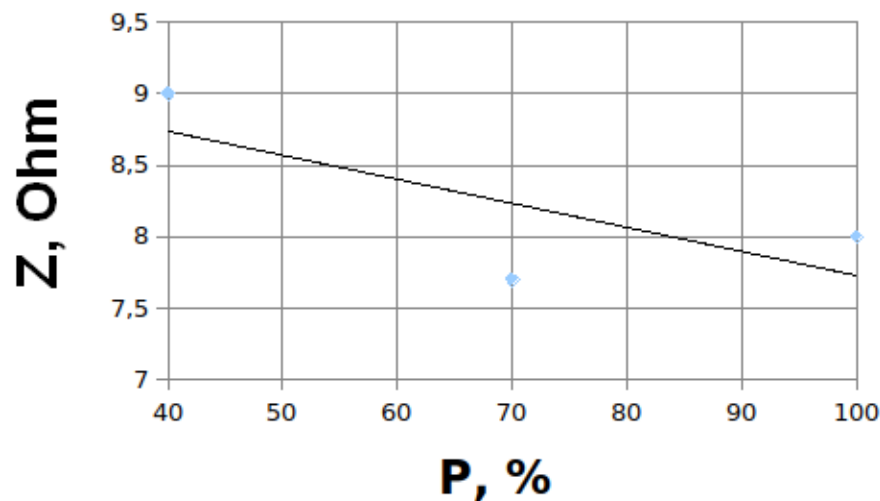
# Зависимости электрических параметров ультразвуковой колебательной системы от мощности

Материал – замерзший песок (имитатор лунного грунта),  
усилие прижима – 7,5 Н, частота – 22 кГц,  
температура –  $-70^{\circ}\text{C}$ .

Здесь и далее мощность указана в % от максимальной.  
Максимальная мощность составляет 50 Вт.



а) ток механической ветви

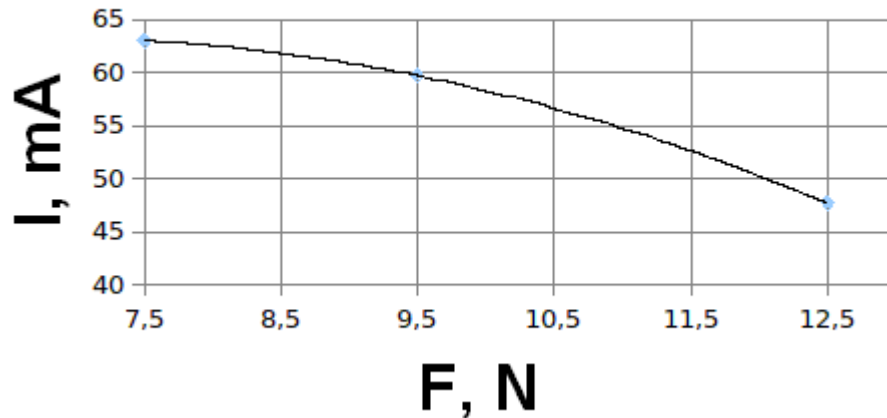


б) модуль импеданса  
механической ветви

# Зависимости электрических параметров ультразвуковой колебательной системы от усилия прижима

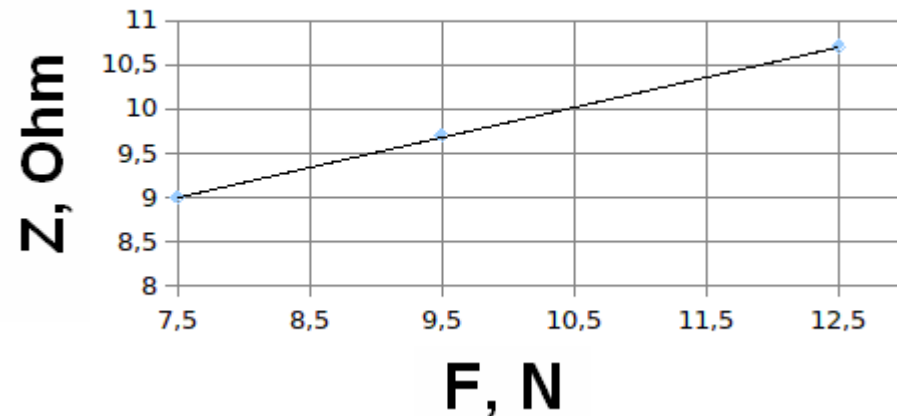
Материал – замерзший песок (имитатор лунного грунта),  
мощность – 20 Вт, частота – 22 кГц,  
температура –  $-70^{\circ}\text{C}$ .

