

Минобрнауки России  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук  
(ИСЭ СО РАН)  
Отдел образовательной деятельности

## **НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

**об основных результатах**

**научно-квалификационной работы на тему:**

Модель компактного мощного импульсного генератора для технологии электроимпульсного бурения и исследование режимов его работы

Направление подготовки: 03.06.01 Физика и астрономия

Профиль подготовки (специальность): 01.04.13 – Электрофизика,  
электрофизические установки

Аспирант



(подпись)

Молчанов Денис Викторович

Научный руководитель:

Лавринович Иван Валериевич,  
к.т.н., н.с. ИСЭ СО РАН

Томск – 2020

## **Актуальность темы научного исследования**

Согласно сведениям «Роснедра» [1], разведанных на сегодняшний день запасов углеводородов хватит на ближайшие 20-30 лет при условии сохранения объёмов добычи на нынешнем уровне. Однако, к настоящему моменту, имеется постоянная тенденция к увеличению объемов извлекаемых запасов [2], поэтому стабильность экономического развития, устойчивая внешнеэкономическая позиция, а так же государственная безопасность тесно связаны с увеличением эффективности добычи на ранее разведанных территориях и непрерывным поиском новых нефтегазовых месторождений на более глубоких горизонтах залегания [3].

Кроме того, одной из наиболее перспективных технологий использования возобновляемых источников энергии в настоящее время является геотермальная энергетика, которая практически не зависит от внешних природных явлений, имеет практически неисчерпаемые запасы, и, при этом, технически проработана для внедрения в промышленных масштабах в ближайшее время. Основным источником энергии в данной технологии является естественное тепло земных недр. Для его эффективного извлечения необходимы сверхглубокие скважины глубиной 8-10 км большого диаметра до 500 мм [4]. Производство таких скважин традиционными механическими методами бурения крайне не эффективно и сопряжено с серьезными техническими трудностями, что приводит к резкому увеличению себестоимости производства скважины и делает традиционные методы практически непригодными.

Оба представленных выше направления требуют от научного сообщества разработки новой экономичной и эффективной технологии для создания глубоких скважин. Одним из наиболее перспективных подходов к решению данной проблемы является развитие электроимпульсного способа бурения, как наиболее дешевого и быстрого [3]. Основоположниками этого направления стала группа ученых, возглавляемая проф. А.А. Воробьевым, впервые обнаружившая и описавшая эффект внедрения канала разряда в

твердое тело в начале 60 – х годов 20 века в Томском политехническом институте. В дальнейшем, данной рабочей группой было выдвинуто предположение о возможности использования данного эффекта в качестве разрушающего фактора при бурении скважин в горных массивах. Несмотря на многолетнюю историю развития данной технологии к настоящему моменту не создано надежного технического решения, позволяющего производить бурение скважин большой глубины электроимпульсным методом.

Основным и наиболее важным рабочим элементом в электроимпульсной технологии бурения является высоковольтный генератор, так как именно его конструкция определяет необходимую компоновку буровой установки, а выходные характеристики определяют скорость и эффективность разрушения пород в забое скважины. Проблема создания высоковольтного генератора погружного типа для развития технологии электроимпульсного бурения глубоких и сверхглубоких скважин большого диаметра является чрезвычайно актуальной. В настоящее время все большее число научных групп из развитых стран обращает свое внимание на достоинства данной технологии и вовлекается в ее разработку.

Результаты данной научно-исследовательской работы позволят заложить новый фундамент для дальнейшего успешного развития электроимпульсной технологии бурения и открыть новые рынки технологий как в Российской Федерации, так и за рубежом, а также решить ряд существующих на сегодняшний день проблем связанных с повышением эффективности добычи и формированием новых источников углеводородного сырья. Важность и необходимость решения этих проблем подтверждена Стратегией научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденной Президентом РФ [5].

## **Цель научного исследования**

Разработать модель компактного импульсного генератора для технологии электроимпульсного бурения, конструкция которого позволяет производить проходку скважин большой глубины и большого диаметра, с возможностью ее реализации на данном этапе нацнотехнического прогресса при использовании существующих изделий и материалов.

## **Основные задачи научного исследования**

Для достижения цели в работе были решены следующие задачи:

Проведен анализ существующих подходов к реализации технологии электроимпульсного бурения, выработана концепция и выбрана архитектура высоковольтного генератора.

Изготовлен лабораторный стенд для проведения исследований, состоящий из линейного импульсного трансформатора с тестовой камерой и экспериментального образца бурового наконечника с изменяемыми параметрами электродной системы. Проведены работы по установке и калибровке регистрирующей аппаратуры.

Исследованы режимы работы лабораторного образца высоковольтного генератора и оценено их влияние на объём формируемых каверн в различных видах горных пород при использовании воды в качестве жидкого диэлектрика.

Рассмотрена возможность усовершенствования предложенной схемы генератора включением дополнительного источника энергии в цепь разряда. Для определения эффективности выполнена серия экспериментов, проведён анализ полученных результатов.

## **Содержание выполненного исследования с описанием использованных методов, его основные результаты**

### **1.Компоновка высоковольтного генератора.**

Для достижений поставленной цели в ходе выполнения работ был проведен анализ существующих подходов к архитектуре построения высоковольтных генераторов.

Анализируя существующие технологические схемы [6] был сделан вывод, что использование погружного генератора является наиболее эффективным решением для бурения глубоких скважин. Реализация такого подхода требует разработки нового типа высоковольтного генератора, к которому должны быть предъявлены следующие требования:

- Малые габариты, которые позволят разместить все узлы генератора в ограниченном пространстве скважины.
- Высокая надежность работы генератора. Это позволит уменьшить число спускоподъемных операций и уменьшить стоимость бурения.
- Высокая эффективность бурения.

Среди большого разнообразия созданных за долгие годы исследований моделей [7,8] были отобраны схемы, реализуемость которых была подтверждена существующими проектами [9,10,11] (малогабаритный генератор Аркадьева – Маркса, импульсный трансформатор) (рис.1), а так же проведено сравнение с предложенной схемой генератора, использующего в качестве высоковольтного источника Линейный Импульсный Трансформатор (ЛИТ), предположение о возможности использования которого было впервые выдвинуто в ИСЭ СО РАН [12].

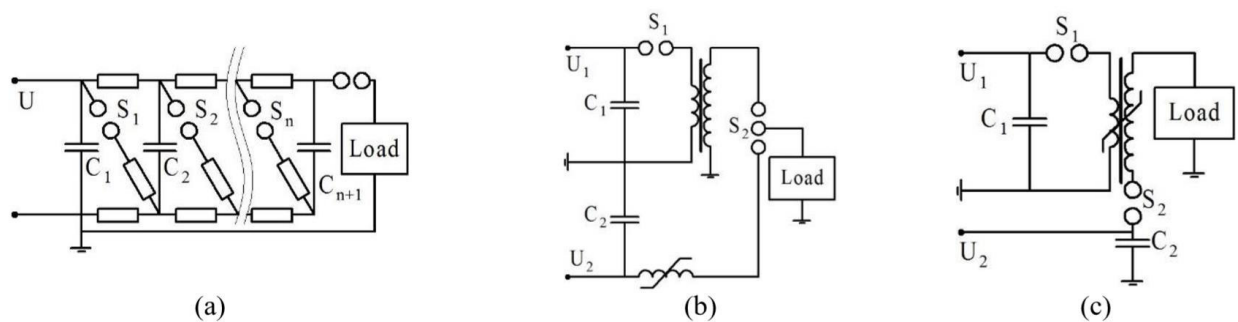


Рисунок 1. Возможные варианты исполнения схемы умножения напряжения погружного бурового генератора для электроимпульсного бурения: а – генератор Аркадьева – Маркса, б – Импульсный Трансформатор, в – Линейный Импульсный Трансформатор.

