

# Электроимпульсное бурение горных пород

Доцент отд. материаловедения Юдин А.С.



School of Advanced  
Manufacturing  
Technologies

TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY



# План

- История открытия ЭИ эффекта «Воробьевых»
- Принцип ЭИ эффекта
- Гипотезы объяснения ЭИ эффекта
- Расчет количественных параметров процесса разрушения
- Коллективы и работы в области ЭИ бурения
- Современное состояние исследований

# Эффект «Воробьевых»



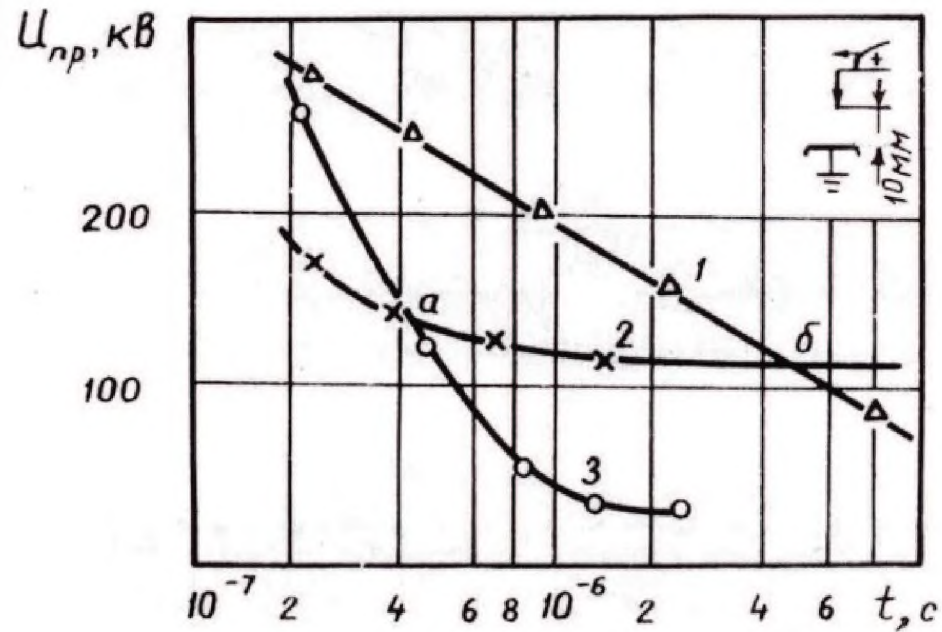
Воробьев  
Александр  
Акимович –,  
ректор ТПИ



Воробьев  
Григорий  
Абрамович – проф.,  
зав каф.  
физической  
электроники  
ТИАСУР

Чепиков  
Александр  
Тимофеевич –  
проф., зав каф.,  
электрических  
станций ТПУ

# Эффект «Воробьевых»

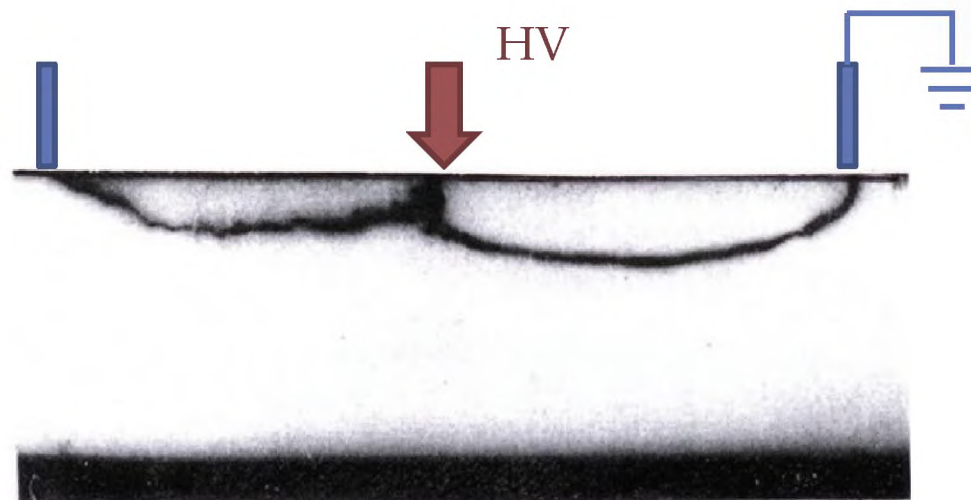


Вольт-секундные характеристики\*:

- 1) трансформаторное масло;
- 2) фторопласт;
- 3) техническая вода

\* Чепиков А.Т. Исследование разрушения горных пород импульсными электрическими разрядами: дис. канд. техн. наук. – Томск, 1961. – 268 с.

# Эффект «Воробьевых»



Фотография каналов электрического пробоя в образце фторопласта-4 толщиной 20 мм, погруженного в трансформаторное масло\*.

Электроды «стержень в центре кольца» расположены на одной поверхности образца с промежутком 30 мм

\* Чепиков А.Т. Исследование разрушения горных пород импульсными электрическими разрядами: дис. канд. техн. наук. – Томск, 1961. – 268 с.

# Эффект «Воробьевых»



(19) **SU** (11) **237 073** (13) **A1**

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО  
ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ  
(51) МПК

**E21C 37/18 (2000.01)**

(12) **ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ СССР**

Статус: нет данных

(21)(22) Заявка: **714579/03**, **14.04.1959**

(45) Опубликовано: **10.04.2004** Бюл. № 10

(72) Автор(ы):