**40%**



а) ток механической ветви

**40%**

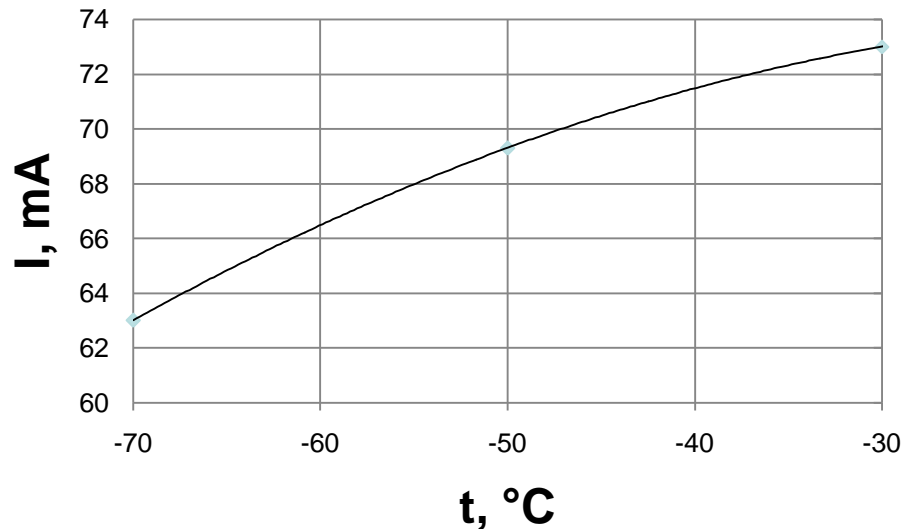


б) модуль импеданса  
механической ветви

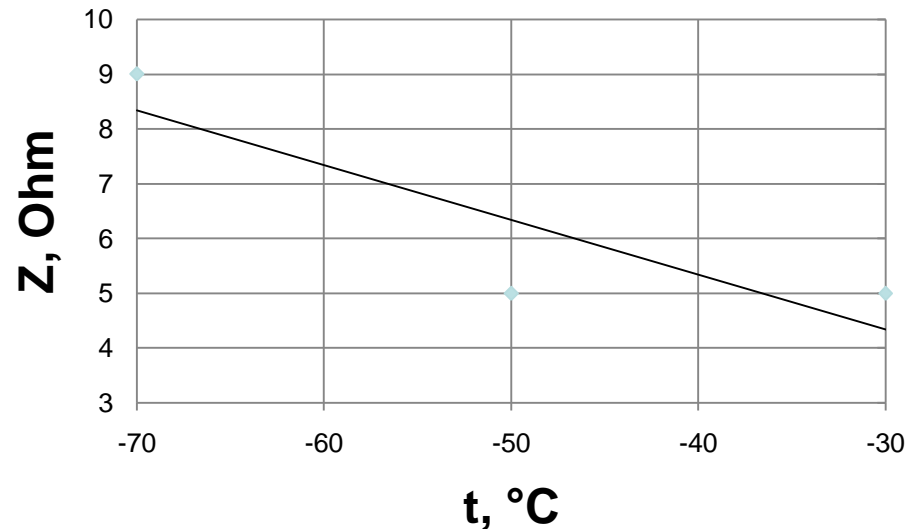
# Зависимости электрических параметров ультразвуковой колебательной системы от температуры

Материал – замерзший песок (имитатор лунного грунта),  
усилие прижима – 7,5 Н, частота – 22 кГц.

Здесь и далее мощность указана в % от максимальной. Максимальная  
мощность составляет 50 Вт.



а) ток механической ветви



б) модуль импеданса механической ветви

**Ключевая особенность воздействия – температура приводит к понижению тока механической ветви и увеличению акустического импеданса среды. Следовательно, уменьшается энергия, вводимая в озвученный материал.**

**Необходимо осуществлять дополнительное ударно-контактное воздействие с помощью присоединённой массы.**

# Влияние вещества материала на электрические параметры ультразвуковой колебательной системы



а) ток механической ветви

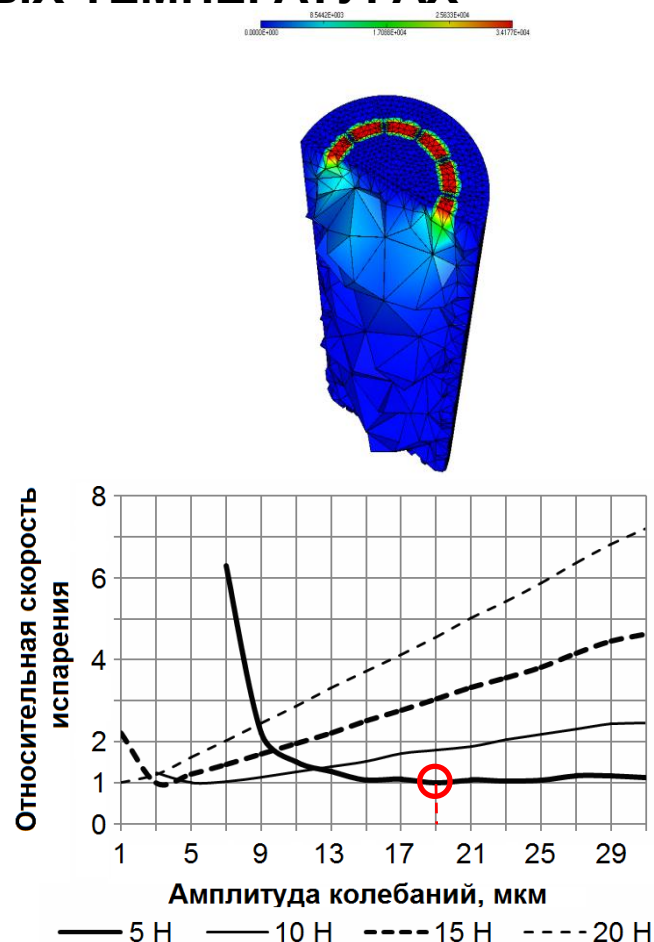
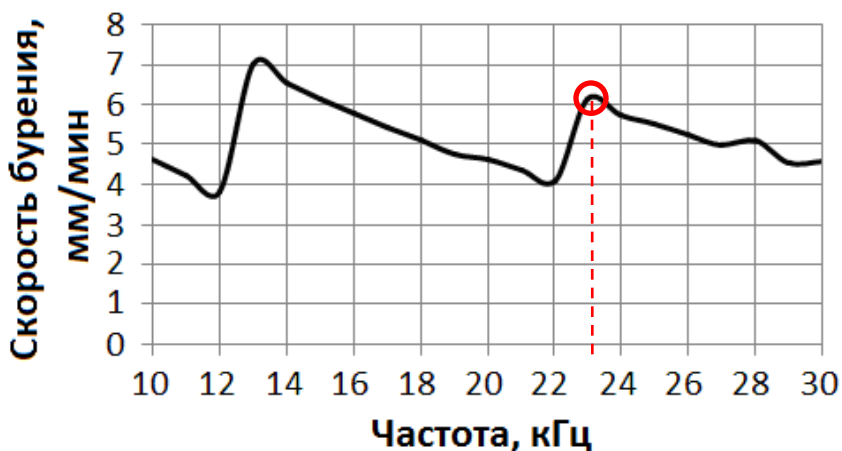
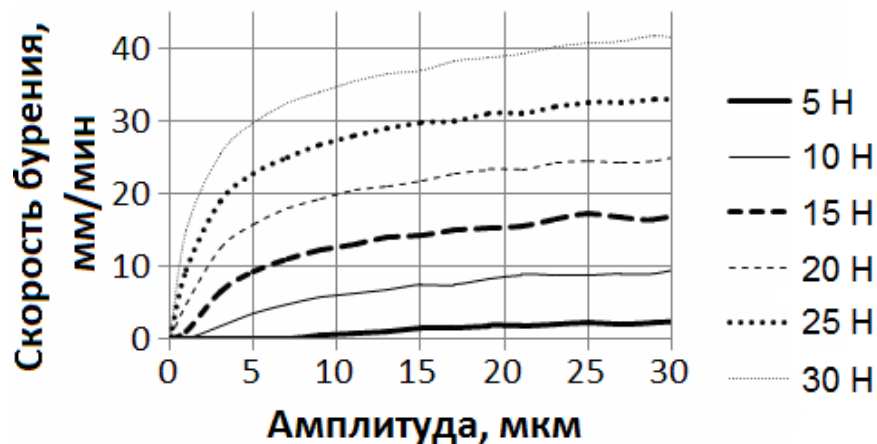


