

Добыча полезных ископаемых

DOI: 10.35634/UdSU.2025.26.84.014

УДК 622.24.084

О.В. Никитина, А.А. Басов

ИССЛЕДОВАНИЕ И ПОДБОР ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА СКВАЖИН В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ КАМЧАТСКОГО КРАЯ

Аннотация. В мире постоянно возрастает объём разведочного и промышленного бурения скважин различного назначения. Проблемами механического бурения являются низкие скорости проходки скважин, низкая надёжность и срок службы рабочих инструментов (буровых наконечников), особенно при бурении крепких и очень крепких горных пород. Особой проблемой является проходка скважин большого диаметра (более 300 мм). Традиционные способы бурения практически исчерпали возможности существенного увеличения производительности (скорости) бурения. Поэтому происходит поиск принципиально новых способов бурения. Одним из таких принципиально новых методов является электроимпульсный способ бурения скважин, который основан на разрушении горных пород при их электрическом импульсном пробое. Таким образом, выбор данной темы обусловлен актуальностью проблемы, перспективностью технологии электроимпульсного бурения и необходимостью разработки рекомендаций для подбора генератора импульсов напряжения (ГИН). Основная цель работы – исследование и подборе ГИН для строительства скважин в сложных горно-геологических условиях Камчатского края. Основная задача заключается в производстве расчётных обоснований, анализе характеристик оборудования и формировании методики подбора генератора, обеспечивающего высокую эффективность разрушения пород при минимальных энергозатратах. Проведенные расчеты позволили определить ключевые параметры генератора импульсного напряжения (ГИН), обеспечивающего эффективное бурение в сложных горно-геологических условиях Камчатского края. Установлено, что для разрушения крепких пород при бурении скважин диаметром свыше 300 мм требуется генератор с выходной энергией импульса 764–1709 Дж, мощностью 2,5–5,1 кВт и напряжением до 402 кВ с учетом потерь в кабеле.

Ключевые слова: электроимпульсное бурение, мощность генератора, сопротивление кабеля, индуктивное сопротивление, сила тока, напряжение на выходе, энергия импульса.

Для цитирования: Никитина О.В., Басов А.А. Исследование и подбор генератора импульсов напряжения для строительства скважин в сложных горно-геологических условиях Камчатского края // Управление техносферой: электрон. журнал, 2025. Т.8. Вып.2. С. 327–338. DOI: 10.35634/UdSU.2025.26.84.014

Введение

Электроимпульсный способ разрушения геоматериалов отличается высокая энергетическая эффективность и уникальные технологические особенности [1]. Это определяет перспективность его универсального использования в процессах добычи и переработки минерального сырья и в горнотехническом строительстве, для бурения скважин различного диаметра и назначения, дробления и измельчения руд и технических материалов, резания и поверхностной обработки массива и блочного камня. В России впервые были проведены испытания различных технологических применений способа как в лабораторных, так и в производственных условиях с подтверждением значимых технологических преимуществ способа перед традиционными [2]. Особым стимулом для развития исследований способа было то, что он по энергоэффективности разрушения крепких и особо крепких горных пород существенно превосходит традиционные способы.

В данной работе рассматривается одна из скважин месторождения на Камчатке. Вид скважины – наклонно-направленный. Длина скважины по стволу – 2200 м.

Для обеспечения эффективной работы электроимпульсной буровой установки в сложных горно-геологических условиях Камчатского края необходимо провести комплекс расчетов параметров генератора импульсного напряжения. Расчёты включают определение требуемой мощности с учетом неизбежных энергетических потерь при передаче к забою скважины, где КПД системы составляет 30-50%. Особое внимание уделяется ёмкости накопительных конденсаторов, которая определяет способность системы формировать мощные импульсы, а также анализу сопротивления бурового кабеля и связанных с ним энергетических потерь, что особенно критично для глубоких скважин. Дополнительно рассчитываются ток разряда, обеспечивающий эффективное разрушение породы и необходимое выходное

напряжение генератора с учетом падения напряжения в кабеле. Завершающим этапом является определение полного сопротивления системы (импеданса), учитывающего не только активное сопротивление, но и индуктивные характеристики кабеля на рабочих частотах. Эти расчеты позволяют подобрать оптимальные параметры ГИН для обеспечения стабильного и эффективного процесса бурения.

Расчет мощности ГИН

1) Для обеспечения эффективной работы электроимпульсной буровой установки необходимо правильно рассчитать параметры генератора импульсных напряжений (ГИН). Поскольку в процессе передачи энергии от генератора к забою скважины происходят неизбежные потери, при расчетах необходимо учитывать КПД системы, который составляет 30-50%.