**Воробьев А.А.,**

**Воробьев Г.А.,**

**Могилевская Т.Ю.,**

**Чепиков А.Г.**

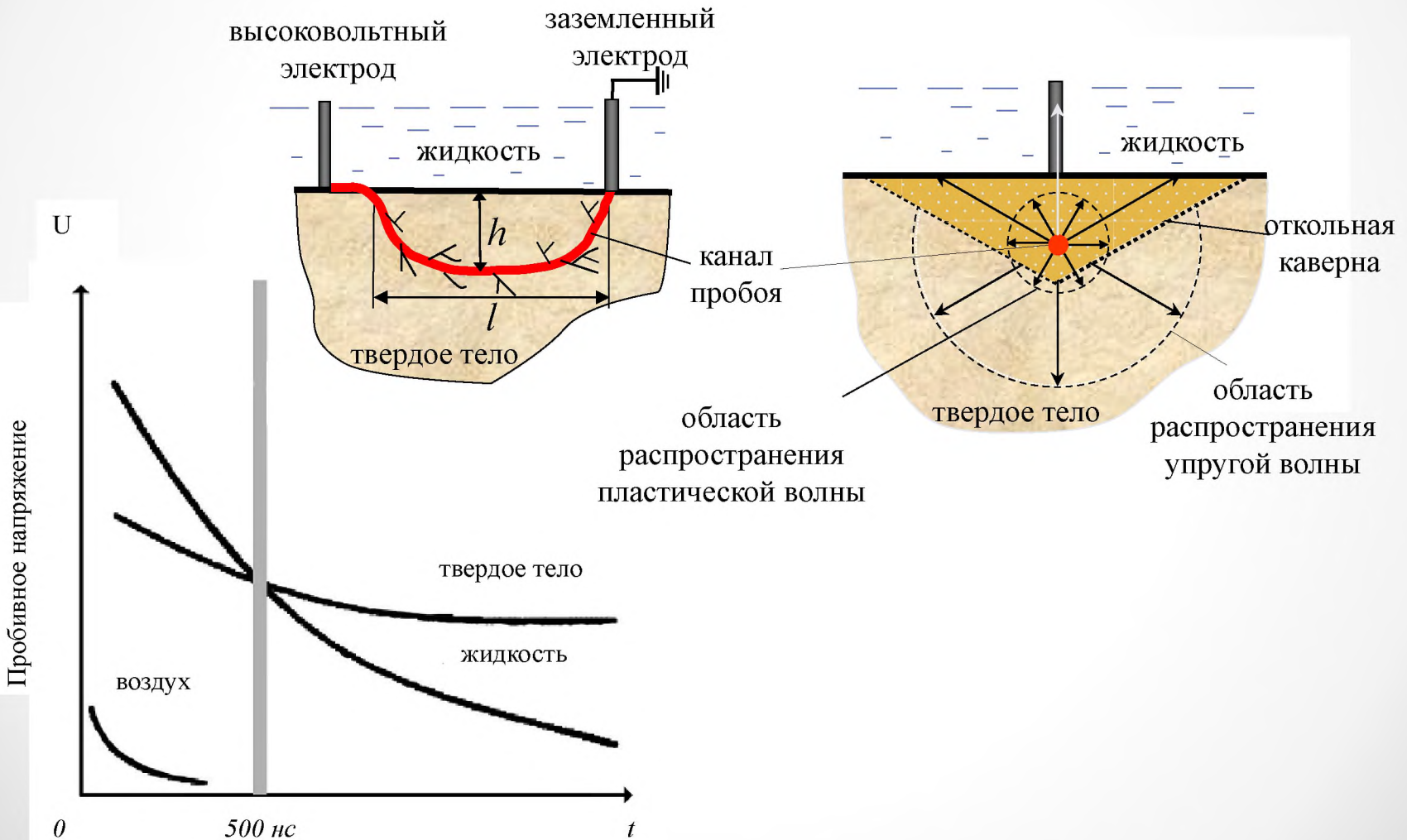
(54) **СПОСОБ БУРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ИМПУЛЬСНЫМИ РАЗРЯДАМИ**

## Формула изобретения

Способ бурения электрическими импульсными разрядами, отличающийся тем, что для разрушения породы разряд осуществляют в буримом твердом теле под слоем жидкости, например воды, трансформаторного масла и др., со временем нарастания напряжения импульса до пробоя менее  $5 \cdot 10^{-6}$  с.

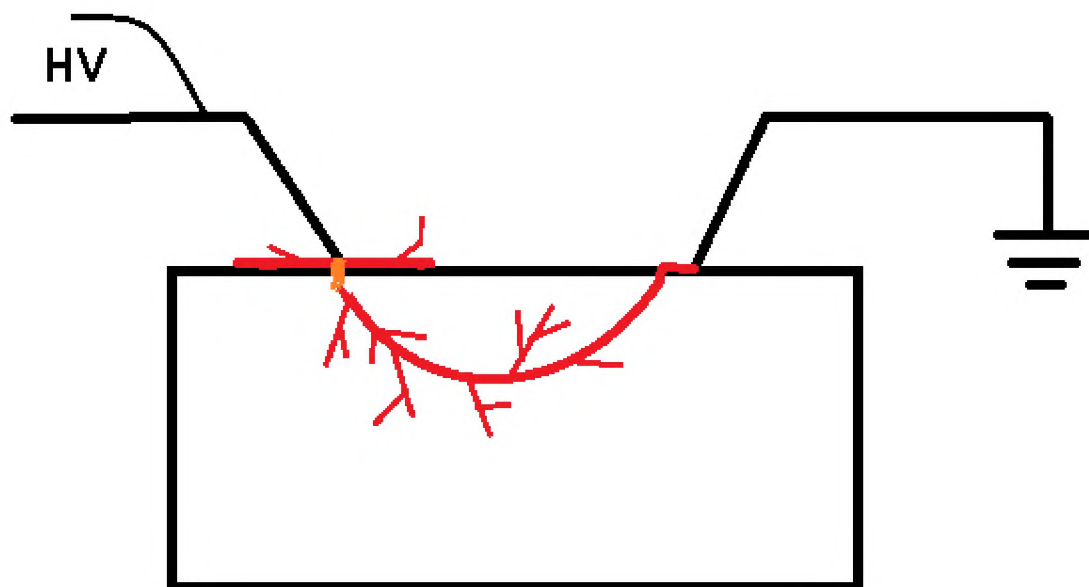
\*свидетельство № 237073 с приоритетом от 14 апреля 1959 г.

# Принцип ЭИ эффекта



# Гипотезы

**Гипотеза 1\*** - ток смещения плазмы поверхностного разряда, проходящий через микровыступ на электроде, приводит к его взрыву, образованию струи металлической плазмы, которая внедряется в твердый диэлектрик, и приводит к развитию разряда внутри него.