б) модуль импеданса механической ветви

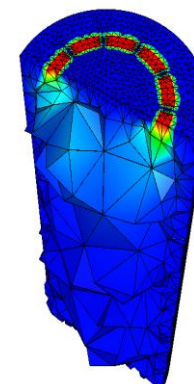
**Измерение импедансных характеристик излучателя позволяет в режиме реального времени определять тип грунта**

# Определение оптимальных режимов УЗ бурения

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАЗРУШЕНИЯ ТВЁРДОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

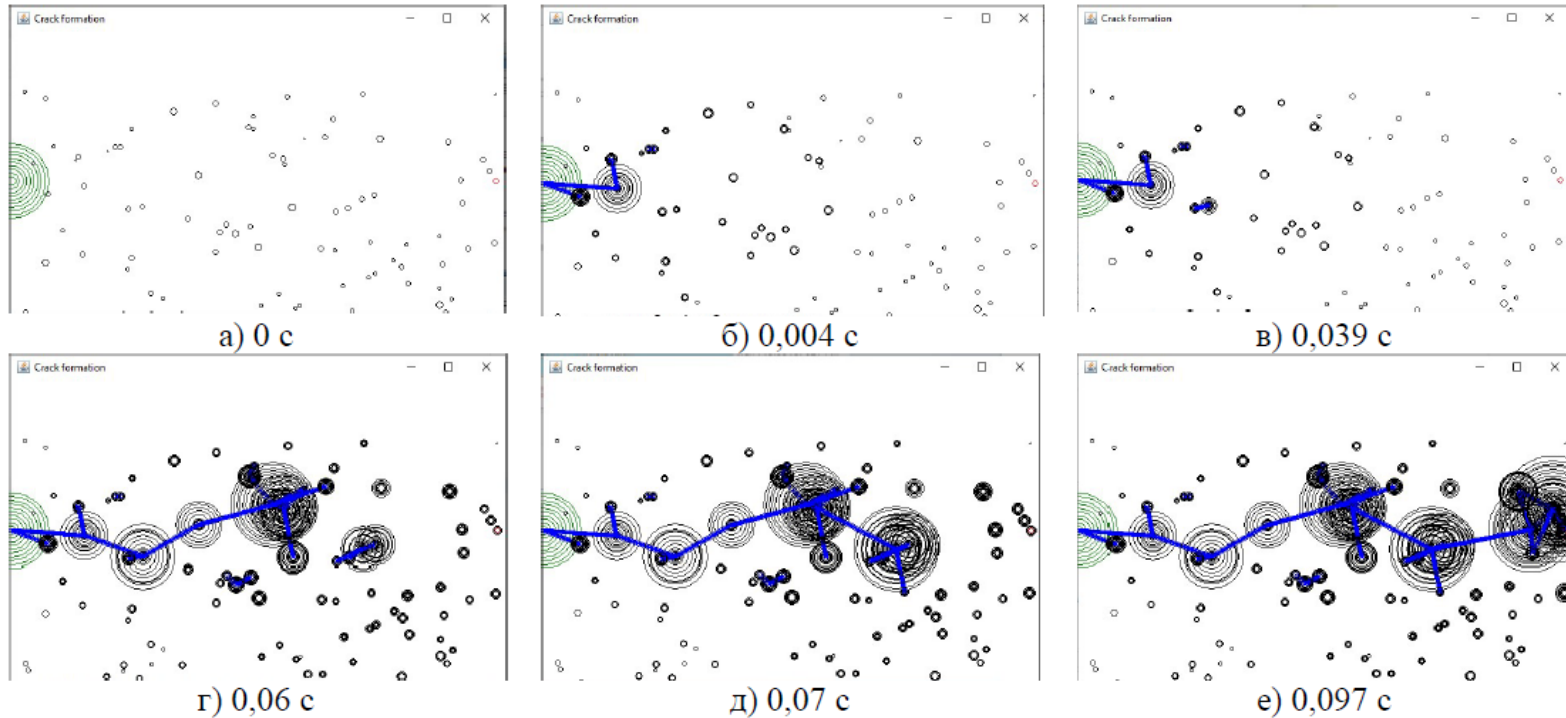


0.0002E+000 1.5442E-002 2.9131E-004 1.7088E-004 3.4177E-004

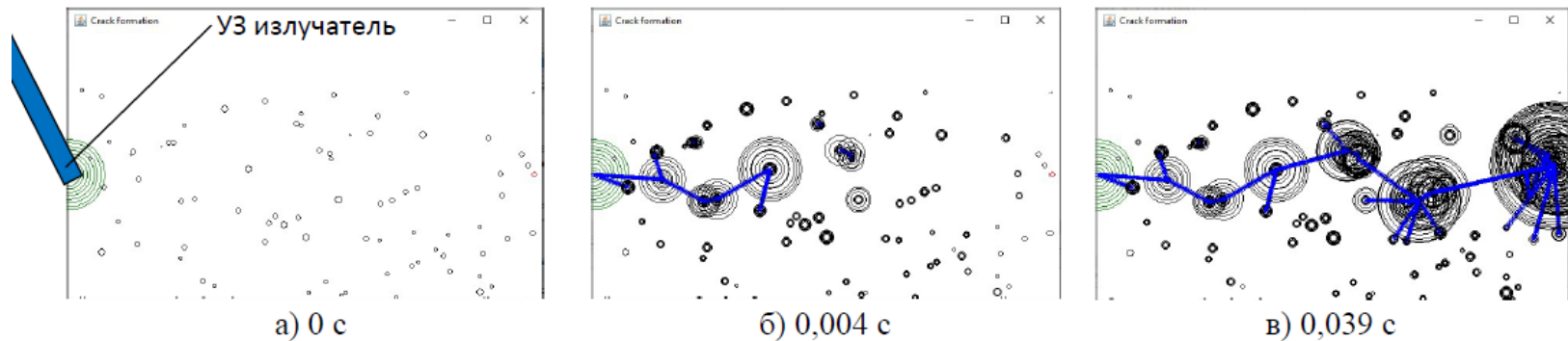


# ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ МИКРОТРЕЩИН В ТВЁРДОМ ГРУНТЕ

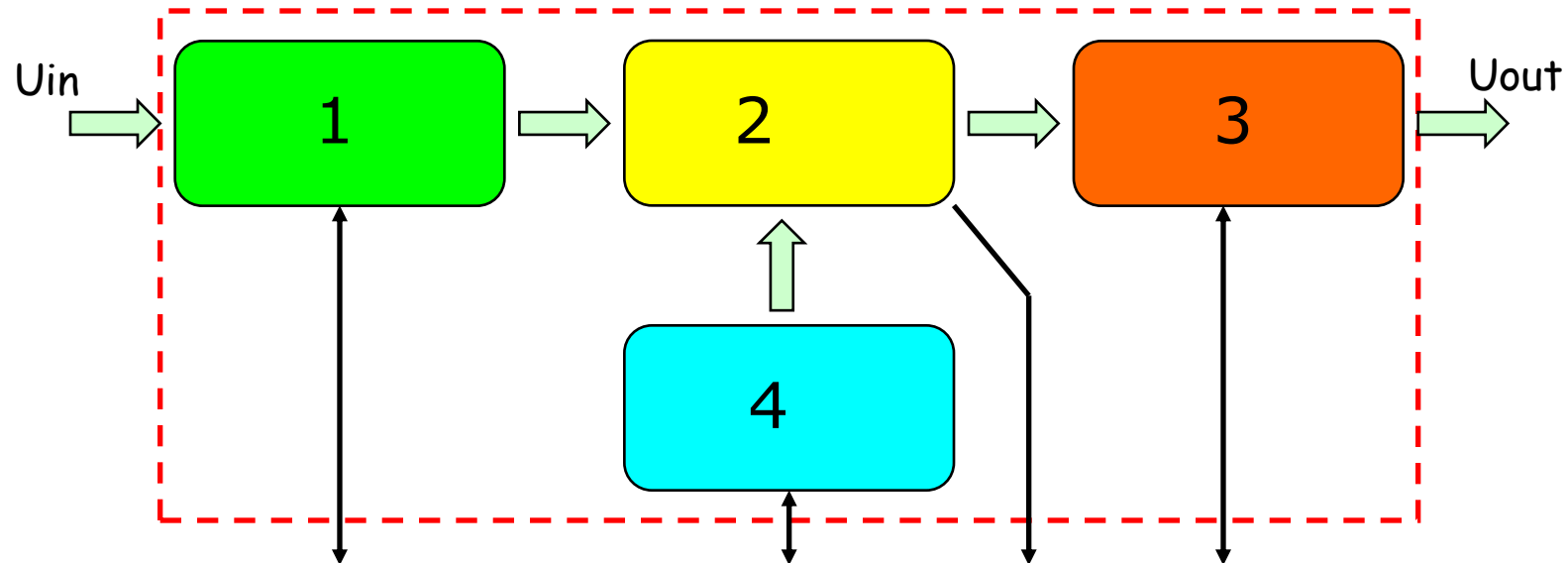
## Классическое ультразвуковое воздействие