С учетом КПД системы итоговая энергия импульса на выходе из генератора рассчитывается по формуле 1:

$$W_{\text{иг}} = \frac{W_3}{\text{КПД}}, \text{ где} \quad (1)$$

W_3 – энергия, запасенная на длине межэлектродного участка, Дж[3-5].

$$W_{\text{иг}} = \frac{305,6}{0,4} = 764 \text{ Дж}$$

В табл. 1 представлены расчетные значения энергии, которые должны быть созданы как на наконечнике электрода, так и на выходе генератора для различных интервалов бурения.

2) Для определения работоспособности системы необходимо рассчитать мощность генератора. Она зависит от энергии импульса и его частоты по формуле 2:

$$P = W_{\text{иг}} \cdot f, \text{ где} \quad (2)$$

f – частота импульсов (расчёты НИР-3).

$$P = 764 \cdot 4 = 3056 \text{ Вт}$$

Таблица 1

Значения энергий

Длина межэлектродного пространства, мм	Wз, Дж (Энергия на наконечнике электрода)	Wиг, Дж (Энергия на выходе генератора)
330,2	683,5	1709
245	507,2	1268
196,85	407,5	1019
196,85	498,0	1245
196,85	407,5	1019
196,85	498,0	1245
147,65	373,6	934
147,65	305,6	764

3) Рассчитаем ёмкость генератора, которая определяет способность системы накапливать и отдавать энергию по формуле 3:

$$C = \frac{2W_{иг}}{U_{пр}^2}, \text{ где} \quad (3)$$

$U_{пр}$ – минимальное напряжение пробоя породы [6], В.

$$C = \frac{2 \cdot 764}{400000^2} = 9,55 \text{ нФ}$$

4) При проектировании системы энергоснабжения особое внимание уделяется сопротивлению кабеля, так как оно влияет на потери энергии по формуле 4:

$$R_{каб} = \frac{\rho_c \cdot l}{S}, \text{ где} \quad (4)$$

ρ_c – удельное электрическое сопротивление для меди 0,0175 Ом·мм²/м;

l – длина кабеля, м;

S – сечение жилы: 150 мм² (медь).

$$R_{каб} = \frac{0,0175 \cdot 2200}{150} = 0,257 \text{ Ом}$$

5) Ток разряда является критически важным параметром для обеспечения эффективного разрушения породы по формуле 5:

$$I = \frac{U_{\text{пр}}}{R}, \text{ где} \quad (5)$$

R – сопротивление канала разряда для базальтов $\approx 50 \text{ Ом}$ [7].

$$I = \frac{400000}{50} = 8 \text{ кА}$$

6) Для минимизации потерь необходимо учитывать падение напряжения в кабеле по формуле 6:

$$\Delta U = I \cdot R_{\text{каб}} \quad (6)$$

$$\Delta U = 8000 \cdot 0,257 = 2053 \text{ В}$$

7) С учетом падения напряжения рассчитаем необходимое напряжение на выходе генератора при напряжении на забое 400 кВ при токе 8 кА по формуле 7:

Сопротивление разрядного канала ($R_{\text{канала}} = 50 \text{ Ом}$);

Падение напряжения на кабеле 2053 В.

$$U_{\text{ген}} = I \cdot (R_{\text{кан}} + R_{\text{каб}}) \quad (7)$$

$$U_{\text{ген}} = 8000 \cdot (50 + 0,257) = 402053 \text{ В}$$

8) Импеданс (Z – полное сопротивление) на частоте импульса играет ключевую роль в передаче импульсного напряжения от генератора к забою скважины. В отличие от постоянного тока, в импульсных системах необходимо учитывать не только активное сопротивление кабеля, но и его индуктивную и емкостную составляющие по формуле 8:

$$Z = \sqrt{R_{\text{каб}}^2 + 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L}, \text{ где} \quad (8)$$

f – частота импульсов индуктивности кабеля 200 кГц [8];

L – общая индуктивность $\frac{2200}{200000} = 0,00044 \text{ Гц}$.

$$Z = \sqrt{0,257^2 + 2 \cdot \pi \cdot 200000 \cdot 0,00044} = 553 \text{ Ом, где}$$

В табл. 2 приведены итоговые параметры для генератора импульсов напряжения:

Таблица 2

Итоговые параметры генератора

Интервалы по стволу, м	P, Вт (на выходе ГИН)	C, нФ	R, Ом (Кабеля)	ΔU , Вт (падение напряжения)	U ген, Вт	Z (Импеданс), Ом (Общее сопротивление с индуктивностью)
70	5126	21,36	0,008	65	400065,3	18
280	3804	15,85	0,033	261	400261,3	70
288	3056	12,73	0,034	269	400268,8	72
491	2490	15,56	0,057	458	400458,3	123
1200	3056	12,73	0,140	1120	401120	302
1288	2490	15,56	0,150	1202	401202,1	324
1867	2802	11,67	0,218	1743	401742,5	469
2200	3056	9,55	0,257	2053	402053,3	553

Рассчитанные параметры генератора импульсных напряжений при длине кабеля (2200 м) - мощность 3056 Вт, емкость 9,55 нФ и выходное напряжение 402053 В с учетом падения в кабеле - обеспечивают необходимую энергию для разрушения породы. Однако особое значение имеет учет импеданса системы (553 Ом), требующий применения двухступенчатой LC-фильтрации для стабилизации импульсов.

Подбор ГИН

Для обеспечения технологического процесса с напряжением 402 кВ, силой тока 8 кА и ёмкостью 9,55 нФ оптимальным решением является генератор Аркадьева-Маркса, используемый в электроимпульсном бурении. Его характеристики не только полностью соответствуют требованиям, но и существенно их превосходят: выходное напряжение достигает 600 кВ (при необходимых 402 кВ), ток — 10 кА (вместо 8 кА), а энергия импульса составляет 5,25 кДж, что значительно выше расчетного диапазона 305,6–764 Дж (табл. 3).

Сравнительный анализ показывает, что несмотря на несколько повышенные значения емкости (29,17 нФ против требуемых 9,55 нФ) и

сопротивлений, генератор Аркадьева-Маркса обеспечивает значительный запас по мощности, что критически важно при работе с неоднородными горными породами. Его применение позволяет компенсировать неизбежные потери энергии в кабельной линии и гарантирует стабильное образование пробойных каналов даже в наиболее крепких разновидностях базальтов.

Таблица 3

Генератор Аркадьева-Маркса

Параметр	Значение
Напряжение на выходе	600 кВ
Ток	10 кА
Ёмкость	29,17 нФ
Сопротивление кабеля	73,528 Ом
Индуктивное сопротивление	2,356 кОм
Энергия импульса	5,25 кДж

Генератор Аркадьева-Маркса представляет собой оптимальное решение для электроимпульсного бурения благодаря своей уникальной способности генерировать мощные высоковольтные импульсы. Его работа основана на принципе каскадного умножения напряжения, что позволяет достигать исключительных параметров, необходимых для эффективного разрушения горных пород. Конструкция генератора отличается высокой надежностью за счет модульной архитектуры и использования газонаполненных разрядников вместо механических переключателей, что обеспечивает наносекундное быстроедействие и длительный срок службы.

Для буровых работ особую ценность представляет способность генератора формировать сверхкороткие импульсы с высокой крутизной фронта, что создает оптимальные ударные волны для разрушения кристаллической структуры пород. Гибкая регулировка частоты следования импульсов позволяет адаптировать процесс бурения к различным типам горных образований. Важным преимуществом является масштабируемость системы - количество ступеней можно легко изменять в зависимости от конкретных технических требований.

Сравнительный анализ выбора генератора Аркадьева-Маркса

Для объективной оценки преимуществ генератора Аркадьева-Маркса и подтверждения его оптимальности для электроимпульсного бурения проведём детальное сравнение с альтернативными типами генераторов в табл. 4.

Таблица 4.

Сравнение характеристик генераторов

Параметр	Генератор Аркадьева-Маркса	LC-генераторы	Твердотельные генераторы
Выходное напряжение	600 кВ	до 200 кВ	до 100-200 кВ
Ток разряда	10 кА	до 5 кА	до 5 кА
Энергия импульса	5,25 кДж	до 1 кДж	до 1,5 кДж
Ёмкость	29,17 нФ	9-15 нФ	10-20 нФ
Длительность импульса	10-100 нс	500-1000 нс	50-200 нс
Частота следования	до 10 Гц	до 10 Гц	до 1 кГц
КПД системы	до 90%	60-70%	70-80%
Срок службы	8-10 лет	2-3 года	5-7 лет
Стоимость оборудования	1,2-1,5 млн руб.	0,8-1 млн руб.	1-1,3 млн руб.
Эксплуатационные затраты	50-70 тыс. руб./год	150-200 тыс. руб./год	100-150 тыс. руб./год
Устойчивость к условиям	Высокая	Средняя	Средняя

Заключение

Генератор Аркадьева-Маркса, несмотря на более высокую начальную стоимость (1,2-1,5 млн руб. против 0,8-1 млн руб. у LC-генераторов), демонстрирует лучшую экономическую эффективность в долгосрочной перспективе. Это достигается за счет значительно меньших эксплуатационных расходов (50-70 тыс. руб./год против 150-200 тыс. руб./год) и более длительного срока службы (8-10 лет против 2-3 лет).