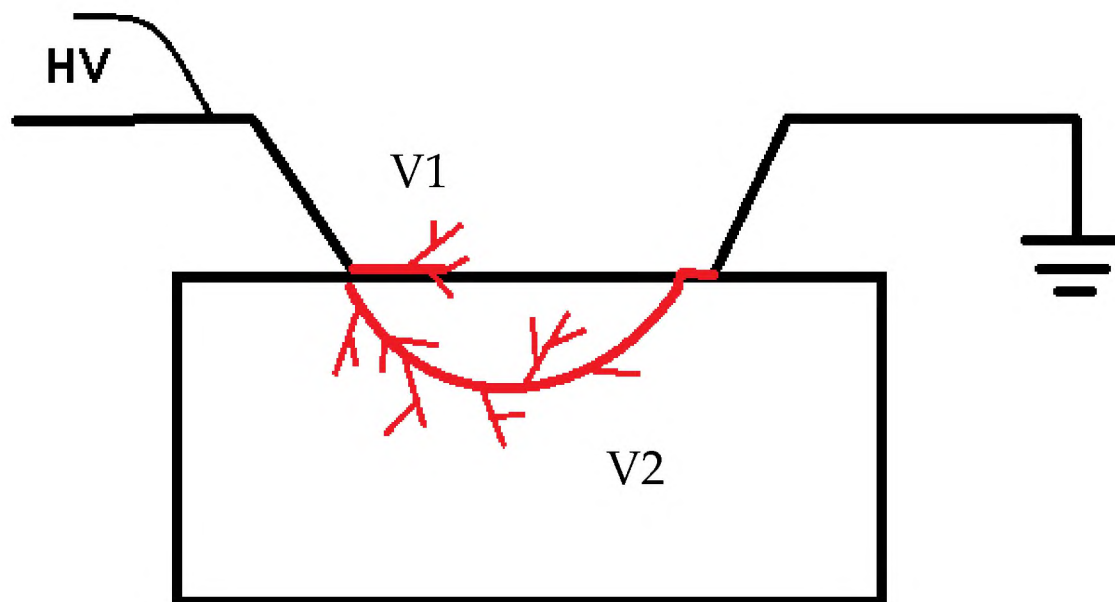


\* Месяц Г.А. О природе «эффекта Воробьевых» в физике импульсного пробоя твердых диэлектриков // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31. – вып. 24. – С. 51–59.



# Гипотезы

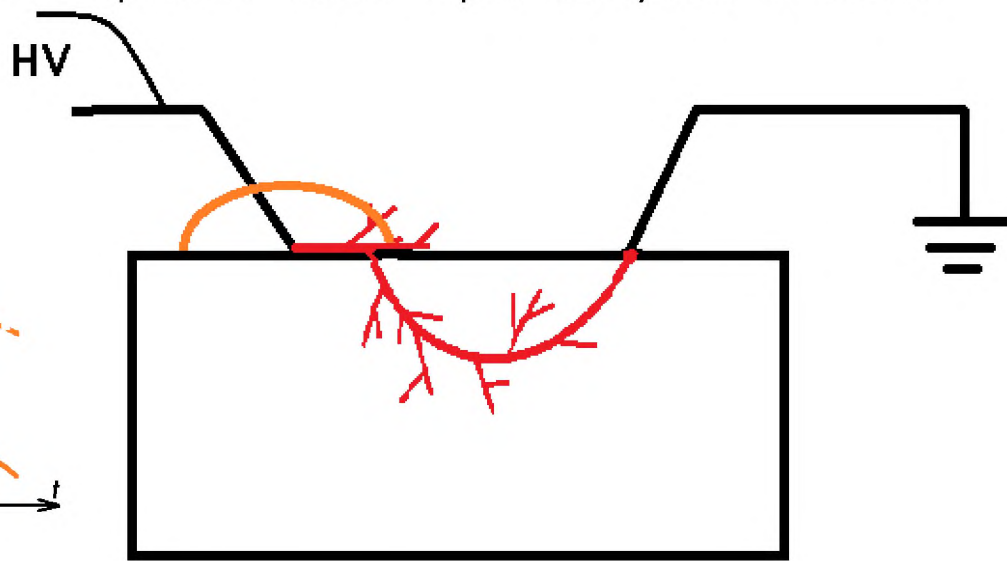
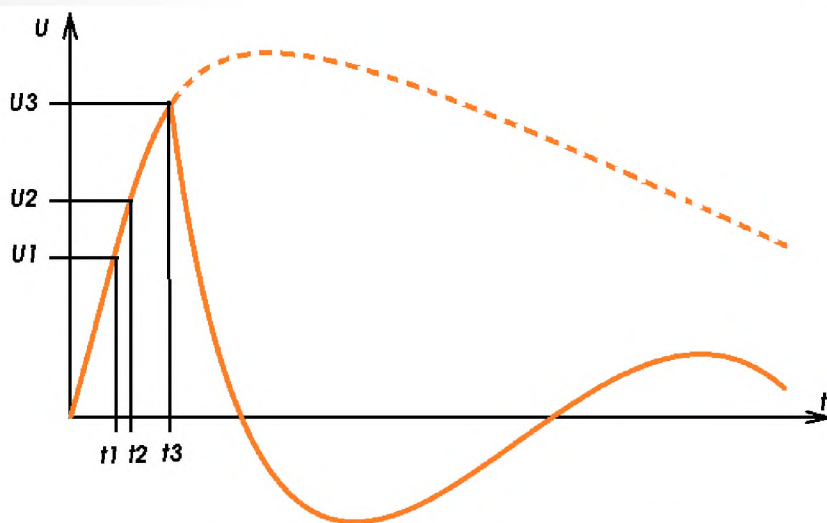
**Гипотеза 2\*** - за счет различных скоростей развития разряда в жидкости на границе раздела с твердым диэлектриком ( $\sim 8,3 \cdot 10^6$  см/с) и в твердом диэлектрике ( $\sim$  от  $14 \cdot 10^6$  до  $26 \cdot 10^6$  см/с), разряд развивающийся одновременно и в жидкости и в твердом диэлектрике переключает промежуток в нем раньше чем в жидкости).



\* Семкин Б.В., Усов Ю.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. – СПб.: Наука, 1995. – 276 с.