В ходе сравнения было отмечено, что особенности конструкции генератора Аркадьева - Маркса не позволяют создать надежный источник импульсного напряжения ввиду большого числа необходимых схемных элементов требующих точной настройки (газовых разрядников) и необходимости изоляции всех элементов на полное выходное напряжение. Конструкция импульсного трансформатора (ИТ) обладает большей технологичностью. Кроме того, она позволяет создать на ее основе схему генератора импульсов с двумя уровнями выходного напряжения, что, в свою очередь, позволяет регулировать параметры импульса в предпробивной и завершающей стадии формирования канала разряда независимо друг от друга, тем самым увеличивая эффективность установки [13]. Использование схемы с ЛИТ генератором позволяет отказаться от использования дополнительного дросселя насыщения (в качестве дросселя выступает вторичный виток трансформатора) и трехэлектродного газового разрядника, что несколько упрощает конструкцию генератора и увеличивает надежность его работы. Благодаря конструкционным особенностям ЛИТ генератор имеет малое внутреннее сопротивление, что позволяет сообщать энергию в нагрузку от дополнительного источника питания (С2) без значительных потерь. Все эти достоинства в совокупности с возможностью компактного расположения элементов генератора в корпусе с наружным диаметром не превышающим 300 мм, позволяют заключить, что предложенная схема

обладает всеми необходимыми качествами для успешной реализации дальнейших планов по разработке буровой установки для бурения глубоких и сверхглубоких скважин большого диаметра.

## 2.Эффективность работы ЛИТ генератора.

### 2.1.Лабораторный стенд

Для проведения исследования была создана лабораторная установка, включающая в себя: Линейный импульсный трансформатор высокопотенциальное плечо которого было модернизировано для работы в воде; испытательную камеру; макет двухэлектродного бурового наконечника (Рис. 2). Параметры выходного импульса фиксировались емкостным датчиком напряжения и поясом Роговского. Датчики были размещены в непосредственной близости от нагрузки и откалиброваны. Относительная погрешность измерения обоих датчиков, согласно проведённым расчетам, не превышает двух процентов.



Рисунок 2. а - Фотография лабораторного стенда: 1 – емкостный накопитель энергии; 2 – Линейный импульсный трансформатор; 3 – Испытательная камера; 4, 5 – измерительная аппаратура (пояс Роговского, емкостный делитель напряжения). б – фотография испытательной камеры и электродной системы генератора.

Для реализации возможности использования второго источника энергии, после серии испытаний лабораторный стенд был существенно модернизирован. Для определения требований, предъявляемых к дополнительному источнику тока, в программном комплексе Micro-CAP [14]

была построена модель существующего ЛИТ-генератора, учитывающая влияние магнитной системы ЛИТ. В результате моделирования было выявлено, что при подаче положительного импульса (противоположного полярности основного импульса) магнитные сердечники остаются в намагниченном состоянии и не препятствуют прохождению импульса тока через вторичный виток ЛИТ-генератора, а энерговклад дополнительного конденсатора (ГИТ) происходит одновременно с инициирующим разрядом (рисунок 3).

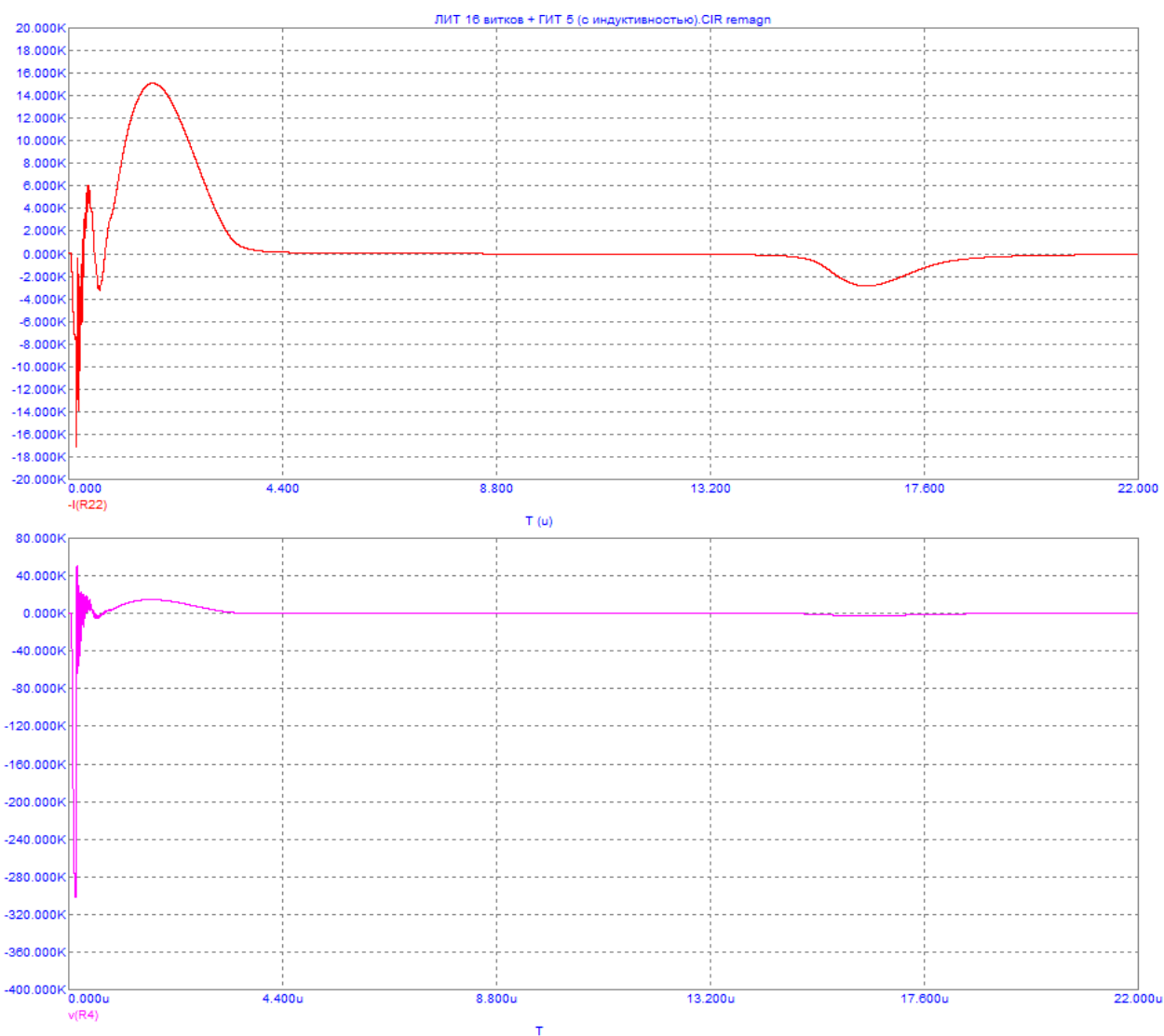


Рисунок 3. Осциллограммы тока (красная кривая) и напряжения (фиолетовая кривая) модели ЛИТ-генератора при положительном заряде ГИТ.