Технические характеристики генератора (600 кВ, 10 кА, 5,25 кДж) обеспечивают надежную работу в сложных условиях бурения, превосходя аналоги по всем ключевым параметрам. Особенно важно преимущество

по энергии импульса (в 5-7 раз выше LC-генераторов) и КПД (на 20-30% выше), что делает его оптимальным выбором для электроимпульсного бурения, несмотря на необходимость решения проблемы перегрева кабеля.

Также основным преимуществом генератора является способность оборудования сохранять работоспособность и стабильность параметров при работе в сложных внешних условиях, характерных для буровых работ: вибрации, запылённость, агрессивные среды, перепад температур (от -30°C до +50°C).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев А.А. Разрушение горных пород электрическими импульсными разрядами. Томск: Изд-во ТГУ, 1961. 150 с.
2. Воробьев А.А., Воробьев Г.А. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. М.: Высшая школа, 1966. 224 с.
3. Электроимпульсный способ разрушения горных пород: патент RU 2232271 С1. Рос. Федерация. № 2003105524/03/ Важов В.Ф., Журков М.Ю., Муратов В.М.; заявл. 25.02.2003; опубл. 10.07.2004, Бюл. 6 с.
4. Электроимпульсный способ бурения скважин и буровое долото: патент RU 2464402 С2. Рос. Федерация. № 2010152925/03/ Важов В.Ф., Муратов В.М., Лопатин В.В., Гафаров Р.Р., Дацкевич С.Ю., Журков М.Ю.; заявл. 23.12.2010; опубл.: 20.10.2012. Бюл. № 29. 12 с.
5. Способ электроимпульсного бурения скважин, электроимпульсной буровой наконечник: патент RU 2524101 С2. Рос. Федерация. № 2011111014/03/ Рязанов Н.Д., Рязанова Н.Г.; заявл. 23.03.2011; опубл.: 27.07.2014 Бюл. № 21. 10 с.
6. Месяц Г.А. Насибов А.С. Кремнев В.В. Формирование наносекундных импульсов высокого напряжения, М. Энергия, 1970, 41 с.
7. Генератор импульсов напряжения: патент Рос. Федерация № 2090020; заявл. 08.04.94; опубл. 10.09.97.
8. Гончаренко Г.М., Дмоховская Л.Ф., Жаков Е.М. Испытательные установки и измерительные устройства в лабораториях высокого напряжения. М.: МЭИ, 1966. 159 с.

Поступила в редакцию: 07.05.2025

Сведения об авторах*Никитина Ольга Витальевна*

канд. техн. наук, доцент кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», Институт нефти и газа им. М.С. Гущериева, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Удмуртский государственный университет», 426034, ул. Университетская, 1, г. Ижевск, Россия.

E-mail: nikitina_olgavit@mail.ru

Басов Артём Алексеевич

магистрант, Институт нефти и газа им. М.С. Гущериева, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Удмуртский государственный университет», 426034, ул. Университетская, 1, г. Ижевск, Россия.

E-mail: Artem090401@yandex.ru

O.V. Nikitina, A.A. Basov

RESEARCH AND SELECTION OF A VOLTAGE PULSE GENERATOR FOR DRILLING WELLS IN COMPLEX GEOLOGICAL CONDITIONS OF THE KAMCHATKA REGION