Ультразвуковое воздействие с низкочастотными ударами (со стороны  
присоединённой свободной массы)



# Структура ультразвукового электронного генератора



**Система управления:**

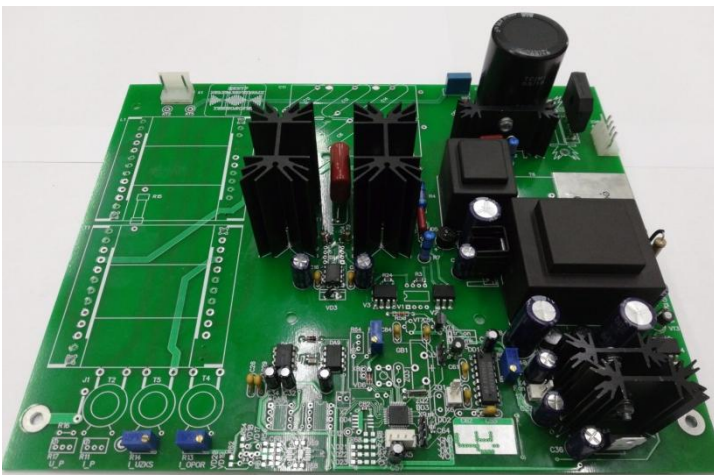
- ручная;
- автоматическая;
- автоматическая (на базе микропроцессора)

- 1 Входные силовые цепи.
- 2 ВЧ преобразователь.
- 3 Схема согласования.
- 4 Управляемый низковольтный задающий генератор

$U_{in}$ ,  $U_{out}$  - напряжение на входе и выходе генератора

# Основные функции электронной части УЗ генератора

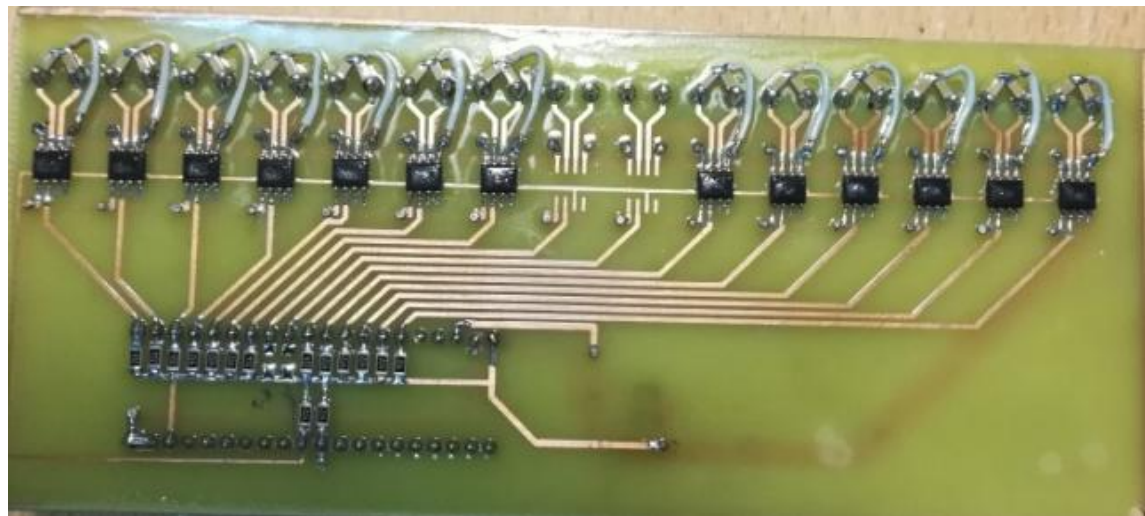
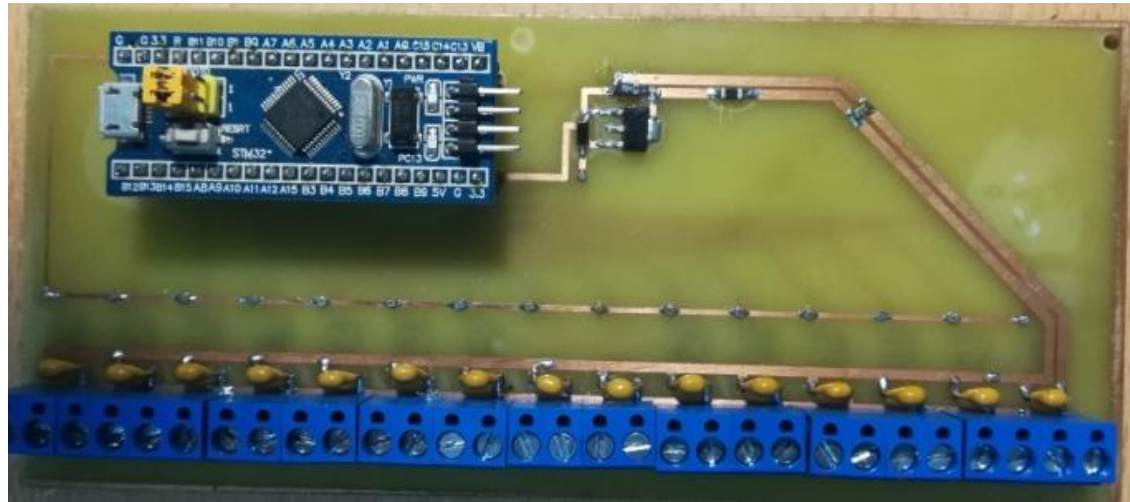
Main board