Для уменьшения времени экспозиции энергии в нагрузку и увеличения эффективности энерговыклада длина пути протекания тока из дополнительного источника была минимизирована, размещением высоковольтного конденсатора на выходном изоляторе низковольтной стороны ЛИТ и использованием газового разрядника, размещенного в его внутренней полости (рис. 4а). В качестве дополнительного источника тока был выбран высоковольтный низкоиндуктивный конденсатор «НСЕІсар 50-0.7» (рис. 4б). Согласно расчетам, относительно небольшая емкость в 0,7 мкФ позволяет получить на выходе короткий импульс тока с амплитудой до 15 кА.

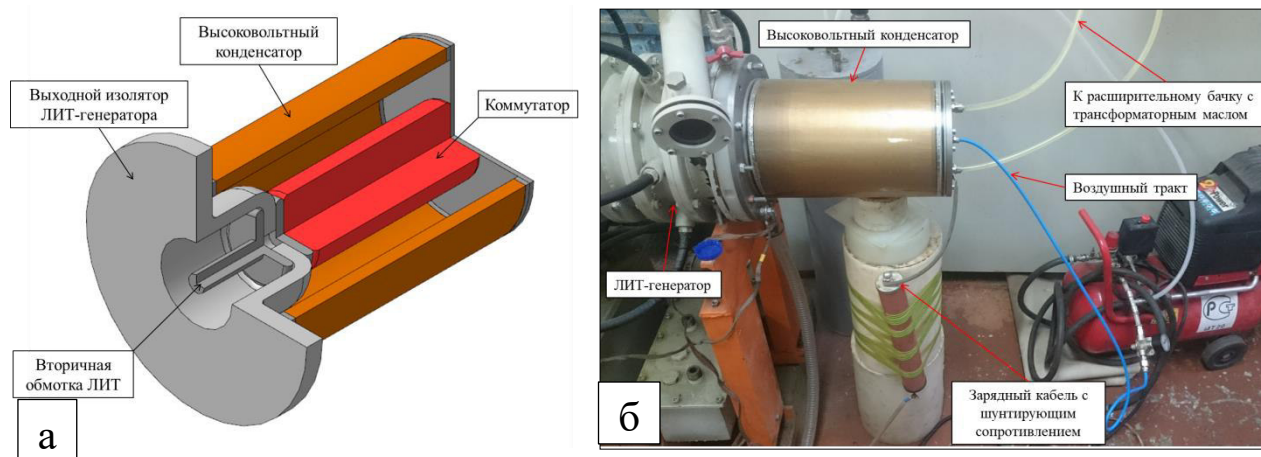


Рисунок 4. а - Эскиз узла соединения дополнительного источника импульсного тока и ЛИТ-генератора, б – фотография узла соединения дополнительного источника тока и ЛИТ-генератора.

## 2.2. Образцы горных пород

Коллекторами нефти и газа являются горные породы, обладающие способностью вмещать эти флюиды и отдавать их при разработке. Большая часть нефтяных и газовых подземных резервуаров Сибири сложена породами осадочного происхождения: песчаниками, известняками и доломитами. Иногда коллекторами нефти могут служить выветрелые или микротрещиноватые граниты. Так, на Шаимском месторождении в Западносибирской низменности нефть обнаружена не только в песчаниках,

но и в выветрелой части фундамента, сложенного гранитами [15]. Поэтому для проведения серии экспериментов были отобраны наиболее близкие по составу и физикомеханическим свойствам породы – микротрещиноватый среднезернистый гранит и средне-мелкозернистый песчаник (рисунок 5).

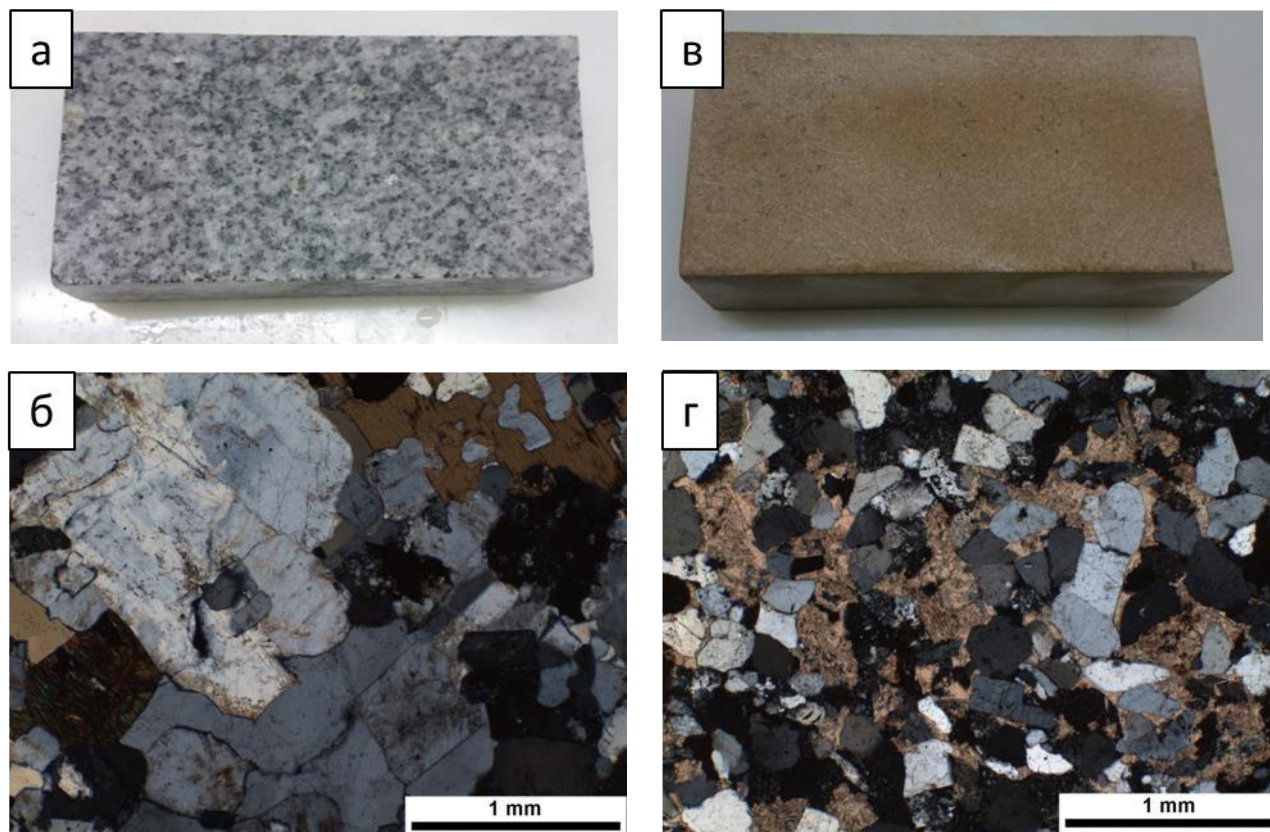


Рисунок 5 – Фотографии отобранных горных пород, и их шлифов под поляризационным микроскопом с анализатором: а,б – гранит, в,г – песчаник.

