

# Страницы истории ТПУ

УДК 622.243.1

## РЕКТОР ТПИ А.А. ВОРОБЬЕВ – ИЗОБРЕТАТЕЛЬ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО СПОСОБА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

А.М. Адам

Томский политехнический университет  
E-mail: muratov@hvd.tpu.ru

*Представлена история создания электроимпульсного способа разрушения горных пород ректором ТПИ А.А. Воробьевым.*

### **Ключевые слова:**

*Ректор А.А. Воробьев, изобретатель, электроимпульсный способ, разрушение горных пород, изобретение, научное открытие.*

### **Key words:**

*Rector A.A. Vorob'yov, inventor, electropulse method, rocks destruction, invention, scientific discovery.*

Многогранная деятельность ректора (1944–1970) Томского политехнического института (ТПИ) А.А. Воробьева как высококлассного руководителя и талантливого ученого рассмотрена в многочисленных публикациях, например в [1, 2]. Но ни в одной работе нет материалов, убедительно доказывающих, что А.А. Воробьев является изобретателем электроимпульсного способа разрушения горных пород. Однако в мировой практике изобретателями признают лишь тех новаторов, технические решения которых защищены патентами или авторскими свидетельствами на изобретения, и никакие публикации, доклады, дипломы на открытия, диссертации не могут заменить эти охранные документы. Показателен пример с изобретением радио. Замечательный русский физик А.С. Попов 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Русского физико-химического общества продемонстрировал беспроводную электросвязь, о чем в журнале общества приведены публикации в 1895 и 1896 гг. Однако итальянский радиотехник Маркони в 1896 г. подал заявку на изобретение, а в 1897 г. получил английский патент, в котором принцип действия системы электросвязи без проводов и схема радиоприемника были тождественны созданным А.С. Поповым. Но во всем мире, кроме нашей страны, изобретателем радио признают только итальянца Г. Маркони, которому за развитие радиотехники и распространение радио в 1909 г. была присуждена Нобелевская премия.

Ее учредитель Альфред Нобель был обладателем более 350 патентов на изобретения.

Первая заявка на изобретение А.А. Воробьева в соавторстве с Е.К. Завадовской «Способ разрушения горных пород и полезных ископаемых» имеет приоритет от 26 июня 1951 г. Предмет этого изобретения следующий: «Способ разрушения горных пород и полезных ископаемых с помощью электрических разрядов в них, отличающийся тем, что с целью повышения его эффективности разрушение производят импульсными электрическими разрядами при достижении напряженности поля в горной породе или полезном ископаемом, равной или превышающей их электрическую прочность» [3]. Уже первое изобретение по электроимпульсной технологии содержит такие важные существенные признаки электроимпульсного способа, как определенная величина напряженности электрического поля, разрушение горных пород и полезных ископаемых непосредственно высоковольтными электрическими разрядами, развивающимися внутри разрушаемых материалов. Эти признаки являются одними из основных отличий электроимпульсного способа от других электро-разрядных способов разрушения горных пород, в том числе от электрогидравлического, изобретенного Л.А. Юткиным и Л.И. Гольцовой 16 января 1952 г. [4] и основанного на развитии высоковольтных разрядов не внутри разрушаемого материала, а в воде над этим материалом [5].

Новый способ был создан А.А. Воробьевым не случайно. Еще до зачисления его в 1938 г. в штат сотрудником Томского индустриального института (с 1944 г. — ТПИ) он активно занимался электрическим пробоем твердых и жидких диэлектриков в однородных и неоднородных полях для нужд электроаппаратостроения. Так, при рассмотрении вопросов по формированию электрического пробоя твердых диэлектриков [6] использованы материалы, полученные А.А. Воробьевым еще в 1934 г. Успеху в научной работе способствовала организация в 1946 г. кафедры техники высоких напряжений, которой руководил А.А. Воробьев, в 1953 г. — проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники, диэлектриков и полупроводников, а в 1955–1959 гг. — первой в Сибири высоковольтной лаборатории, оснащенной установками для получения высоких постоянных, переменных и импульсных напряжений. Во второй половине 40-х гг. в ТПИ впервые были выполнены исследования по отбойке горных пород (каменных углей и горючих сланцев) высоковольтными импульсными разрядами.