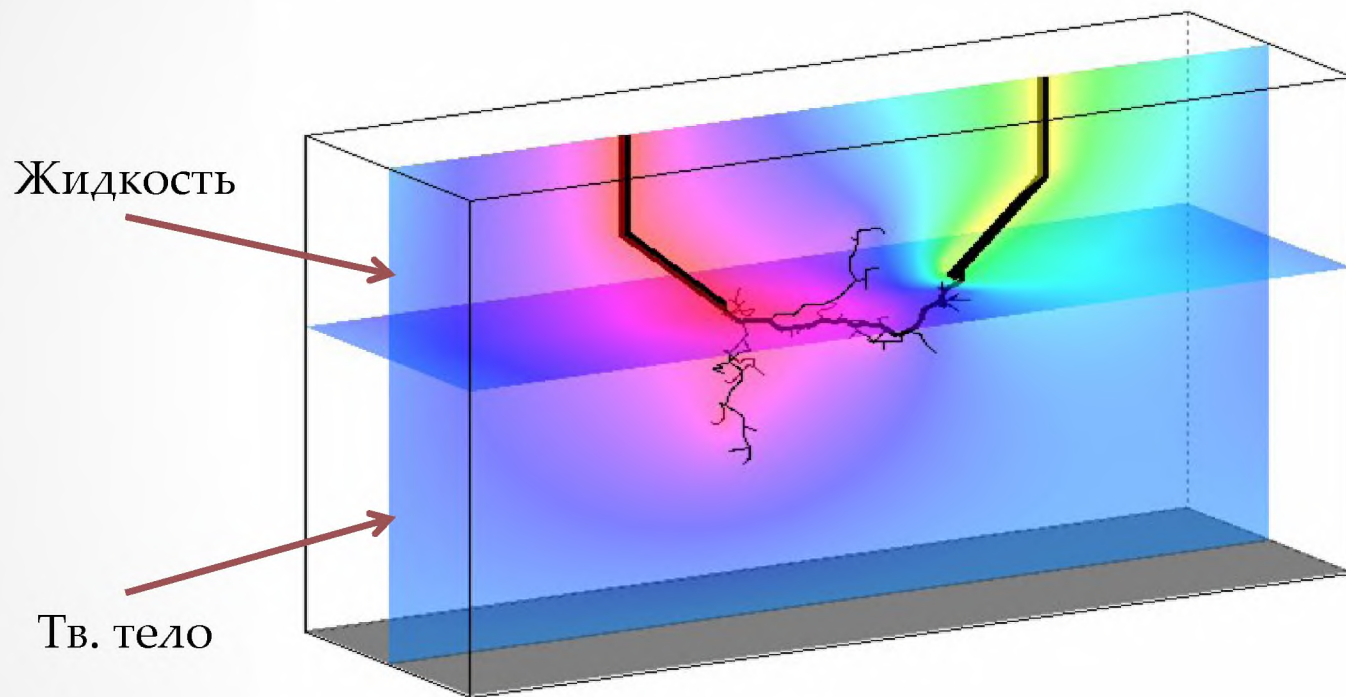
# Гипотезы

**Гипотеза 3\*** - Во время подъема напряжения разряд образуется сначала в жидкости на границе раздела сред, и это приводит к образованию объемного заряда вокруг потенциального электрода, происходит ослабление поля и торможение развития разряда в жидкости, при этом при все возрастающем напряжении с головки одного из лидеров с максимальной напряженностью поля происходит внедрение разряда в твердое тело и за счет большей скорости развития разряда в твердом теле промежуток в нем перекрывается раньше.



\* Воробьев Г.А., Чепиков А.Т., Важов В.Ф. Критерий внедрения канала разряда в твердый диэлектрик, помещенный в изолирующую жидкость // Известия вузов. Физика. – 1998. – Т. 41. – № 12. – С. 110–113.

# Принцип ЭИ эффекта

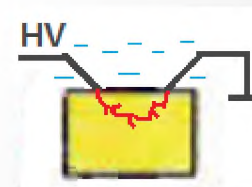


# Терминология

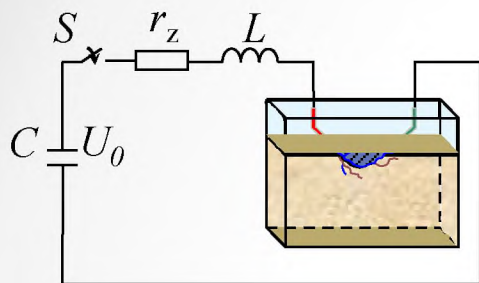
**Пробой (электрический)** – резкое возрастание силы тока в твёрдом, жидком или газообразном диэлектрике (потеря электрической прочности), возникающее при приложении напряжения выше критического (напряжения пробоя).

**Перекрытие изоляции (поверхностный пробой)** – пробой, возникающий на границе раздела двух различных диэлектриков, обычно в сочетании твердый диэлектрик - газ.

**Электроимпульсное бурение** основано на разрушении горной породы электрическим разрядом (пробоем) под воздействием высокого напряжения (амплитудой порядка  $10^5$  В), происходящим в приповерхностной зоне забоя скважины, заполненной жидким диэлектриком (чаще - масло, дизельное топливо, реже - вода).



# Уравнения электротехники



Электрическая схема разряда

**Уравнения  
Кирхгофа:**

$$\left[ L \frac{di}{dt} + (r_z + R_c) \cdot i = U, \quad \frac{dU}{dt} = - \frac{i}{C} \right]$$

$C$  емкость

$U$  напряжение

$i$  ток

$R_c$  сопротивление канала

$r_z$  сопротивление

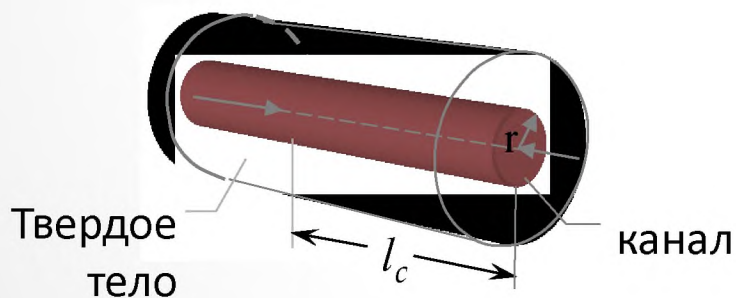
$L$  индуктивность

**Начальные условия:**

$$i_{t=0} = 0, \quad U_{t=0} = U_0, \quad W_g = CU_0/2$$

Энергия в разрядном канале

$$W_c(t) = \int_0^t i^2(t) \cdot R_c(t) dt$$



# Баланс энергии в канале разряда

$$\frac{dW_c}{dt} = \frac{dA_c}{dt} + \frac{dE_{pc}}{dt}$$

$$dA_c = P_c \cdot dV_c$$

Работа канала разряда

$P_c$

Давление в канале

$$E_{pc} = \frac{1}{\gamma - 1} P_c \cdot V_c$$

Энергия плазмы

$$V_c = \pi r_c^2 \cdot l_c$$

Объем канала разряда

$r_c$

Радиус канала

$$\eta_w = \frac{A_c(t)}{CU_0^2 / 2}$$

Коэффициент преобразования энергии в энергию ударной волны

$$\eta_c = \frac{W_c(t)}{CU_0^2 / 2}$$

Коэффициент преобразования энергии во внутреннюю энергию плазмы

# Уравнения сплошной среды

Уравнения движения

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y} = \rho \dot{x}, \quad \frac{\partial T_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = \rho \dot{y}, \quad \sigma_{xx} = S_{xx} - P,$$

$$\sigma_{yy} = S_{yy} - P, \quad \sigma_{zz} = S_{zz} - P,$$

Уравнения  
неразрывности

$$\frac{\dot{V}}{V} = \frac{\partial \dot{x}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{y}}{\partial y},$$

Уравнения баланса  
энергии

$$\dot{e} = -P\dot{V} + V \cdot (S_{xx} \cdot \dot{\epsilon}_{xx} + S_{yy} \cdot \dot{\epsilon}_{yy} + T_{xy} \cdot \dot{\epsilon}_{xy}),$$