### 2.3.Методика проведения экспериментов

Известно, что при бурении глубоких нефтегазодобывающих скважин могут встречаться как водонасыщенные, так и нефтегазонасыщенные горные породы [16]. Так же известно, что пропитка горных пород жидкостью увеличивает их пробивное напряжение до двух и более раз, причем это увеличение более выражено для пород с большей пористостью, а так же сильно зависит от диэлектрической проницаемости самой жидкости [17]. Из этих данных следует, что экспериментальные результаты по пробою горных пород во многом зависят от методики проведения экспериментов, в том

числе и от методики предварительной пропитки горных пород жидкостью [18,19]. Поэтому, для большего соответствия реальным условиям бурения, перед экспериментом образцы пропитывались рабочей жидкостью в течение 24 часов, что при данных габаритах образца достаточно для его полной пропитки. Многочисленные данные по пробою твердых диэлектриков и горных пород показывают, что объем разрушения носит статистический характер, однако для технологического применения электроимпульсного бурения необходимо обеспечить условия для наиболее вероятного внедрения канала в горную породу. Для нахождения таких условий, были выбраны номинальный и близкий к номинальному режимы работы ЛИТ генератора (выходное напряжение 295 и 270кВ соответственно). Величина межэлектродного расстояния варьировалась от 20 мм с шагом в 5 мм до расстояния, при котором эффект внедрения канал разряда в глубь твердого тела не наблюдался.

#### **2.4. Экспериментальные результаты эффективности работы ЛИТ генератора.**

Проведенная серия экспериментов показала что использование ЛИТ генератора при использовании воды в качестве жидкого диэлектрика позволяет реализовать эффект внедрения канала разряда в твердое тело в межэлектродном промежутке до 30мм. Достигнутые удельные характеристики объема отколотой породы на единицу затраченной энергии были рассчитаны по формуле 1 и приведены на рис. 6

$$Q = \frac{V}{W}, \quad (1)$$

где  $V$  – объем отколотой породы, см<sup>3</sup>;  $W$  – суммарная энергия, запасенная в первичном накопителе, Дж.

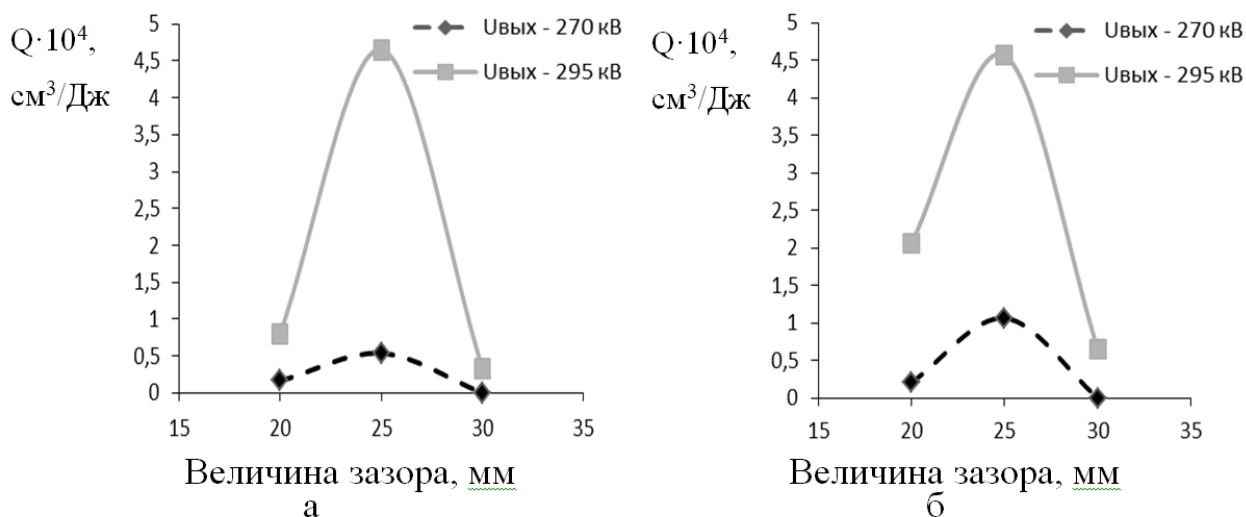


Рисунок 6 – Объём отколотой породы на единицу затраченной энергии.  
 а – для образцов из гранита, б – для образцов из песчаника

Согласно данным [8] эффективность разрушения гранита с использованием генератора, собранным по схеме Аркадьева-Маркса составляет  $Q=4.7 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3/\text{Дж}$ . Для генератора на базе ЛИТ трансформатора при тех же условиях она составила  $Q=4,7 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3/\text{Дж}$  при учете как эффективных, так и неэффективных разрядов. Увеличение данного параметра видится возможными при использовании многозазорного бурового наконечника. Логично, что при увеличении числа зазоров, общая вероятность внедрения импульса через один из них увеличивается и в предельном случае, при вероятности в 100 процентов, эффективность ЛИТ генератора может увеличиться на 65% (до  $Q = 7.8 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3/\text{Дж}$ ).

Время нарастания выходного импульса напряжения исследуемого генератора составляло примерно 100 наносекунд (рис. 7), а время до пробоя варьировалось от 88 до 100 наносекунд.