Наиболее полно материалы этих исследований приведены в кандидатской диссертации И.И. Калыцкого [7], ученика А.А. Воробьева, который сменил своего учителя на посту ректора ТПИ в 1970 г. Окончательно сформулировать сущность электроимпульсного способа разрушения твердых диэлектриков, в т. ч. горных пород, позволили работы еще двух учеников А.А. Воробьева: Г.А. Воробьева и А.Т. Чепикова, которые выявили существенное влияние на внедрение высоковольтных импульсных разрядов в твердый диэлектрик временного фактора. Г.А. Воробьев провел исследования электрического пробоя твердых диэлектриков при различных временах воздействия импульсного напряжения [8], а А.Т. Чепиков экспериментально показал влияние временного фактора на моделях буровых устройств [9]. Результатом многолетних работ А.А. Воробьева и его учеников явилось изобретение, определяющее сущность электроимпульсного способа разрушения горных пород и дату его приоритета: «Способ бурения электрическими импульсными разрядами». Это изобретение защищено авторским свидетельством № 237073 с приоритетом от 14 апреля 1959 г. [10]. Предмет этого изобретения изложен следующим образом: «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».

Сведения об этом изобретении в открытой печати ранее не публиковались. С 2004 г. в Интернете (сайт Федерального агентства по интеллектуальной собственности) можно ознакомиться лишь с формулой изобретения, поэтому ниже приведено полное его описание: «Известен способ бурения

скважин с помощью искровых разрядов в жидкой среде. Описываемый способ отличается 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. Для осуществления этого способа при проходке скважин с использованием разрядов в породе медная токоведущая труба заканчивается плоским или коническим наконечником, на поверхности которого имеются выступы — искровые электроды. Разряды с этих электродов разрушают породу под ними. После образования углубления под каким-либо острием-выступом на конической поверхности (наконечника) углубление (в породе) заполняется маслом. При подаче следующего импульса напряжения разряд происходит в одном месте, а затем в другом. Объем выемки будет определяться свойствами грунта, формой электрода, напряжением и энергией импульса. Масло, захватывая продукты разрушения, входит во внутреннюю трубу и далее наружу. После выработки некоторого объема породы вблизи электрода вся связанная система (обсадная труба и электроды) под действием собственного веса опускается ниже. При заданной величине электрической прочности горной породы, выбирая соответствующую величину разрядного напряжения масла и скорость развития разряда, можно добиться того, что пробой будет происходить преимущественно в разрабатываемой породе, а не в обсадной трубе» [10].

Основой способа является установленная в ТПИ А.А. Воробьевым и его учениками закономерность превышения электрической прочности жидких диэлектриков над электрической прочностью твердых диэлектриков при малых временах нарастания импульса напряжения до пробоя: менее  $5 \cdot 10^{-6}$  с. Это связано с тем, что с уменьшением времени экспозиции импульсного напряжения электрическая прочность жидких диэлектриков растет быстрее, чем твердых, и даже электрическая прочность воды становится выше прочности твердых диэлектриков. Вольт-секундные характеристики пробоя на фронте косоугольных импульсов напряжения в системе «острие—плоскость» для трансформаторного масла, фторопласта и технической воды представлены на рис. 1. Этот и следующий рисунки впервые приведены в кандидатской диссертации А.Т. Чепикова в 1961 г. [9]. Как видно из рис. 1, в точке «а» пробивное напряжение фторопласта-4 становится равным пробивному напряжению технической воды, а в точке «б» — трансформаторного масла. Левее этих точек электрическая прочность фторопласта-4 меньше электрической прочности жидкостей. Кроме фторопласта в качестве твердых диэлектриков были использованы образцы нескольких десятков видов горных пород, в том числе таких крепких, как кварцит, роговик, гранит, и получены аналогичные вольт-секундные характеристики, причем исследования проводились не при сквозном пробое, как показано на рис.

1, а в условиях, приближенных к процессу бурения: на одну сторону образца горной породы, погруженного в жидкую среду, устанавливались два разнополярных стержневых электрода.