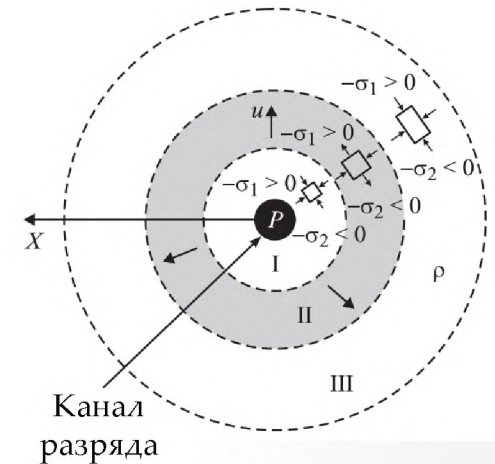
Компоненты  
девиатора  
напряжений

$$\dot{S}_{xx} = 2\mu \left( \dot{\epsilon}_{xx} - \frac{1}{3} \frac{\dot{V}}{V} \right) + \delta_{xx}, \quad \dot{S}_{yy} = 2\mu \left( \dot{\epsilon}_{yy} - \frac{1}{3} \frac{\dot{V}}{V} \right) + \delta_{yy}$$

$$\dot{S}_{zz} = -\frac{2}{3} \mu \frac{\dot{V}}{V}, \quad \dot{T}_{xy} = \mu \cdot \dot{\epsilon}_{xy} + \delta_{xy},$$

Компоненты скорости

$$\dot{\epsilon}_{xx} = \frac{\partial \dot{x}}{\partial x}, \quad \dot{\epsilon}_{yy} = \frac{\partial \dot{y}}{\partial y}, \quad \dot{\epsilon}_{xy} = \frac{\partial \dot{y}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{x}}{\partial y},$$

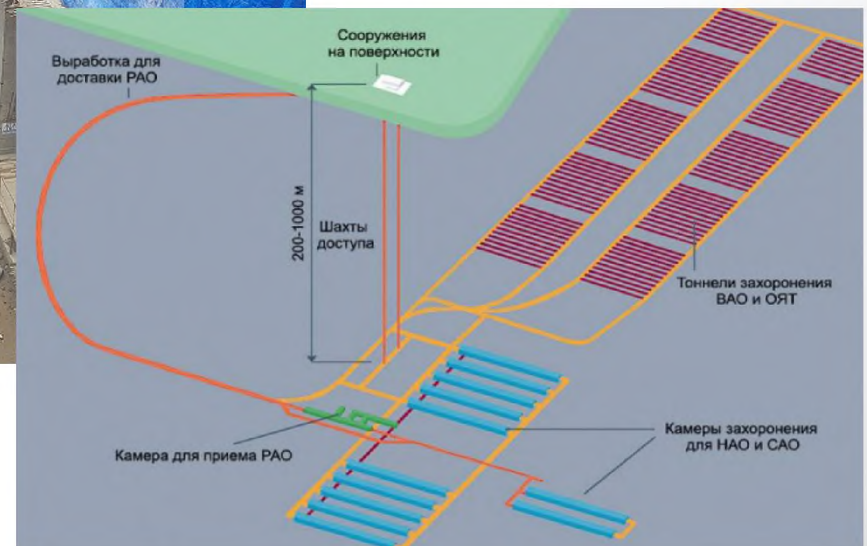
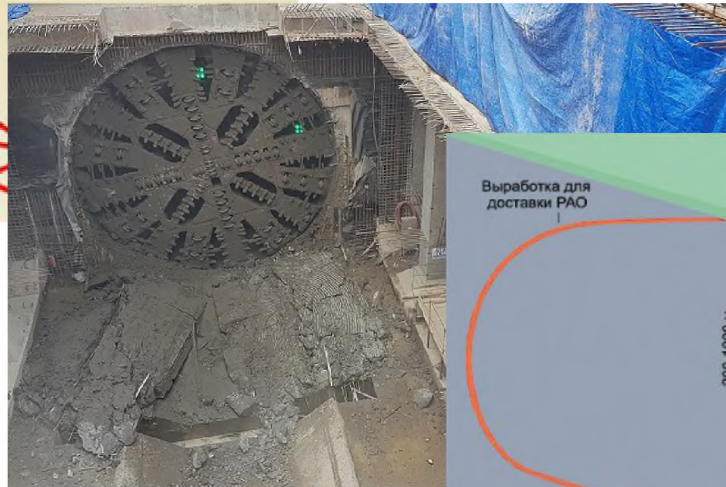
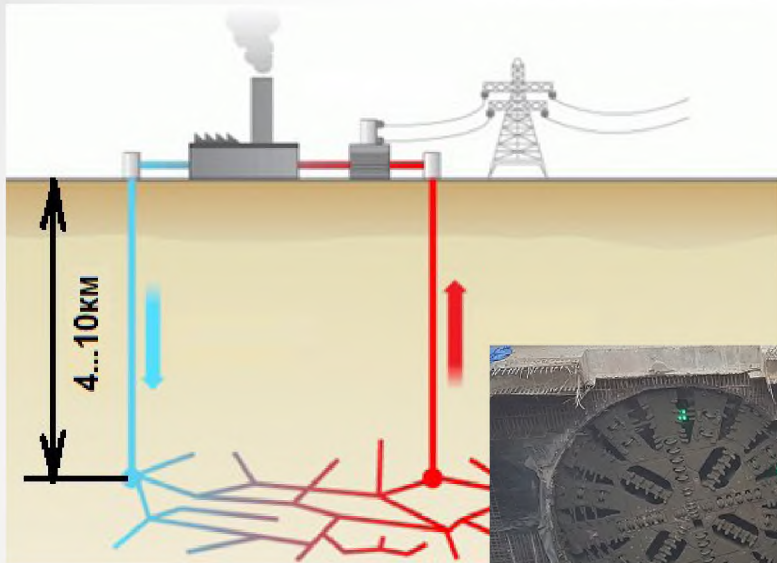