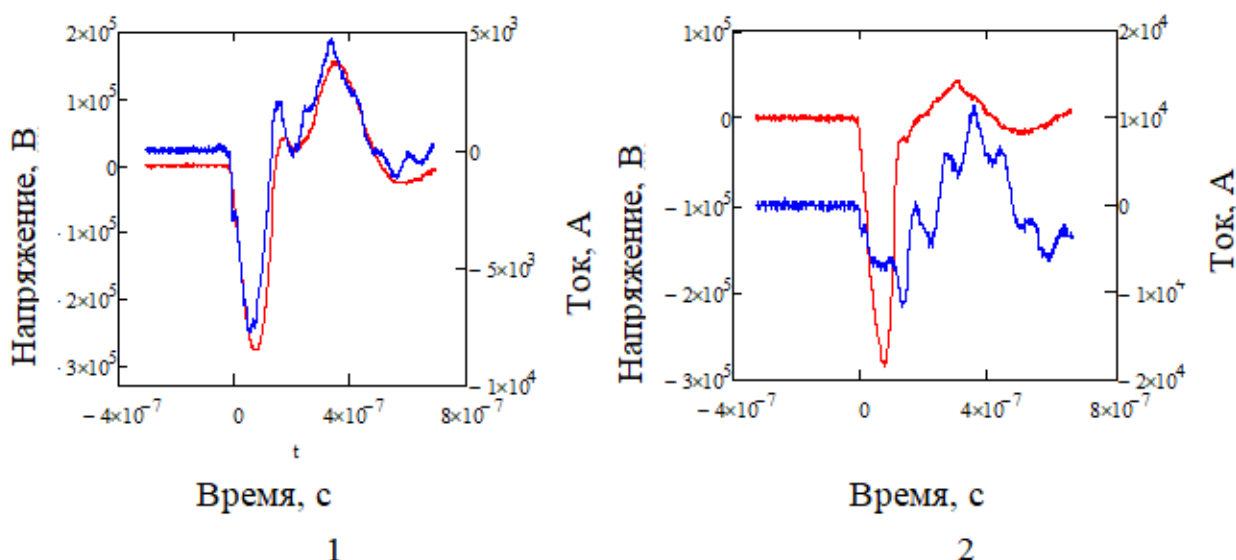


Рисунок 7 – Типичные осциллограммы формы выходного напряжения и тока при зарядном напряжении 45 кВ и межэлектродном расстоянии 20мм: 1 – без внедрения канала разряда в толщу породы; 2 – при пробое межэлектродного промежутка.

Как было отмечено во многих исследованиях, электрическая прочность горных пород сильно зависит от времени нарастания фронта выходного импульса, а так же выбранной диэлектрической жидкости. В ходе проведения литературных исследований было выявлено, что полученные в данной работе результаты пробоя горных пород при столь коротких временах в системе наложенных электродов и при использовании в качестве жидкого диэлектрика технической воды являются уникальными и ранее исследованы не были (рисунок 8 [19]).

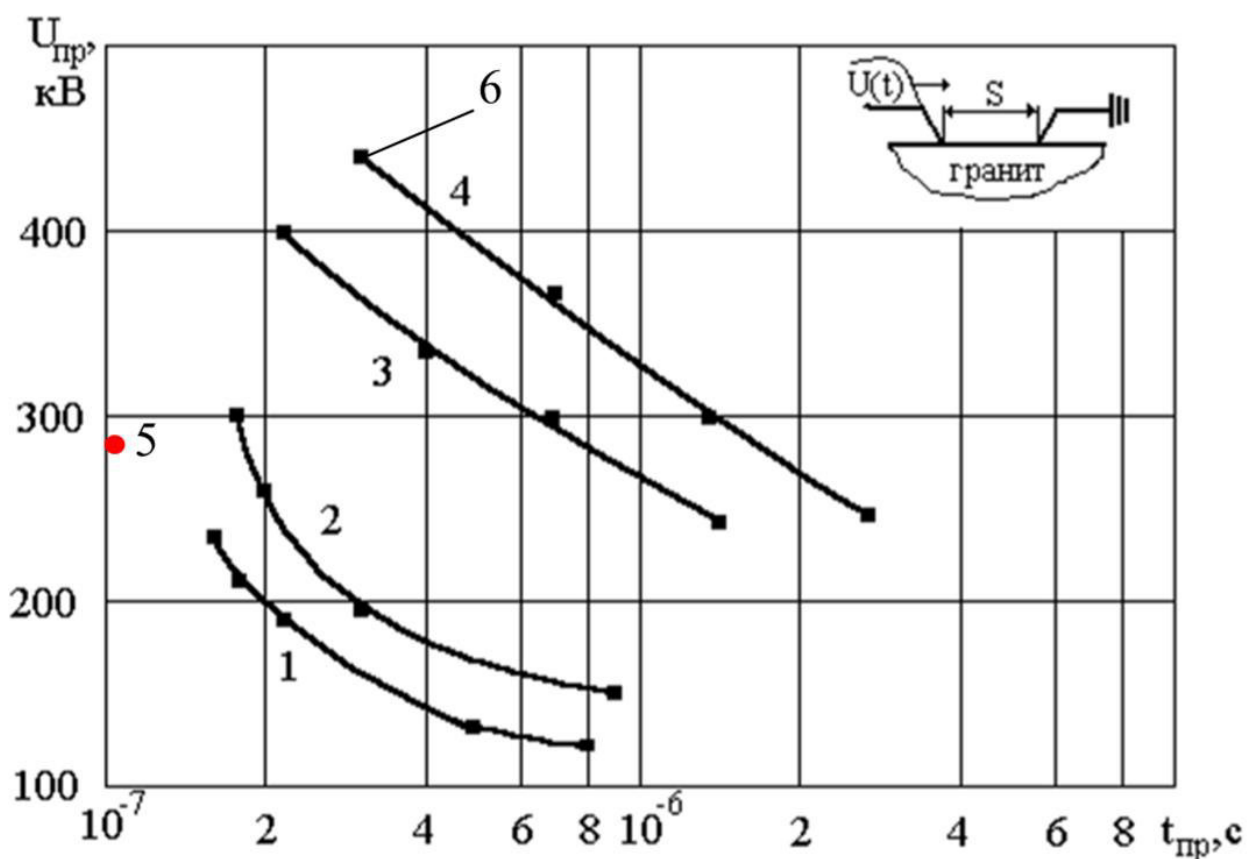


Рисунок 8. Вольт-секундные характеристики пробоя гранита в воде. 1 –  $S = 20$  мм; 2 –  $S = 30$  мм; 3 –  $S = 50$  мм; 4 –  $S = 100$  мм; 5 – экспериментально полученное значение пробивного напряжения гранита при  $S = 20$  мм, 6 – точка с минимальным значением интеграла напряжения для зазора 100 мм.

Как видно из рисунка 8 кривая 1 соответствующая пробивному напряжению гранита при зазоре в 20 мм и при уменьшении экспозиции сообщаемого импульса сохраняет возрастающую тенденцию. Поэтому использование дополнительной обостряющей емкости на выходе трансформатора представляется нецелесообразным в виду необходимости приложения большего напряжения для пробоя аналогичного межэлектродного промежутка.

Кроме того, для определения параметров, необходимых для пробоя большего межэлектродного расстояния в 100 мм были проведены оценочные расчеты по определению интеграла напряжения выходного импульса (величина которого рассчитывалась как площадь под прямой проведенной из центра координат к искомой точке). Известно, что интеграл напряжения

прямопропорционален сечению магнитопровода всех сердечников ЛИТ трансформатора (формула 2).

$$S \propto \int_0^t U_2(t) dt, \quad (2)$$

где  $S$  – суммарное сечение всех сердечников ЛИТ трансформатора,  $U_2$  – напряжение на вторичной обмотке.