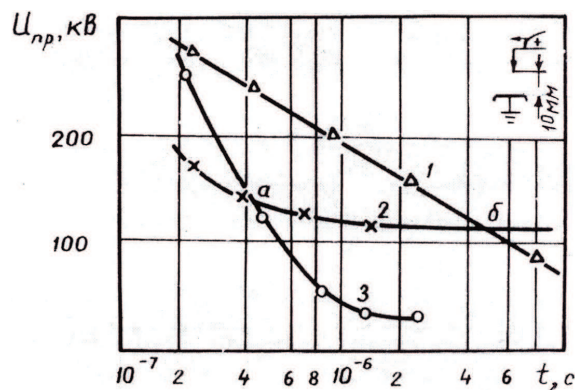


Рис. 1. Вольт-секундные характеристики: 1) трансформаторное масло; 2) фторопласт; 3) техническая вода [9]

Чтобы проследить пути развития разрядов в твердом диэлектрике при бурении скважин, на образец фторопласта-4 накладывалось токопроводящее кольцо, а в центре кольца перпендикулярно к образцу устанавливался высоковольтный стержневой электрод [9]. На приведенном на рис. 2 вертикальном разрезе образца четко видны каналы электрического пробоя фторопласта между концом высоковольтного электрода и нижним торцом заземленного кольца. При достаточной энергии импульса происходит отрыв от образца материала, расположенного над каналом пробоя. Образующаяся воронка заполняется жидкостью, в которую предварительно погружен образец, и следующий разряд происходит в другом месте образца. Многоимпульсное воздействие приводит к формированию скважины. Оторванный разрядами материал (шлам) выносятся из призабойной зоны с использованием прямой или обратной схем промывки скважины.

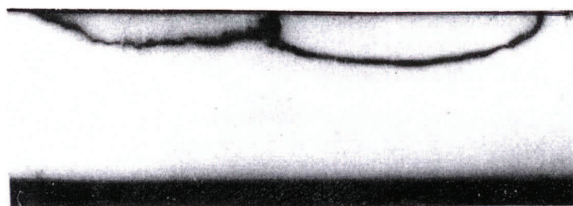


Рис. 2. Фотография каналов электрического пробоя в образце фторопласта-4 толщиной 20 мм, погруженного в трансформаторное масло. Электроды «стержень в центре кольца» расположены на одной поверхности образца с промежутком 30 мм [9]

Электроимпульсный способ разрушения твердых диэлектриков, в т. ч. горных пород, явился основой научного открытия (диплом № 107) А.А. Воробьева, Г.А. Воробьева и А.Т. Чепикова «Закономерность пробоя твердого диэлектрика на границе раздела с жидким диэлектриком при действии импульса напряжения» (приоритет открытия: 14 декабря 1961 г.) [11]. Путь к признанию открытия был

непростым. Первоначально заявка была подана в Государственный комитет Совета Министров СССР по делам изобретений и открытий в 1986 г. (№ ОТ-11384 от 2 июня 1986 г.). По ее материалам были сделаны доклады в научных организациях, в основном академических, расположенных в г. Томске, Кемерове, Москве и Ленинграде. Почти все заключения, в том числе всемирно известного ученика А.А. Воробьева академика Г.А. Месяца, были положительными. Не обошлось и без отрицательных заключений, что затормозило рассмотрение заявки. Это связано с тем, что физическая сущность открытия до сих пор не имеет однозначного объяснения. Так, у авторов открытия [12], Г.А. Месяца [13] и других ученых [14] гипотезы, объясняющие явление внедрения канала разряда в твердый диэлектрик, заметно отличаются.

Лишь в 1998 г. заявка (№ А-122 от 29 апреля 1998 г.) была передана в Российскую Академию естественных наук, а 27 июля 1999 г. Международная ассоциация авторов научных открытий зарегистрировала открытие, в первоначальном названии которого слово «свойство» было заменено словом «закономерность». Окончательная формула открытия такова: «Экспериментально установлена неизвестная ранее закономерность пробоя твердого диэлектрика на границе раздела с жидким диэлектриком при действии импульса напряжения, заключающаяся в том, что при подаче импульса напряжения с достаточно крутым фронтом на электроды с большой кривизной происходит пробой твердого диэлектрика, обусловленный образованием в приэлектродной области в жидкости объемного заряда, препятствующего развитию разряда в жидкости и одновременно способствующего развитию разряда в твердом диэлектрике».

Открытие относится к области физических явлений в диэлектриках в сильных электрических полях, а именно к их пробой. Хорошо известно, что напряженность электрического поля, при котором происходит пробой, у жидких и газообразных диэлектриков меньше, чем у твердых. Поэтому при испытании твердого диэлектрика на пробой всегда выполняются условия, чтобы напряженность поля в газе или жидкости, которые окружают этот твердый диэлектрик, была меньше, чем в твердом диэлектрике, а длина пути электрического разряда — значительно больше.