## Характеристики:

- Блок управления: микропроцессор;
- Тип микропроцессора: stm32f103;
- Система стабилизация амплитуды: задействована;
- Внешнее управление: задействовано;
- Система перезапуска при «потере» резонанса: задействована;
- Тип УЗ излучателя: пьезо;
- Источник питания : сеть переменного тока;
- Система автоматической подстройки частоты: задействована;
- Система контроля параметров УЗ излучателей: задействована;
- Система измерение мощности: задействована;

# Модуль сбора данных



# Ultrasonic drilling at low temperatures



a) 0 min



b) 0.5 min

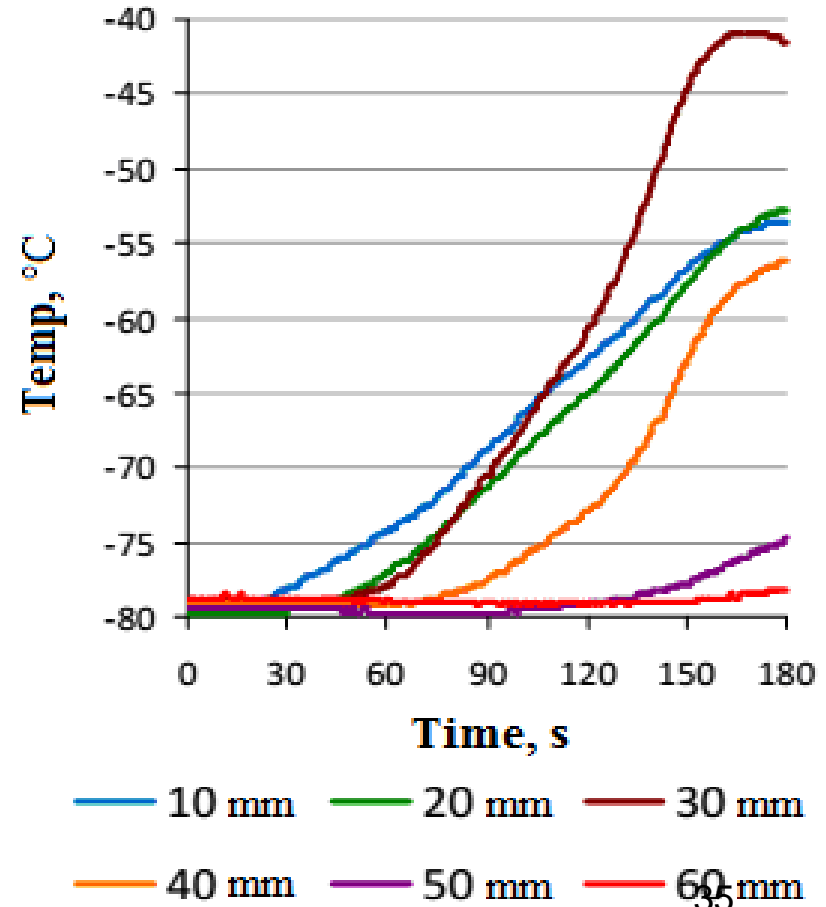


c) 1 min

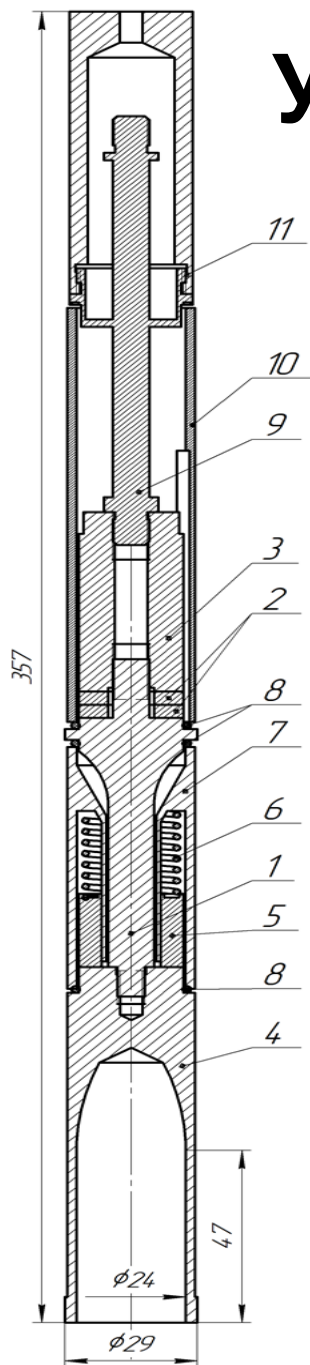


d) 2 min

Dependences of the temperature of the soil simulator on the time of ultrasonic drilling at different depths



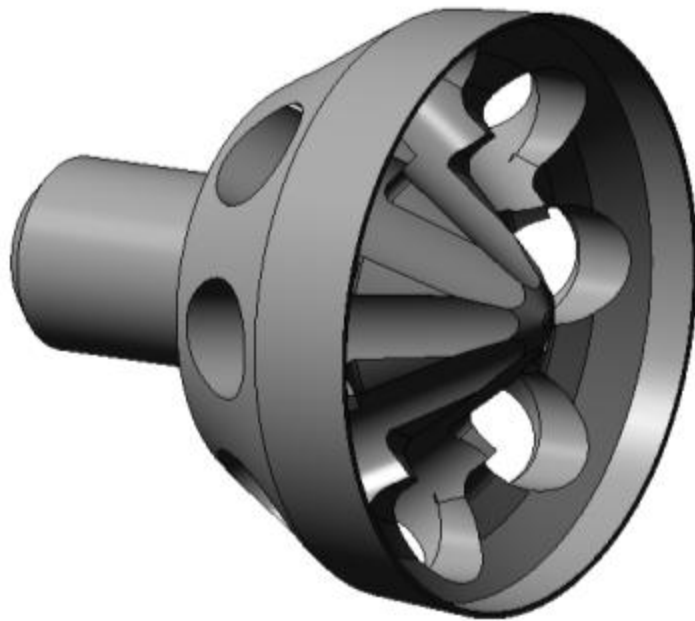
# УЗКС для бурения грунта



- 1-3 – пьезоэлектрический преобразователь;
- 4 – рабочий инструмент;
- 5 – свободная масса;
- 6 – пружина;
- 7 – корпус концентратора;
- 8 – кольцевые резиновые уплотнители;
- 9 – полуволновой резонансный шток;
- 10 – корпус преобразователя;
- 11 – кронштейн

