

Импульсный электрический пробой воды и гранита

ВАЖОВ В.Ф., КОЗЛОВА Н.В.

Проведены исследования вольт-секундных характеристик воды и гранита при пробое на спаде косоугольного импульса напряжения с целью реализации электроимпульсного эффекта. Показана возможность 100%-го пробоя воды и гранита в определённом временном интервале. При этом пробивные напряжения гранита на спаде в 1,5 раза меньше, чем при пробое на фронте.

Ключевые слова: диэлектрики, вольт-секундные характеристики, спад напряжения

Исследования закономерностей поведения вольт-секундных характеристик (ВСХ) жидких и твёрдых диэлектриков, проведённые в конце 50-х – начале 60-х годов прошлого века, привели к обнаружению эффекта инверсии их электрической прочности в микросекундном диапазоне времени воздействия импульсного напряжения [1, 2].

На базе открытия [1] разрабатывается целый ряд электроимпульсных технологий разрушения твёрдых диэлектрических и полупроводящих материалов. В частности, бурение и резание горных пород и искусственных материалов [2].

Вольт-секундные характеристики жидких и твёрдых диэлектриков для реальных условий электроимпульсных технологий позволяют определить диапазон времени воздействия импульса напряжения, при котором ещё возможен электроимпульсный эффект.

В большинстве литературных источников вольт-секундные характеристики жидких диэлектриков и воды получены для электродных систем «остриё–плоскость» или «остриё–остриё» [1–7]. При этом отмечается, что большое влияние на значение разрядного напряжения оказывают геометрические размеры электродов, их расположение, расстояние между электродами [4]. Форма и расположение электродов в пространстве, необходимые для электроимпульсной технологии (резание, бурение и др.) коренным образом отличаются от таковых в литературе. Поэтому использование литературных данных для конкретных электроимпульсных технологических устройств представляет определённые трудности.

Реализация электроимпульсного эффекта в технологиях осуществлялась при использовании косоугольных импульсов напряжения со спадом его на хвосте импульса до нуля. При этом пробой происходит на фронте импульса напряжения [2, 5, 6]. Имеется упоминание о возможности электроимпульсного эффекта на прямоугольных импульсах с

The volt-second characteristics of the water and granite breakdown at the trailing edge of the voltage pulse have been studied. The possibility of the breakdown of water and granite in a certain time interval is 100%. Breakdown voltages of granite on the decline of voltage are 1,5 times less than the breakdown at the impulse front.

Key words: dielectrics, volt-second characteristic, voltage drop, water, granite

наносекундным фронтом [2]. Проведены исследования и показана практическая применимость для электроимпульсных технологий пробоя твёрдых диэлектриков и горных пород на спадающей части (хвосте) косоугольного импульса. Но при этих условиях отсутствуют вольт-секундные характеристики жидких диэлектриков и, в частности, воды, что не позволяет определять временной диапазон, в котором может осуществляться электроимпульсный эффект. Поскольку электроимпульсные технологии разрушения твёрдых тел осуществляются в жидкой среде, то наиболее безопасной жидкостью является пресная вода. Поэтому все исследования в данном случае проведены в воде. Цель исследований – вольт-секундные характеристики воды и гранита при пробое на спаде косоугольного импульса напряжения во временном диапазоне и при расположении электродов, характерных для электроимпульсной технологии.

Методика. Источником высоковольтных импульсов являлся генератор импульсных напряжений Аркадьева–Маркса (ГИН) с номинальным напряжением 500 кВ, разрядной ёмкостью 35×10^{-9} Ф и энергией в разряде 4375 Дж. Длительность фронта импульса на холостом ходу ГИН составляла $t_p = 0,15 \times 10^{-6}$ с, а длительность импульса до полуспада $t_{1/2} = 50,0 \times 10^{-6}$ с. Испытания проводились в диэлектрическом баке, изолированном от земли, который заполнялся водой с различным удельным сопротивлением ρ . В бак помещалась испытательная ячейка, состоящая из двух электродов типа «стержень–стержень» с плоскими торцами, расположенных под углом друг к другу (рис. 1). Стержни одинаковых размеров – диаметром 10 мм и длиной 150 мм. Выбор формы, размеров и расположения электродов обусловлен требованиями электроимпульсной технологии бурения, резания и др., когда электроды располагаются на одной поверхности разрушаемого материала. На каждой ступени напряжения проводилось не менее десяти пробоев и

определялись среднее значение пробивного напряжения $U_{пр}$ и время до пробоя $t_{пр}$. Пробой воды осуществлялся без образца гранита. В процессе испытаний значение γ воды периодически контролировалось для каждой ступени напряжения.