Авторы обнаружили, что в импульсных электрических полях эта ситуация может измениться на обратную, т. е. электрически более прочными оказываются жидкости, а не твердые тела. Это качественно новое явление они подвергли и количественному анализу. Оказалось, что у жидкостей (трансформаторное масло, вода) пробивное поле нарастает с уменьшением длительности импульса напряжения быстрее, чем у твердых тел. При уменьшении длительности от десятка секунд до долей микросекунды у твердого тела напряжение пробоя возрастает примерно в полтора раза, тогда как у жидкостей — в четыре–шесть раз.

Научное значение открытия состоит в том, что оно вносит коренные изменения в представления о развитии разряда на границе двух диэлектриков и позволяет более глубоко понять происходящие при этом разрядные процессы.

Практическое значение открытия заключается в том, что на его основе разработана новая электроимпульсная технология разрушения твердых тел многоцелевого назначения».

А.А. Воробьев является изобретателем не только электроимпульсного способа, но и устройств [15, 16], реализующих этот способ (оба изобретения имеют приоритет от 17 ноября 1960 г.). Более подробно остановимся на первом из них. Прежде всего, обращает на себя внимание то, что юридически это изобретение является дополнительным к изобретенному ранее способу бурения электрическими импульсными разрядами [10], т. к. в ограничительной части предмета изобретения буре указано, что изобретение создано «по авторскому свидетельству № 237073»: «Бур для проходки скважин электрическими импульсными разрядами по авторскому свидетельству № 237073, отличающийся тем, что к нижнему концу токопроводящего стержня прикреплены с возможностью перемещения в осевом направлении не изолированные от окружающей жидкости электроды, расположенные по окружности и в центре торцевой части трубы».

В открытой печати сведения по этому буру ограничены. С 10.04.2004 г. в Интернете можно ознакомиться лишь с формулой изобретения. В Большой советской энциклопедии [17] в информации по электроимпульсному бурению ошибочно описан не этот бур, а электрогидравлический [4], не позволяющий вести проходку скважин электроимпульсным способом. В связи с этим представляет интерес привести полные материалы по бурю, изобретенному А.А. Воробьевым и А.Т. Чепиковым [15]. На рис. 3 представлен общий вид бура, приведенный в заявочных материалах на фиг. 1 и имеющий следующее описание: «Известен бур для проходки скважин электрическими импульсными разрядами по авт. св. № 237073. Описываемый бур является развитием авторского свидетельства № 237073 и отличается от известного тем, что к нижнему концу токопроводящего стержня прикреплены с возможностью перемещения в осевом направлении не изолированные от окружающей жидкости электроды, расположенные по окружности и в центре торцевой части трубы. На фиг. 1 изображен описываемый бур, общий вид; на фиг. 2 — схема расположения электродов. Бур включает полый центральный стержень 1, на который подаются импульсы напряжения, он оканчивается пятью электродами 2, четыре из которых расположены по окружности, а пятый — по оси трубы. Заземленная труба имеет четыре выреза 3, образующие четыре заземленные электрода 4, расположенные на одинаковых расстояниях от высоковольтных электродов 2. Стержень от трубы изолируется при по-

мощи проходного изолятора из фторопласта-4, полиэтилена или других высококачественных изолирующих материалов, обладающих достаточной эластичностью. Стержень и труба изготовлены из стали. По полному стержню на забой скважины подается жидкость, служащая в качестве жидкой среды при бурении и для удаления бурового шлама».

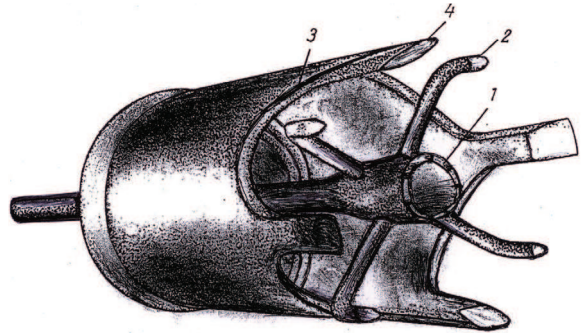


Рис. 3. Электроимпульсный бур А.А. Воробьева и А.Т. Чепикова по фиг. 1 к описанию а. с. № 282216 [15]

Удивительным является то, что, хотя данная конструкция бура была разработана много лет назад и к настоящему времени предложены десятки видов электроимпульсных буровых снарядов и наконечников, рассматриваемый бур (рис. 3) является одним из наиболее эффективных. Для сравнения конструкций на рис. 4 приведен перспективный современный буровой наконечник для электроимпульсного бурения скважин сплошного забоя [18]. Отличие последнего состоит лишь в том, что призабойные концы электродов не заострены и центральный электрод не имеет осевого отверстия. Выполнение центрального электрода полым является основой электроимпульсного колонкового бура радиально-тангенциального типа [19], конструкция которого (рис. 5) имеет много общего с первым буром [15].