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

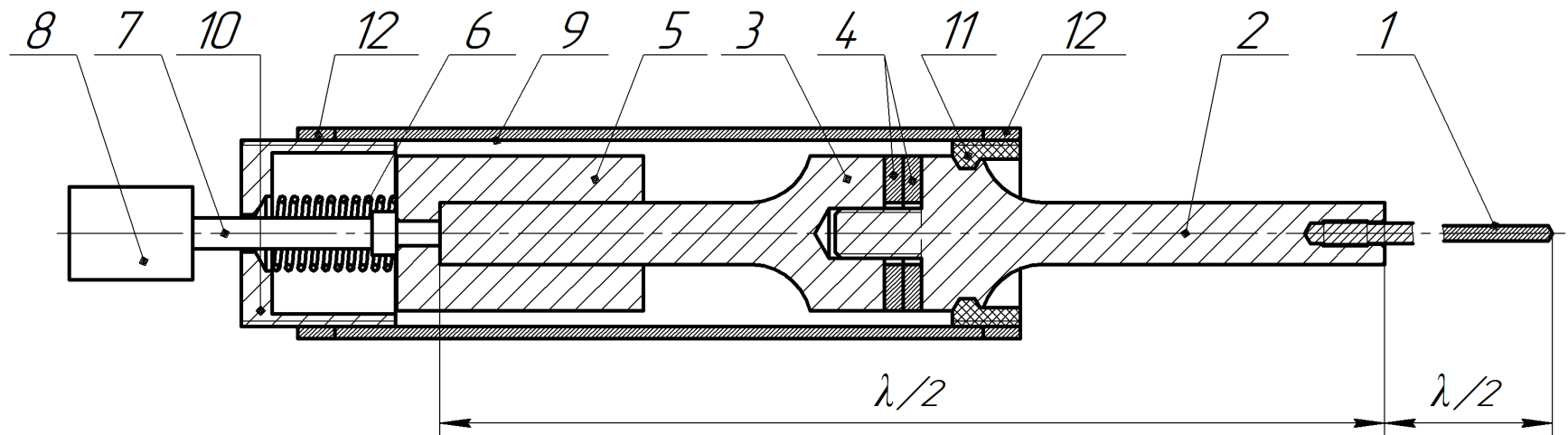
# Разработка рабочих инструментов для бурения грунта и обработки сред



## Особенности:

- Наружная режущая часть для формирования канала
- Внутренняя рабочая полость для дополнительного разрушения грунта
- Отверстия для выхода измельченного грунта из рабочей полости