Из формулы 2 следует, что для достижения заданной точки (рисунок 8, точка б) необходимо увеличить сечение магнитопровода ЛИТ трансформатора в 4 раза, что может быть легко осуществимо на практике при дальнейшем развитии данного направления. Увеличение выходного напряжения так же может быть достигнуто заменой диэлектрической жидкости на менее проводящую (по сравнению с водой) например трансформаторное масло ( $\rho=10^{12}$  Ом·см), буровые растворы на масляной основе Versa Pro ( $\rho=2,9 \cdot 10^8$  Ом·см) и Versa Clean ( $\rho=4,7 \cdot 10^8$  Ом·см) или более экологичным биodeградируемым трансформаторным маслом Midel ( $\rho=5 \cdot 10^{12}$  Ом·см), что уменьшит величину токов утечки и увеличит амплитуду выходного импульса.

## **2.5. Экспериментальные результаты эффективности работы ЛИТ генератора и дополнительного источника импульсного тока.**

В результате проведенных работ было отмечено, что вероятность внедрения канала разряда в горную породу, величина минимального и максимального межэлектродного промежутков, не отличаются от ранее полученных данных при работе одного ЛИТ-генератора, что согласуется с теорией об этапах формирования откольной воронки [20]. Внесение дополнительного источника тока в схему разрабатываемого генератора не оказывает существенного влияния на форму и амплитуду выходного напряжения и тока (рисунок 9).

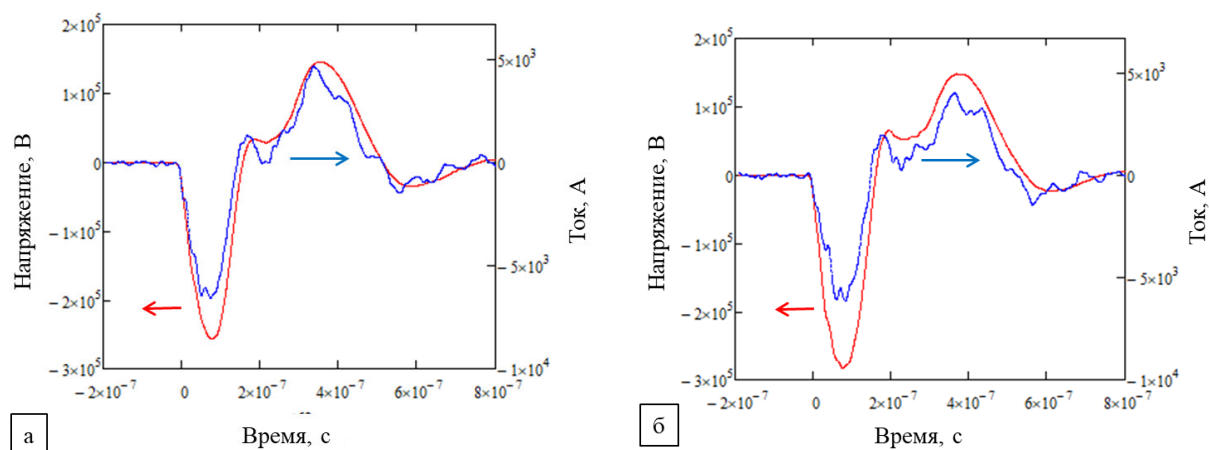


Рисунок 9 – Осциллограммы тока и напряжения инициирующего импульса: а – ЛИТ-генератора; б – ЛИТ-генератора с дополнительным источником тока

При пробое межэлектродного промежутка и формировании разрядного канала внутри образца, разряд ГИТа происходит сразу после инициирующего импульса (рис. 10), без задержек, что подтверждает соответствие данной схемы ранее разработанной расчетной модели.

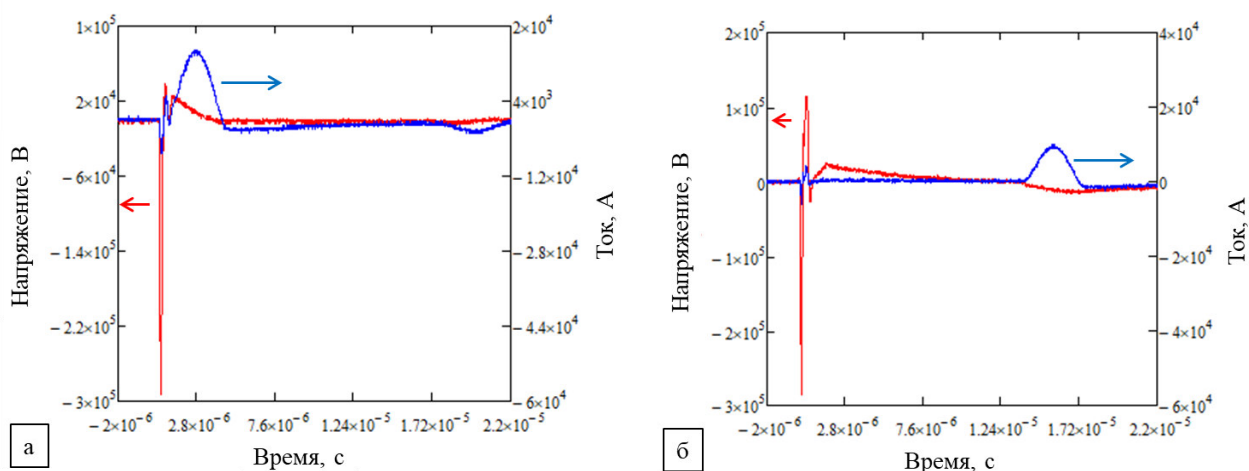


Рисунок 10 – Осциллограммы токов и напряжений: а – при пробое образца горной породы; б – при пробое в воде

Для достижения наиболее показательных результатов было выбрано два уровня напряжения заряда дополнительного конденсатора, увеличивающие запасенную энергию всей установки на  $\sim 1.3$  при  $U_{зар} = 19$  кВ и  $\sim 1.7$  раза при  $U_{зар} = 28$  кВ (с 405 Дж до 530 Дж и 680 Дж соответственно). Полученные данные представлены в сравнительной таблице 1. Показано, что при



использовании дополнительно источника тока и увеличении энергии в разряде, эффективность разрушения в пересчете на джоуль затраченной энергии падает на 25 и 30 процентов, однако при расчете среднего объема каверны за результативный выстрел было обнаружено увеличение данного показателя на 10 и 20 % соответственно (таблица 2).

Таблица 1 – Объем разрушенной породы на единицу затраченной энергии (см<sup>3</sup>/Дж)

Материал	ЛИТ	ЛИТ+ГИТ (Uзар 19кВ)	ЛИТ+ГИТ (Uзар 28кВ)
Гранит	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$
Песчаник	$4,6 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$

Таблица 2 – Средний объем за результативный выстрел (см<sup>3</sup>/имп.)

Материал	ЛИТ	ЛИТ+ГИТ (Uзар 19кВ)	ЛИТ+ГИТ (Uзар 28кВ)
Гранит	0,32	0,35	0,38
Песчаник	0,34	0,36	0,41

Несмотря на тщательный контроль за сохранением условий эксперимента (параметров разрядной цепи, длины межэлектродного промежутка, геометрии образца и т.д.) полученные значения подвержены значительным статистическим флуктуациям, вследствие естественной неоднородности испытуемых образцов (горных пород). Однако оценка среднего значения объема отколотой породы подтверждает тенденцию к повышению энергозатрат при увеличении объема, отмеченные в работах [21,22].