Annotation. The global volume of exploratory and industrial drilling for various purposes is constantly increasing. Mechanical drilling faces challenges such as low penetration rates, reduced reliability, and short service life of drilling tools (drill bits), especially when drilling hard and very hard rock formations. A particular challenge is the drilling of large-diameter wells (over 300 mm). Traditional drilling methods have practically exhausted their potential for significantly increasing drilling productivity (speed). Therefore, fundamentally new drilling methods are being explored. One such innovative method is electroimpulse (electro-pulse) drilling, which is based on rock destruction through electrical impulse breakdown. Thus, the relevance of this study is determined by the significance of the problem, the promising nature of electro-pulse drilling technology, and the need to develop recommendations for selecting a voltage pulse generator (VPG). The main objective of the work is to research and select a VPG suitable for well construction in the complex geological conditions of the Kamchatka region. The primary task involves performing calculations, analyzing equipment characteristics, and developing a methodology for selecting a generator that ensures high efficiency in rock destruction with minimal energy consumption. The performed calculations allowed determining the key parameters of a voltage pulse generator (VPG) that ensure efficient drilling in the complex geological conditions of the Kamchatka region. It was established that for breaking hard rocks when drilling wells with a diameter exceeding 300 mm, a generator with an output pulse energy of 764–1709 J, power of 2.5–5.1 kW, and voltage up to 402 kV (accounting for cable losses) is required.

Keywords: electro-pulse drilling, generator power, cable resistance, inductive resistance, electric current intensity, output voltage, pulse energy.

For citation: Nikitina O.V., Basov A.A. [Research and selection of a voltage pulse generator for drilling wells in complex geological conditions of the Kamchatka region]. *Upravlenie tekhnosferoi*, 2025, vol. 8, issue 2, pp. 327–338. DOI: 10.35634/UdSU.2025.26.84.014. (In Russ.).

REFERENCES

1. Vorob'ev A.A. *Razrushenie gornykh porod elektricheskimi impul'snymi razryadami*. [Destruction of rocks by electric pulse discharges]. Tomsk: TSU Publ., 1961, 150 p. (In Russ.).
2. Vorob'ev A.A., Vorob'ev G.A. *Elektricheskii proboi i razrushenie tverdykh dielektrikov*. [Electrical breakdown and destruction of solid dielectrics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1966, 224 p. (In Russ.).

3. *Elektroimpul'snyi sposob razrusheniya gornykh porod: patent RU 2232271 S1*. [Electric pulse method of rock destruction: patent RU 2232271 C1]. No. 2003105524/03/ Vazhov V.F., Zhurkov M.Yu., Muratov V.M.; appl. 25.02.2003; publ. 10.07.2004, Bul. 6 p.
4. *Elektroimpul'snyi sposob bureniya skvazhin i burovoe doloto: patent RU 2464402 C2*. Ros. Federatsiya. [Electric pulse drilling method and drill bit: patent RU 2464402 C2. Russian The Federation]. No. 2010152925/03/ Vazhov V.F., Muratov V.M., Lopatin V.V., Gafarov R.R., Datskevich S.Yu., Zhurkov M.Yu.; appl. 23.12.2010; publ.: 10/20/2012. Bul. No. 29, 12 p.
5. *Sposob elektroimpul'snogo bureniya skvazhin, elektroimpul'snoi burovoi nakonechnik: patent RU 2524101 C2*. Ros. Federatsiya. [Method of electric pulse drilling of wells, electric pulse drilling tip: patent RU 2524101 C2. Ros. The Federation]. No. 2011111014/03/ Ryazanov N.D., Ryazanova N.G.; appl. 23.03.2011; publ.: 27.07.2014, Bul. no. 21, 10 p.
6. Mesyats G.A. Nasibov A.S. Kremnev V.V. Formirovanie nanosekundnykh impul'sov vysokogo napryazheniya. [Formation of nanosecond pulses of high voltage], Moscow: Energiya, 1970, 41 p. (In Russ.).
7. *Generator impul'sov napryazheniya: patent no 2090020*. Ros. Federatsiya [Voltage pulse generator: the patent grew]. Ros. Federation No. 2090020; appl. 08.04.94; publ. 10.09.97.
8. Goncharenko G.M., Dmokhovskaya L.F., Zhakov E.M. *Ispytatel'nye ustanovki i izmeritel'nye ustroystva v laboratoriyakh vysokogo napryazheniya*. [Testing facilities and measuring devices in high voltage laboratories]. Moscow: MEI, 1966, 159 p. (In Russ.).

Received: 07.05.2025

About the Authors

Nikitina Olga Vitalievna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Oil and Gas Drilling, M.S. Gutseriev Institute of Oil and Gas, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Udmurt State University, 1 Universitetskaya str., Izhevsk, 426034, Russia.

E-mail: nikitina_olgavit@mail.ru

Basov Artem Alekseevich

Master's student, M.S. Gutseriev Institute of Oil and Gas, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Udmurt State University", 426034, Universitetskaya str., 1, Izhevsk, Russia. E-mail: Artem090401@yandex.ru