Рис. 4. Буровой наконечник для проходки скважин сплошного забоя электроимпульсным способом [18]



А.А. Воробьев большое внимание уделял и разработке оборудования для получения импульсов высокого напряжения [21, 22], в т. ч. необходимого для реализации предложенного способа. Эффективность электроимпульсного бурения была многократно показана при различных условиях. Так, в Рудном Алтае на месторождении полиметаллических руд в микрокварците пробурены десятки взрывных скважин глубиной до 20 м и одна скважина глубиной 47,5 м. Общий метраж скважин, пробуренных в микрокварцитах, составил около 1000 м [20]. В г. Томске возле 11-го корпуса ТПИ (район Лагерного сада) в окварцованном песчанике электроимпульсным способом пройдена скважина в интервале от 154 до 233 м, причем интервал 195...197 м пробурен с отбором керна. На Степановском карьере г. Томска в глинистых сланцах и окварцованном песчанике несколько колонковых скважин глубиной 10...14 м пробурено с промывкой водой. С использованием в качестве промывочной жидкости дизельного топлива на этом же карьере было пробурено несколько колонковых скважин глубиной до 37,5 м и три скважины большего диаметра (более 500 мм) глубиной до 9 м; в условиях Крайнего Севера (Магаданская область — пройдено две скважины глубиной 8,8 и 14,3 м). На Кольском полуострове испытана установка для электроимпульсного бурения в подземных условиях [14]. Техничко-экономические показатели электроимпульсного бурения значительно превосходят показатели других известных способов. Электроимпульсный способ разрушения успешно испытан также при дроблении горных пород, проходке щелей, резании блоков горных пород, обработке поверхности (пассировке) блоков, разрушении некондиционных железобетонных изделий.

Нет возможности в одной статье всесторонне рассмотреть достигнутые результаты, проанализировать преимущества электроимпульсного способа, перечислить десятки ученых, работавших в рассматриваемой области, авторов диссертационных работ, в т. ч. нескольких докторских, упомянуть зарубежные разработки. Однако приведенные мате-

риалы, в первую очередь по авторскому свидетельству СССР № 237073 «Способ бурения электрическими импульсными разрядами» [10] и по авторскому свидетельству СССР № 282216 «Бур для проходки скважин электрическими импульсными разрядами» [15], достаточно обоснованно показывают, что высокoeffективный электроимпульсный способ разрушения горных пород, основанный на пробое и разрушении твердых диэлектриков электрическими разрядами, изобретен в ТПИ 14 апреля 1959 г. и главным его изобретателем является ректор института, член-корреспондент АПН СССР, профессор, доктор физико-математических наук, заслуженный деятель науки и техники РСФСР А.А. Воробьев.

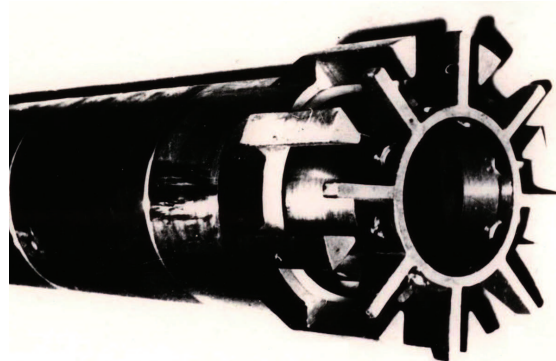


Рис. 5. Электроимпульсный колонковый бур радиально-тангенциального типа [19]