При качественной оценке результатов необходимо отметить значительные размеры образующихся поперечных трещин, выходящих за пределы испытуемого образца, что может послужить дополнительным разупрочняющим фактором в процессе электроимпульсного бурения (рисунок 11).



Рисунок 11 – Фотографии образцов гранита и песчаника после эксперимента

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что энергия, выделенная в канале разряда благодаря дополнительному источнику тока, избыточна при данных условиях эксперимента. Однако известно, что при бурении, с увеличением глубины скважины, увеличивается давление оказываемое столбом жидкости на поверхность образца, что ухудшает условия формирования каверн и значительно снижает производительность разрушения[8]. Описанный механизм долгое время считался серьезным недостатком импульсной технологии. Использование дополнительного источника тока и увеличение энергии сообщаемой в канал разряда позволит компенсировать дополнительное сжимающее усилие, обусловленное гидростатическим давлением. Такое решение позволит увеличить эффективность каждого отдельного разряда, а следовательно уменьшить необходимое число разрядов, затрачиваемое на образование единицы длины скважины. Данный фактор позволяет предположить о значительном увеличении срока службы разрабатываемой модели генератора при бурении скважин большой глубины.

### **Основные выводы по научной работе**

1. Исследованы режимы работы разработанной модели высоковольтного генератора на основе ЛИТ. Продемонстрирована возможность варьирования амплитуды выходного импульса от 128,3 до

295кВ при использовании воды в качестве жидкого диэлектрика, без изменения крутизны фронта сигнала.

2. Определены наиболее эффективные и максимально возможные значения межэлектродного расстояния для исследуемой установки. Для гранита наиболее эффективным значением промежутка является 25 мм, при котором вероятность внедрения составила 58 процентов, средний объём отколотой породы  $4.7 \cdot 10^{-4}$  см<sup>3</sup>/Дж. Для песчаника эффективное значение зазора так же составило 25 мм, с наибольшей вероятностью пробоя – 54 процента, средний объём отколотой породы -  $4.5 \cdot 10^{-4}$  см<sup>3</sup>/Дж. При зазоре свыше 30 миллиметров для обоих типов горных пород внедрения не наблюдалось во всех рассматриваемых режимах работы генератора.

3. Показано, что количество энергии затраченной ЛИТ генератором на разрушение единицы объёма, близка к аналогичным показателям генератора собранного по схема Аркадьева-Маркса. Значение пробивного напряжения гранита в системе наложенных электродов при столь коротких временах получено впервые и подтверждает ранее выявленную тенденцию к увеличению пробивного напряжения при уменьшении времени нарастания фронта. Выработаны рекомендации по дальнейшему усовершенствованию конструкции генератора для возможности работы при больших межэлектродных зазорах.

4. Предложена и реализована схема высоковольтного ЛИТ генератора, позволяющая значительно увеличить выделяемую в разряде энергию за счет включения в цепь разряда дополнительного генератора импульсного тока (ГИТ). Проведены эксперименты, подтверждающие работоспособность и надежность такой схемы. Показано что наличие ГИТ не оказывает существенного влияния на форму напряжения и тока инициирующего импульса, а следовательно не влияет на вероятность внедрения канала разряда в твердое тело.

5. При сравнительном анализе эффективности работы схемы в исследуемых режимах работы было отмечено некоторое увеличение среднего

объема отколотой породы при работе установки в режиме ЛИТ сГИТ, а также формирование больших продольных трещин.

### **Обоснование достоверности полученных результатов**

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием известных надежных методик измерения, использованием поверенного измерительного оборудования и подтверждается воспроизводимостью результатов измерений. Результаты исследования находятся в согласии с данными других авторов.

### **Научная новизна работы заключается в том, что впервые:**

Получены экспериментальные данные, подтверждающие возможность использования линейного импульсного трансформатора с амплитудой выходного сигнала 295кВ и длительностью фронта импульса  $\approx 100$ нс, в качестве генератора импульсного напряжения для электроимпульсного разрушения гранита и песчаника при использовании воды в качестве жидкого диэлектрика.

Разработана принципиальная схема включения в цепь разряда дополнительного источника импульсного тока, увеличивающего запасенную энергию генератора в 1,7 раз (до 680 Дж), но не искажающего форму первой полуволны выходного импульса линейного импульсного трансформатора.

Показано, что увеличение запасенной генератором энергии за счет ГИТ не влияет на максимально возможный межэлектродный зазор модели бурового наконечника, при использовании ЛИТ генератора, и ведет к увеличению среднего размера образуемых каверн, а также к образованию значительных продольных трещин.

Определены наиболее эффективные и максимально возможные значения межэлектродного расстояния для исследуемой установки. Для гранита наиболее эффективным значением промежутка является 25 мм, при котором вероятность внедрения составила 58 процентов, средний объем отколотой породы  $4.7 \cdot 10^{-4}$  см<sup>3</sup>/Дж. Для песчаника эффективное значение зазора так же

составило 25 мм, с наибольшей вероятностью пробоя – 54 процента, средний объем отколотой породы -  $4.5 \cdot 10^{-4}$  см<sup>3</sup>/Дж.

Экспериментально определено значение пробивного напряжения гранита в системе наложенных электродов (с межэлектродным зазором в 20мм) при времени нарастания фронта импульса ~ 100 нс, составившее ≈290 кВ. Полученные данные подтверждают ранее выявленную тенденцию к увеличению пробивного напряжения при уменьшении времени нарастания фронта.

### **Апробация результатов работы**

Конференции:

1. Выступление с докладом «Optimal high-voltage generator design for electropulse drilling of deep wells» на международной конференции «The International Conference on Applied physics, Power and Material science (APPM) 2K18», Хайдарабад, Индия.
2. Стендовый доклад «Downhole generator based on a line pulse transformer for electro pulse drilling» на международной конференции «2017 IEEE 21st Pulsed Power Conference», Брайтон, Великобритания.
3. Выступление с докладом «Efficiency of rock destruction by a pulse generator based on a linear pulse transformer» на конференции «2019 IEEE Pulsed Power and Plasma Science Conference (PPPS 2019)», Орландо, США.

### **Публикации**

1. D. Molchanov and I. Lavrinovich. «Optimal High-Voltage Generator Design for Electropulse Drilling of Deep Wells» 2019 J. Phys.: Conf. Ser. 1172 012069 doi:10.1088/1742-6596/1172/1/012069
2. D. Molchanov, V. Vazhov, I. Lavrinovich, V. Lavrinovich and N. Ratakhin, "Downhole generator based on a line pulse transformer for electro pulse drilling," 2017 IEEE 21st International Conference on Pulsed Power (PPC), Brighton, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/PPC.2017.8291167.