Ударно-  
волновая  
динамика

# Мотивация

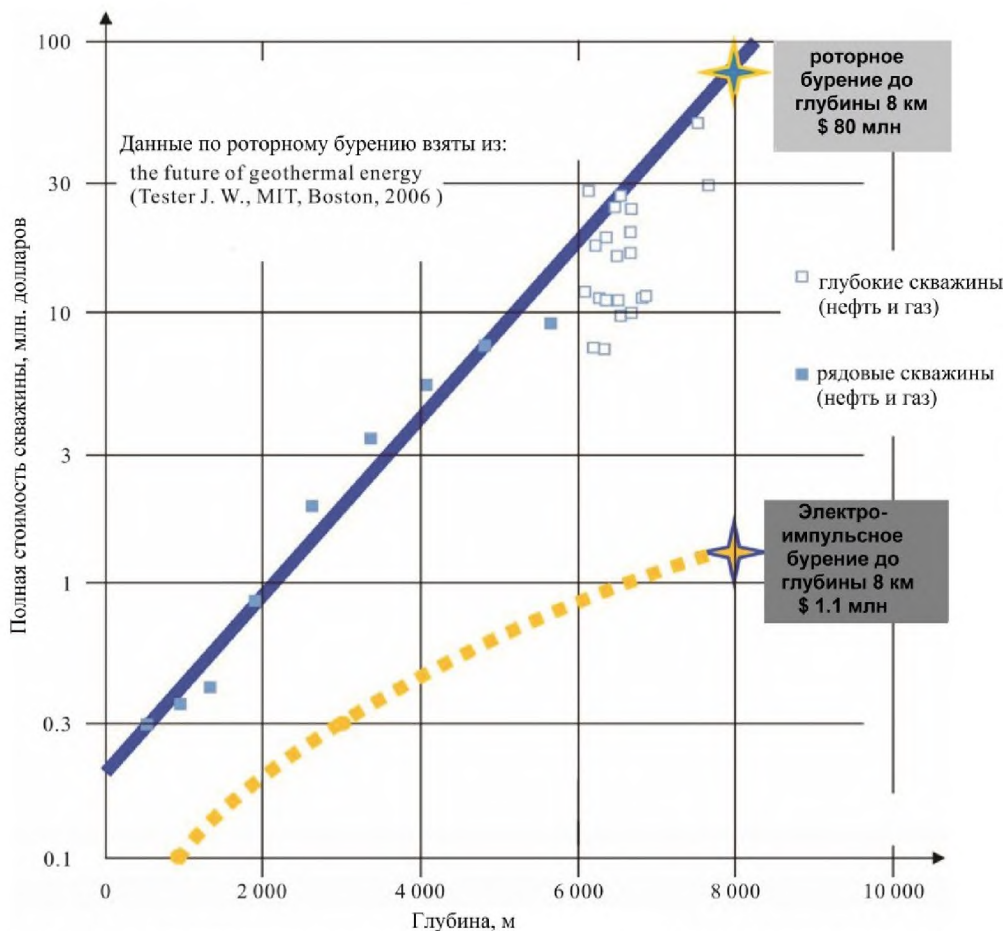
Бурение скальных массивов для строительства:

- скважин геотермальной энергетики;
- тоннелей;
- резервуаров для захоронения ОЯТ;





# Актуальность и перспективы



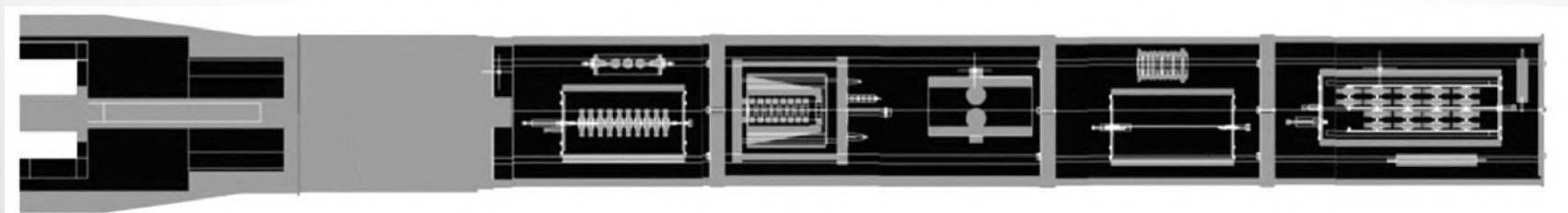
Перспективный способ бурения глубоких (3-5 км) и сверхглубоких (5-10 км) скважин в крепких горных породах для развития геотермальной и петротермальной энергетики.

**График сравнения стоимости традиционного роторного бурения и перспективной технологии электроимпульсного бурения в кристаллических горных породах\*.**

\*Hans O. Schiegg, Arild Rødland, Guizhi Zhu, David A. Yuen, Electro-Pulse-Boring (EPB): Novel Super-Deep Drilling Technology for Low Cost Electricity // Journal of Earth Science, Vol. 26, No. 1, p. 037-046, 2015)



Высоковольтный полигон электроимпульсного бурения КНЦ РАН



Макет погружного генератора высоковольтных импульсов (ПГВВИ)  
для электроимпульсного бурения скважин

\*Потокин А.С. Перспективность использования электроимпульсного способа бурения скважин для  
● повышения коэффициента отдачи нефти // Сборник статей «Булатовские чтения» - 2018 с. 221-224 ●

# Институт угля СО РАН, г. Кемерово\*



Буровой наконечник диаметром 2 м

Бурение в условиях шахты «Объединенная»  
ПО «Торезантрацит» 1989 г. (Донецк)

Коваленко Н.Е. – рук.  
Абрамов И.Л.,  
Важов В.Ф.,  
Скоморохов В.М.,  
Швайка Ю.А.



Два генератора для подачи контрполярных импульсов  
амплитудой 900 кВ с энергией в импульсе 60 кДж  
и частотой следования 2 имп./сек



Установка ЭИБ на базе Уралмаш 4Э-76

\*И.Л. Абрамов Разрушение горных пород электроимпульсным способом в технологиях шахтного строительства // Геомеханика и геотехнология – 2018 С. 54-62