Необходимость обоснования приоритета изобретения электроимпульсного способа разрушения горных пород вызвана тем, что в последние годы во многих странах (США, ФРГ, Японии, Норвегии, Швейцарии, Великобритании и т. д.) этому способу уделяют все большее внимание. Например, в странах Западной Европы активно изучают возможности его применения при бурении геотермальных скважин (ФРГ, Швейцария) и при проходке стволов в крепких горных породах для захоронения отходов атомного производства (Швеция).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андронов Л.И., Беляев С.А., Бугаев С.П., Вайнштейн Р.А., Вяткин Н.А., Дульзон А.А., Заворин А.С., Литвак В.В., Похолоков Ю.П., Ушаков В.Я., Чуков Н.П. Сибирская энергетическая школа. — Томск: Изд-во НТЛ, 2001. — 232 с.
2. Сипайлов Г.А. Воспоминания о встречах с А.А. Воробьевым // Наш политехнический. — Томск: Изд-во «Красное Знамя», 1996. — С. 89–94.
3. Способ разрушения горных пород и полезных ископаемых: А.с. 195403 СССР № 1117323/03; заявл. 26.06.51; опубл. 10.04.04, Бюл. № 10. — 2 с.
4. Способ бурения шпуров и скважин и устройство для его осуществления: А.с. 100876 СССР № 9898/450089; заявл. 16.01.52; опубл. 1955, Бюл. № 6. — 2 с.: ил.
5. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект. — Л.: Изд-во «Машиностроение», 1986. — 254 с.
6. Воробьев А.А., Воробьев Г.А. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. — М.: Высшая школа, 1966. — 224 с.
7. Каляцкий И.И. Разрушение каменных углей и горных пород импульсными разрядами высокого напряжения: дис. ... канд. техн. наук. — Томск, 1953. — 254 с.
8. Воробьев Г.А. Исследование электрического пробоя твердых диэлектриков при различных временах воздействия напряжения: дис. ... канд. техн. наук. — Томск, 1956. — 236 с.
9. Чепиков А.Т. Исследование разрушения горных пород импульсными электрическими разрядами: дис. ... канд. техн. наук. — Томск, 1961. — 268 с.
10. Способ бурения электрическими импульсными разрядами: А.с. 237073 СССР № 714578/03; заявл. 14.04.59; опубл. 10.04.04, Бюл. № 10. — 2 с.
11. Воробьев А.А., Воробьев Г.А., Чепиков А.Т. Закономерности пробоя твердого диэлектрика на границе раздела с жидким ди-

- электриком при действии импульса напряжения. Приоритет открытия 14.12.1961. Диплом 107 // Научные открытия. Сборник кратких описаний. – М.; СПб.: РАЕН, 1999. – Вып. 1. – С. 36–38.
12. 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.
13. Месяц Г.А. О природе «эффекта Воробьевых» в физике импульсного пробоя твердых диэлектриков // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31. – Вып. 24. – С. 51–59.
14. Семкин Б.В., Усов Ю.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. – СПб.: Наука, 1995. – 276 с.
15. Бур для проходки скважин электрическими импульсными разрядами: А.с. 282216 СССР № 708742/03; заявл. 17.11.60; опубл. 10.04.04, Бюл. № 10. – 3 с.: ил.
16. Устройство для резания горных пород электрическими импульсными разрядами: А.с. 220909 СССР № 708741/03; заявл. 17.11.60; опубл. 10.04.04, Бюл. № 10. – 3 с.: ил.
17. Кутузов Б.Н. Электроимпульсное бурение // Большая советская энциклопедия. – М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1978. – Т. 30. – С. 161–162.
18. Advanced Drilling and Well Technology / Aadnøy B.S., Cooper I., Miska S.Z., Mitchell R.F., Payne M.L. – Richardson, Texas: Society of Petroleum Engineers, 2009. – P. 785–796.
19. Радиально-тангенциальный электроимпульсный бур: А.с. 710293 СССР № 982614/03; заявл. 22.04.67; опубл. 15.10.93, Бюл. № 37–38. – 4 с.: ил.
20. Исследование процесса бурения горных пород и искусственных материалов электрическими импульсными разрядами // Отчет по контракту с японской фирмой Komatsu от 14.06.96: рук-ль Боев С.Г.; № ГР 02.9.70 003478. – Томск: НИИ высоких напряжений при ТПУ, 1997. – 119 с.
21. Воробьев А.А. Электрические высокие и сверхвысокие напряжения. – М.; Л.: Государственное энергетическое издательство, 1961. – 96 с.
22. Воробьев А.А., Воробьев Г.А., Воробьев Н.И., Калганов А.Ф., Каляцкий И.И., Месяц Г.А. и др. Высоковольтное испытательное оборудование и измерения. – М.; Л.: Государственное энергетическое издательство, 1960. – 584 с.

*Поступила 05.09.2012 г.*