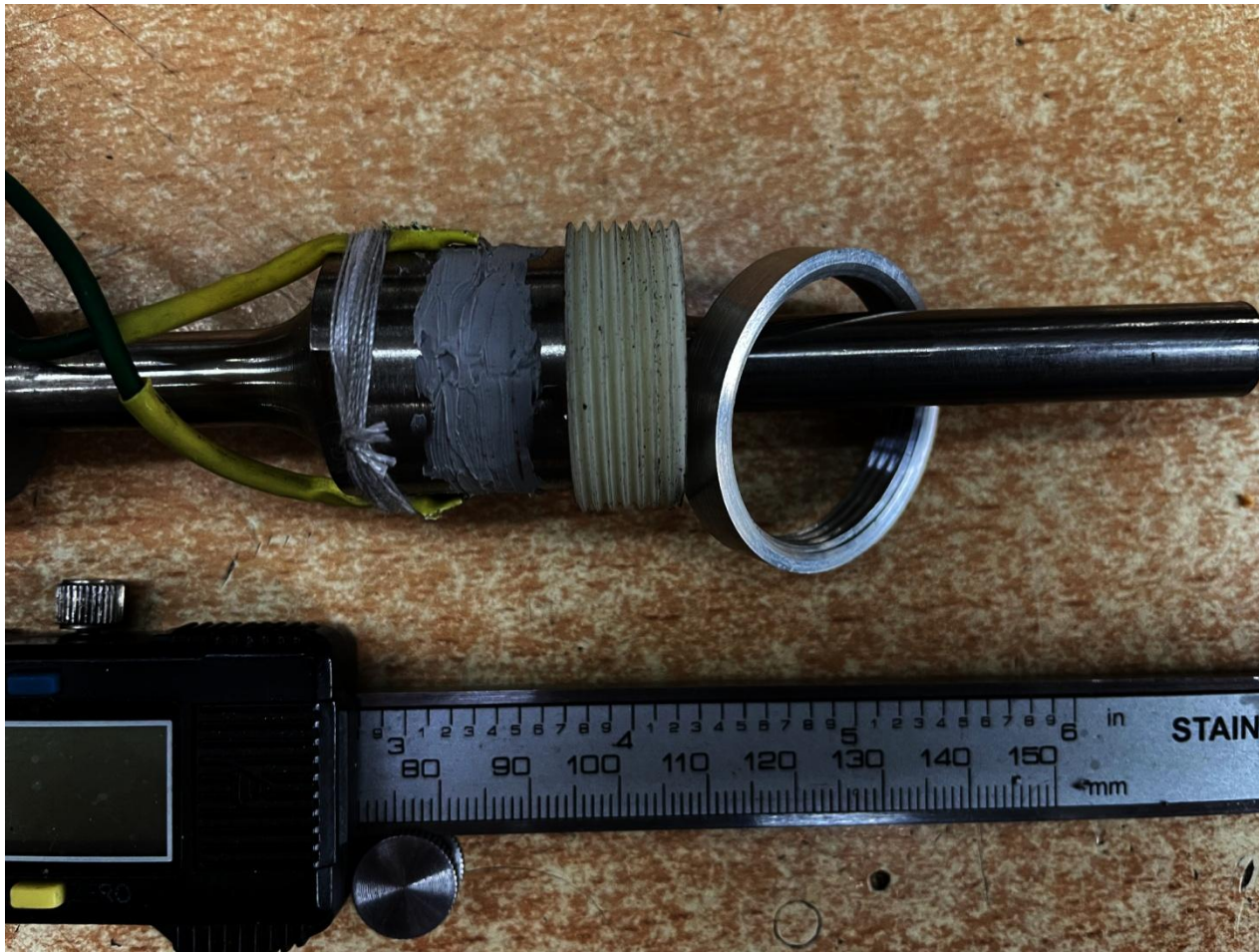
# Малогабаритный УЗ бур



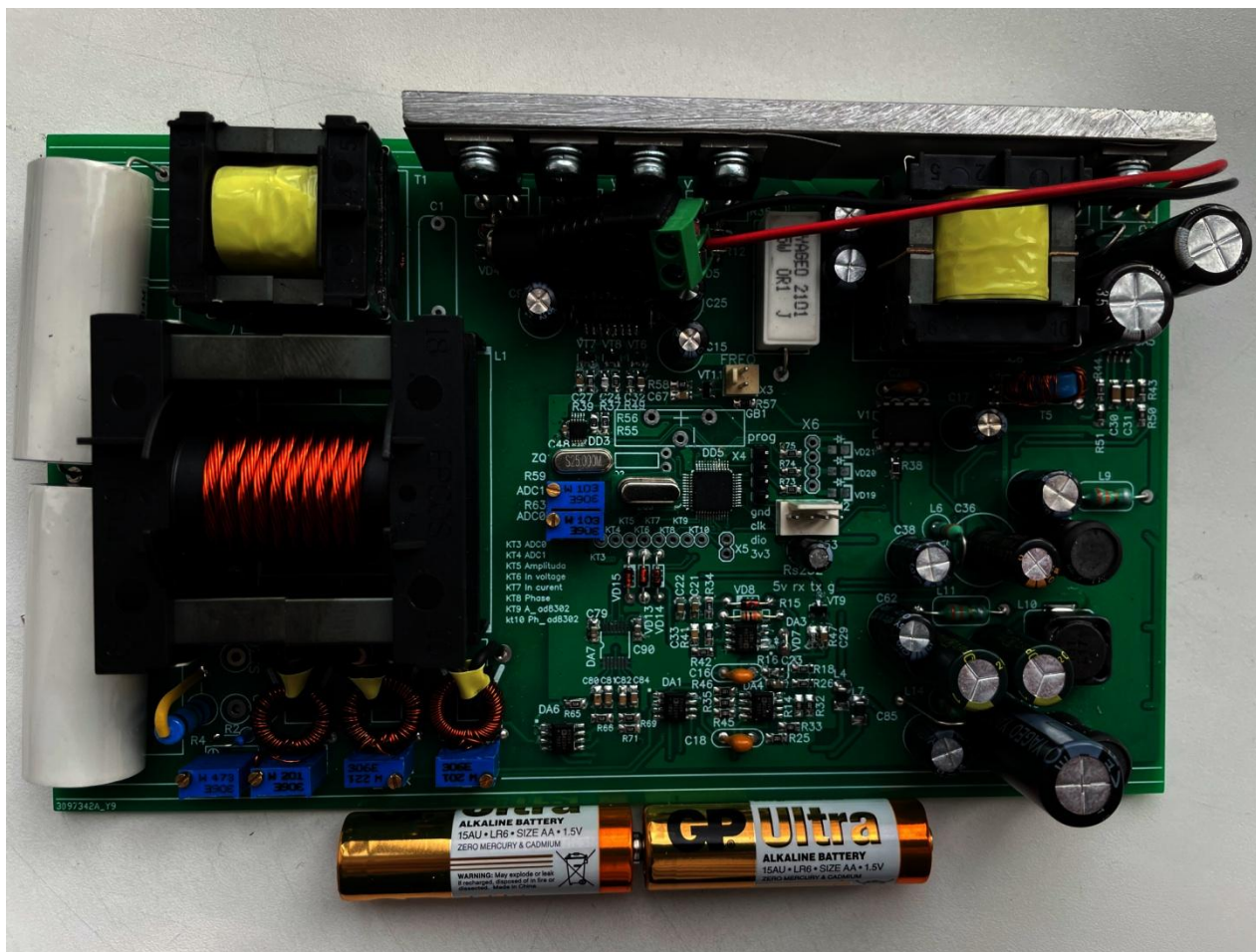
# Внешний вид УЗ бура



# Конструкция УЗ бура



# Плата электронного генератора



# Комплект бурильного устройства