# Технический университет Дрездена, Германия

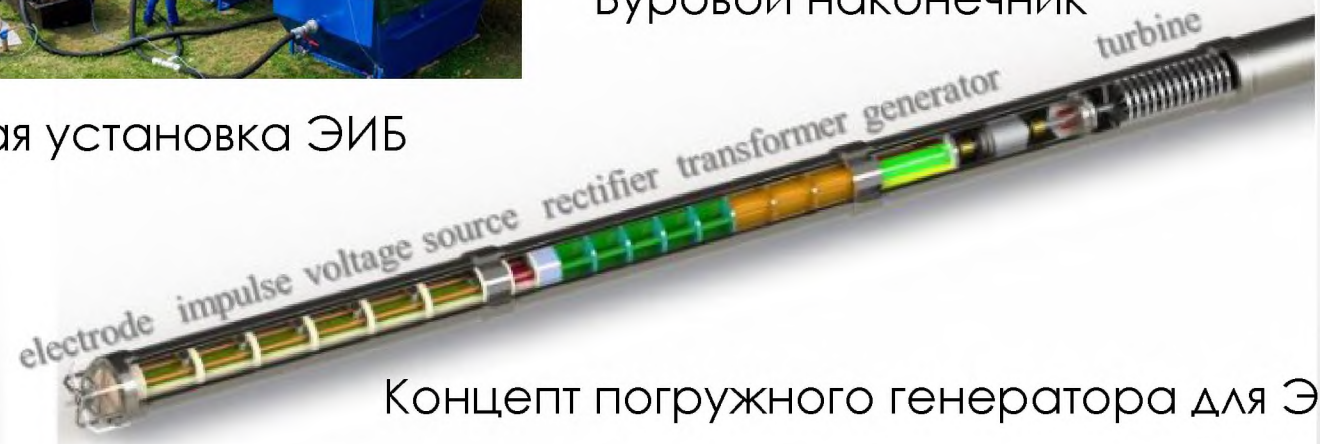


Буровая установка ЭИБ

Matthias Voigt  
Erik Anders,  
Steffen Großmann  
Franziska Lehmann



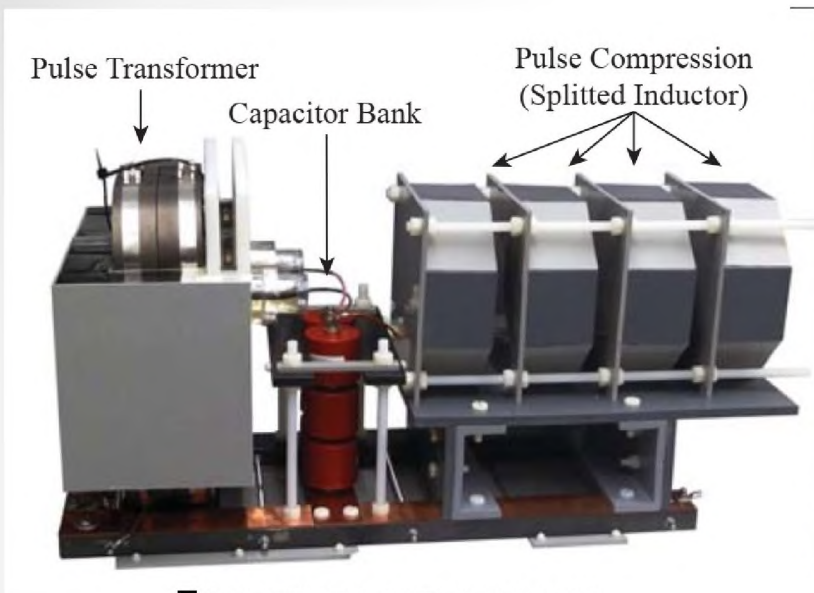
Буровой наконечник



Концепт погружного генератора для ЭИБ

\* Voigt M, Anders E, Lehmann F, Großmann S. With Electric Pulses to Geothermal Heat (Mit Elektro-Impulsen Zur Erdwärme) Symposium of Energy Innovation, 14–16 February 2018. Graz University of Technology

# (ETH Zurich), Швейцария



Прототип импульсного генератора на звеньях сжатия



5 пар параллельных электродов

- \*Tõnis Hõbejõgi - . Compact Pulse Modulator for Plasma Channel Drilling // A thesis submitted to attain the degree of doctor of sciences of ETH Zurich – 2014.

# VITO, Бельгия

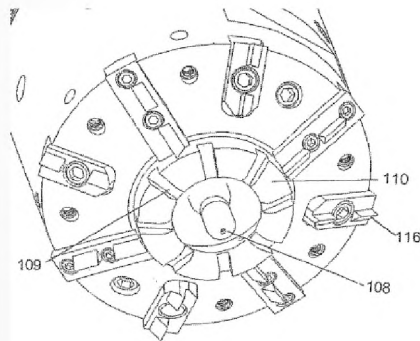
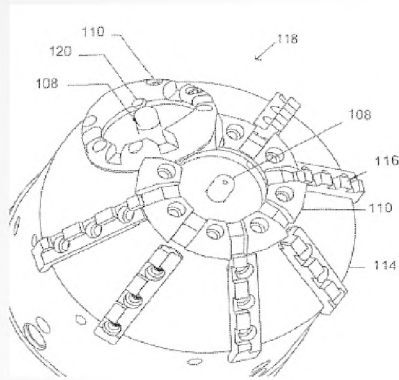
# Halliburton, CIIA

(19) **United States**

(12) **Patent Application Publication**  
**DIRKSEN**

(10) **Pub. No.: US 2013/0032398 A1**

(43) **Pub. Date: Feb. 7, 2013**



(54) **PULSED-ELECTRIC DRILLING SYSTEMS AND METHODS WITH REVERSE CIRCULATION**

(75) **Inventor: Ronald J. DIRKSEN, Spring, TX (US)**

(73) **Assignee: Halliburton Energy Services, Inc., Houston, TX (US)**

(21) **Appl. No.: 13/564,050**

(22) **Filed: Aug. 1, 2012**

**Related U.S. Application Data**

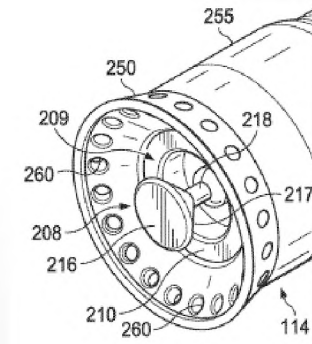
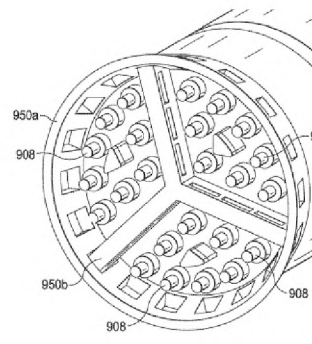
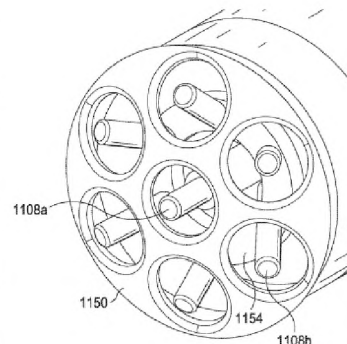
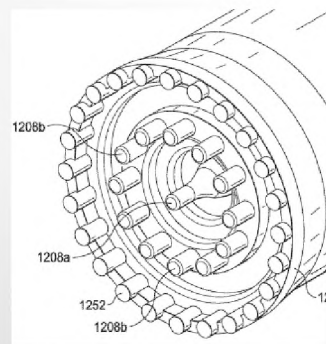
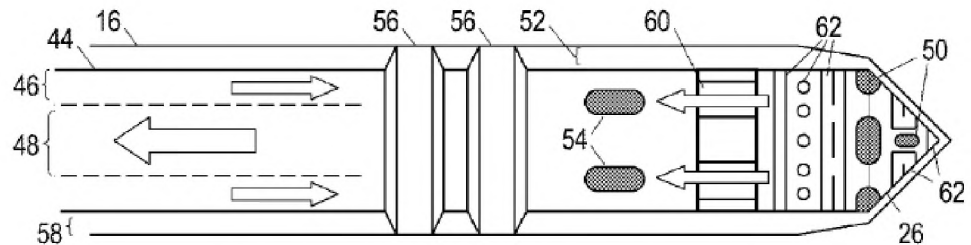
(60) **Provisional application No. 61/514,319, filed on Aug. 2, 2011, provisional application No. 61/514,312, filed on Aug. 2, 2011.**

**Publication Classification**

(51) **Int. Cl.**  
*E21B 7/15* (2006.01)  
*E21B 10/60* (2006.01)  
(52) **U.S. Cl.** ..... **175/16; 175/393**

(57) **ABSTRACT**

In at least some embodiments, a pulsed-electric drilling system includes a bit that extends a borehole by detaching formation material with pulses of electric current, and a drill-string that transports a fluid flow from the bit to convey detached formation material out of the borehole. The use of reverse circulation may enhance the performance of the pulsed-electric drilling system.