3. D. Molchanov and I. Lavrinovich, "Efficiency of Rock Destruction by a Pulse Generator Based on a Linear Pulse Transformer," *2019 IEEE Pulsed Power & Plasma Science (PPPS)*, Orlando, FL, USA, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/PPPS34859.2019.9009799.

### **Практическая значимость результатов исследования**

Экспериментально подтвержденная в данной работе возможность использования ЛИТ генератора для разрушения горных пород позволяет создать на его основе новую модель импульсного генератора для технологии электроимпульсного бурения. Предложены методы по увеличению эффективности бурения. Возможность создания малогабаритного бурового снаряда на основе разработанной схемы, с показателями эффективности выше, чем у ранее разработанных моделей, является залогом для реализации технологического подхода. Размещение источника импульсов внутри скважины, в непосредственной близости к буровому наконечнику, позволит использовать электроимпульсное бурение для успешной проходки глубоких или даже сверх глубоких скважин. Полученные результаты демонстрируют возможность создания прототипа погружного генератора при использовании доступных на сегодняшний момент технологий и материалов.

Технология относительно быстрой и экономичной проходки сверх глубоких скважин большого диаметра позволит производить эффективную разработку существующих и поиски новых нефтегазовых месторождений на больших глубинах, а кроме того является залогом развития и повсеместного внедрения геотермальной энергетики.

Промышленная реализация данной технологии в полном объеме обеспечит: готовность страны к возникающим большим вызовам на основе применения полученных знаний; повысит качество жизни населения путем удешевления энергоносителей получения доступа к практически неисчерпаемому источнику геотермальной энергии; обеспечит возможность освоения территорий ранее считавшимися пригодными для проживания и

производства в виду высокой стоимости обеспечения нормальной жизнедеятельности; обеспечит безопасность страны и укрепление позиции России в глобальном рейтинге уровня жизни за счет создания востребованных продуктов, товаров и услуг; обеспечит технологическое обновление традиционных для России отраслей экономики и увеличение доли продукции новых высокотехнологичных и наукоемких отраслей в валовом внутреннем продукте; повысит рост доходов за счет увеличения экспорта высокотехнологичной продукции

### **Личный вклад аспиранта в получение результатов научного исследования.**

Представленные в работе основные результаты были получены автором лично.

Постановка основных задач работы осуществлялась совместно с научным руководителем Лавриновичем И.В. Разработка и подготовка экспериментального оборудования, проведение физического эксперимента, обработка полученных экспериментальных данных и формулирование выводов осуществлялось автором лично. Анализ, интерпретация и обсуждение полученных результатов осуществлялось автором при участии научного руководителя. Написание публикаций и подготовка докладов на конкурсы и конференции осуществлялись автором лично.

### **Список литературы**

1. Стратегия развития минерально-сырьевой базы российской федерации до 2030 года [Электронный ресурс]: Федеральное агентство по недропользованию – Роснедра (дата обращения: 28.06.2019) URL: <http://www.rosnedra.gov.ru/article/8743.html>
2. Monthly Oil Market Report 12 October 2016 [Электронный ресурс]: ОПЕС (дата обращения: 25.07.2019) URL: [https://www.opec.org/opec\\_web/static\\_files\\_project/media/downloads/publications/MOMR%20October%202016.pdf](https://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/MOMR%20October%202016.pdf)

3. Волож Ю.А. Труднодоступные ресурсы нефти и газа – месторождения больших глубин / Волож Ю.А., Куандыков Б.М. – Электронный научный журнал "Георесурсы. Геоэнергетика. Геополитика", 2014 – 2(10).
4. Rodland A. Deep Geothermal Energy; Photonics for Harvesting. Photonics for Deep Geothermal Energy Harvesting, Proceedings Swissphotonics Workshop. November 7, 2012, Neuchâtel
5. Указ Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации»
6. Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. СПб.: Наука, 1993.-276с.
7. Усов А.Ф., Семкин Б.В., Зиновьев Н.Т. Переходные процессы в установках электроимпульсной технологии. – Л.: Наука, 1987.-189с.
8. Важов В.Ф., Зиновьев Н.Т., Ушаков В.Я. Электроразрядная технология бурения скважин и разрушения железобетонных изделий: монография. ТПУ.- Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 312с.
9. M. Voigt, E. Anders, F. Lehmann, Electric Impulse Technology: Less Energy, Less Drilling Time, Less Round Trips (Society of Petroleum Engineers, 2016).
10. A. Usov, A. Potokin, H Mengbing Prospects creation technological systems electric pulse fracture ores based on new electrical base (Conference Proceedings of XXVII International Mineral Processing Congress, Santiago Chili, 2014) pp. 33–44.
11. A. S. Potokin, M. He, Energy optimization methods of the process generation High-voltage pulses for electric pulse drilling of wells (Proceedings of the Kola Scientific Center RAS, Apatity, Russia, 2017) pp. 93–103.
12. Патент РФ № 2660597, 27.04.2017. Лавринович И.В., Важов В.Ф., Лавринович В.А., Ратахин Н.А. Высоковольтный импульсный генератор для электроразрядных технологий // Патент России № 2017115164. 2017. Бюл. № 19.



13. Усов А.Ф., Потокин А.С., Ильин Д.В. Исследование методов энергетической оптимизации технологического использования разрядно-импульсной низкотемпературной плазмы в конденсированных средах // Труды Кольского научного центра РАН. 2016. №5-13 (39).
14. Micro-Cap (TM) Версия 12.2.0.2 Spectrum Software, Саннивейл, США [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.spectrum-soft.com/index.shtml> (дата обращения: 11.12.2019).
15. Ханин А.А. Породы-коллекторы нефти и газа и их изучение. / Ханин А.А.; Рипол Классик, 2013. -372с.
16. Ерофеев, Л.Я. Физика горных пород / Л.Я. Ерофеев, Г.С. Вахромеев, В.С. Зинченко, Г.Г. Номоконова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 520 с.
17. Малахов В.С. Исследование импульсной электрической прочности горных пород применительно к разрушению их электроимпульсным способом / дисс. канд. техн. наук. – Томск, 1968. – 198 с.
18. Важов В.Ф. Развитие научно-технических основ электроимпульсного бурения и резания горных пород / дисс. докт. техн. наук. – Томск, 2014. – 213 с.
19. Lisitsyn, I.V., Inoue, H., Katsuki, S., Akiyama, Drilling and demolition of rocks by pulsed power. – Digest of Tech. Pap. 12th IEEE PPC., (Cat. No.99CH36358), 169-172pp.
20. Molchanov D., Vazhov V.; Lavrinovich I. et al., Downhole generator based on a line pulse transformer for electro pulse drilling. Digest of Tech. Pap. 21st IEEE PPC, 2017. – 8291167
21. Burkin V., Kuznetsova N., Lopatin V. Dynamics of electro burst in solids: II. Characteristics of wave process, J. Phys. D: Appl. Phys. 42 (2009) 235209 (5pp)
22. He M., Jiang J., Huang G., et al. Disintegration of rocks based on magnetically isolated high voltage discharge, Rev. Sci. Instrum. 84, 024704 (2013)