# ТПУ, г. Томск

Разработка технологии и оборудования в интересах зарубежных заказчиков.

Муратов В.М.– рук.  
Дацкевич С.Ю.,  
Журков М.Ю.,  
Важов В.Ф.



Испытательный стенд



Погружной генератор



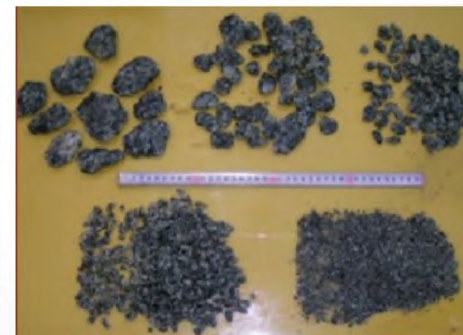
Скважина диаметром 380–400 мм



Буровая коронка



Буровая коронка



Шлам гранита



# Результаты, полученные в ИШНПТ

## Бурение 15 метровой скважины в граните

Летом 2017 года на испытательной площадке Института физики высоких технологий ТПУ пробурена скважина в искусственно созданном монолите гранита диаметром 340 мм, глубиной 15 м. При частоте следования импульсов 10 имп./сек. средняя скорость проходки составила 0,5 м/час,

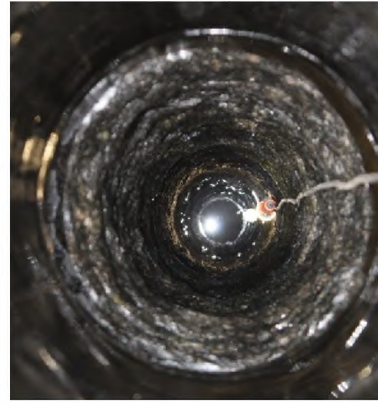
максимальная 1,6 м/ч. Есть потенциал увеличения скорости в несколько раз за счет увеличения частоты следования импульсов. Общие затраты энергии составили 400 кВт·ч/м.\*



Буровая установка



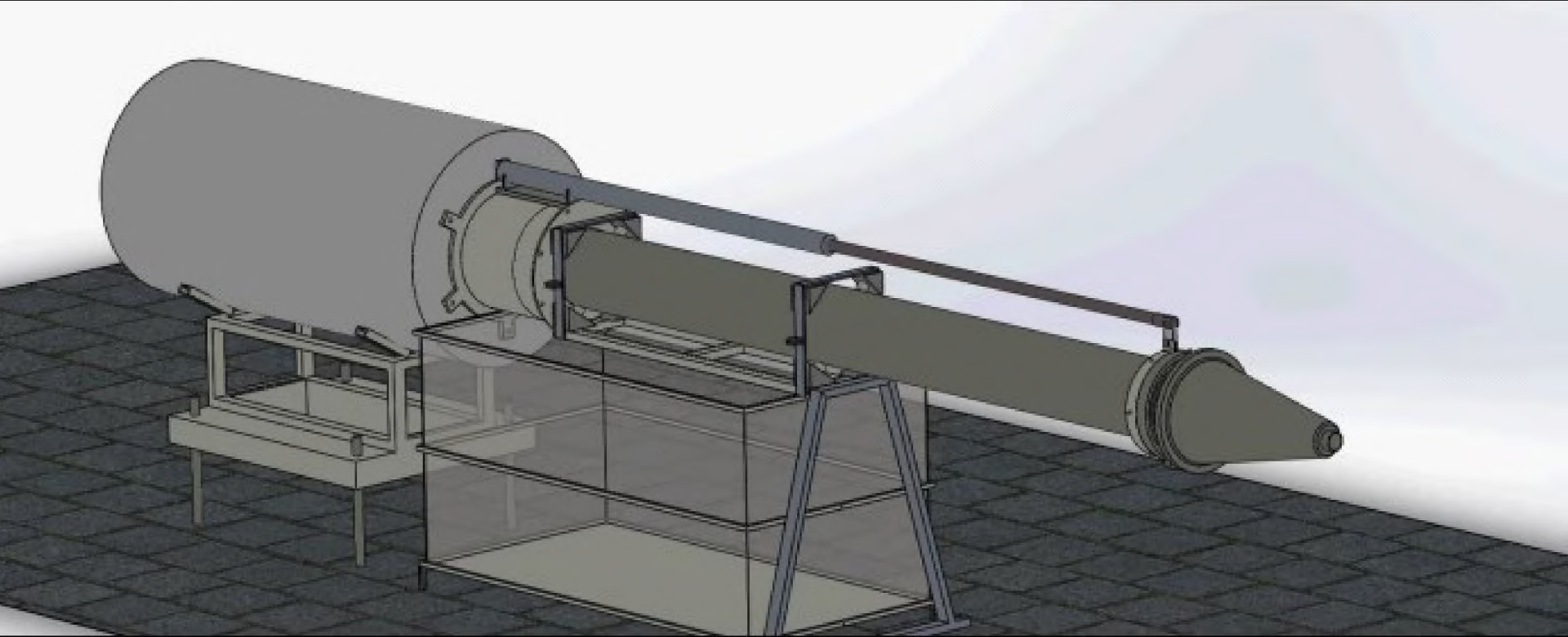
Буровой наконечник



Скважина 15 м,  
340 мм в граните

\*A.S. Yudin, et al. Electrical discharge drilling of granite with positive and negative polarity of voltage pulses // [International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences – 2019, Vol. 123, 104058.](#)

# Направленное ЭИ бурение



# Результаты, полученные в ИШНПТ

## Направленное бурение



При частоте следования импульсов 8 имп/с средняя скорость проходки составила 0,9 м/ч, максимальная - 1,4 м/ч.



Скважина 1,5 м,  $\varnothing$  400 мм  
в граните

# Проблемы и задачи

## Проблемы:

- В настоящее время не найден надежный способ использования буровых растворов на водной основе;
- Малый ресурс применяемых источников высоковольтных импульсов;
- Низкая надежность изоляции бурового наконечника;
- Неоптимальные режимы промывки скважины.



## Задачи:

- Изоляция всех нерабочих частей бурового наконечника;
- Уменьшение количества потенциальных электродов за счет увеличения межэлектродного расстояния или применение вращения электродной системы;
- Переход на новые источники высоковольтных импульсов;
- Поиск новых изоляционных материалов, в том числе стойких к перекрытию в воде;
- Оптимизация способа промывки забоя;