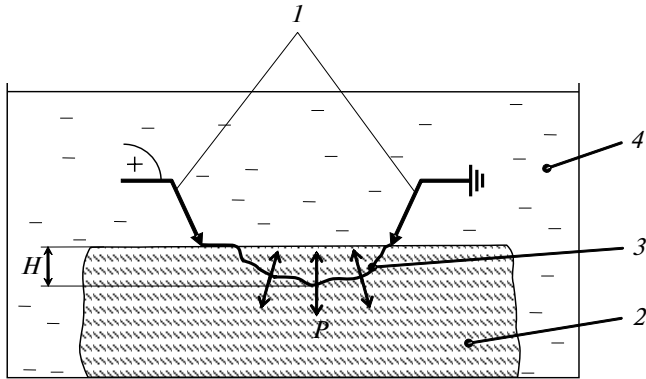


Рис. 1. Внедрение канала разряда в твердый диэлектрик (горная порода): 1 – электроды; 2 – горная порода; 3 – канал разряда; 4 – жидкость; P – ударные волны от канала разряда; H – глубина внедрения

Суть метода определения вольт-секундных характеристик на спаде импульса напряжения состоит в следующем. Фронт и длительность импульса напряжения остаются неизменными, изменяется только амплитуда импульса. При этом пробой происходит на спадающей части импульса. Напряжение пробоя соответствует амплитудному значению импульса, а время до пробоя определяется по резкому уменьшению напряжения на спаде импульса. Большинство исследований механизма пробоя и электрической прочности жидкостей выполнено на положительной полярности потенциального электрода, поскольку этот случай соответствует минимальной электрической прочности жидкостей [4]. Основные результаты получены также для положительной полярности импульса в диапазоне расстояний между электродами $S=10, 90$ мм.

На рис. 2 приведены осциллограммы импульсов напряжения на холостом ходу ГИН, при пробое воды ($\gamma > 4 \cdot 10^3$ Омжм), в отсутствие пробоя в воде ($\gamma \leq 2 \cdot 10^2$ Омжм). В результате низкого удельного сопротивления воды γ и большой диэлектрической постоянной ($\epsilon=81$) происходит изменение параметров импульса холостого хода при воздействии его на электродную систему в воде: фронт импульса за счёт большого значения ϵ увеличивается до $2 \cdot 10^{-6}$ с, длительность импульса за счёт низкого значения γ воды уменьшается в зависимости от γ (кривые 2, 3).

Потери энергии в нагрузке (на электродах в воде) вызывают уменьшение амплитуды импульса напряжения практически на 50 кВ для воды с $\gamma \approx 4,1 \cdot 10^3$ Омжм. Подобные изменения параметров импульса напряжения имеют место в электроимпульсных технологиях [10], поскольку энергетические характеристики ГИН, используемого в экспе-

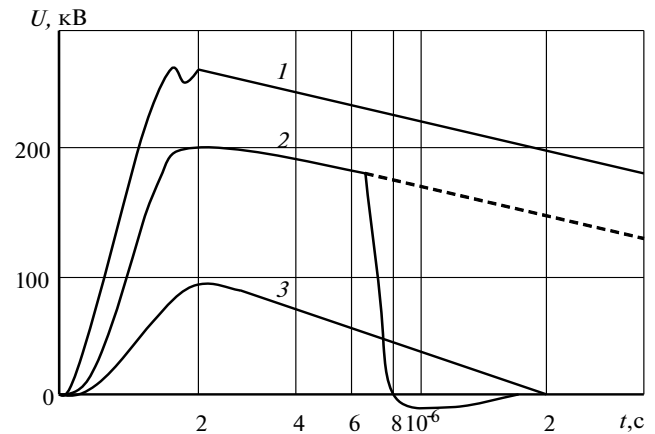


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения: 1 – холостой ход ГИН; 2 – пробой воды $4,1 \cdot 10^3$ Омжм; 3 – отсутствие пробоя воды $\gamma < 2 \cdot 10^2$ Омжм

риментах, соответствовали таковым, применяемым в технологических схемах.

Процессы зажигания и развития канала пробоя в жидких и твёрдых диэлектриках на импульсном напряжении имеют стохастическую природу и вероятностный характер, что наиболее характерно для электроимпульсного эффекта. Вероятностный характер развития канала разряда проявляется также в том, что в определённом интервале при увеличении времени воздействия импульса напряжения уменьшается вероятность пробоя среды вплоть до полного не пробоя. С точки зрения электроимпульсных технологий наибольший интерес представляет определение времени воздействия напряжения, при котором осуществляется 100 %-й пробой, обеспечивающий наибольшую эффективность разрушения твёрдых тел (горных пород). Горная порода – гранит выбран в качестве модельного материала, как наиболее распространённый в природе материал, обладающий высокой механической прочностью. Образцы гранита вырезались из одного блока. Размеры образцов достигали $200 \times 200 \times 100$ мм.

Экспериментальные результаты. Экспериментальные данные по электрической прочности даже «предельно чистых» жидкостей очень разнообразны [4]. Вопреки распространённому мнению, уменьшение электропроводности воды очень тщательной очисткой не является эффективным способом повышения электрической прочности изоляционных конструкций [12].

На рис. 3 приведены ВСХ воды с удельным сопротивлением $\gamma = 4,1 \cdot 10^3$ Омжм при пробое на спаде импульса напряжения для электродной системы, как на рис. 1, и с расстояниями между электродами $S=10, 90$ мм. Увеличение времени до пробоя приводит к сближению ВСХ для разных значений S , т.е. пробивные напряжения приближаются к напряжению зажигания разряда в воде. Известно, что напряжение зажигания канала разряда в жидкости слабо зависит от длины межэлектродного проме-

жутка при изменении её в широких пределах (1, 17 см) [12]. На рис. 3 пунктиром отмечены временные уровни 100%-го пробоя воды для всех S . При изменении S в 9 раз напряжение, соответствующее 100%-му пробую, изменяется на 55 кВ или в 1,44 раза. Время, соответствующее 100%-му уровню пробоя, изменяется от 4×10^{-6} до $6,4 \times 10^{-6}$ с или в 1,6 раза. С учётом большой дисперсии времени до пробоя можно предположить, что это изменение незначительно.

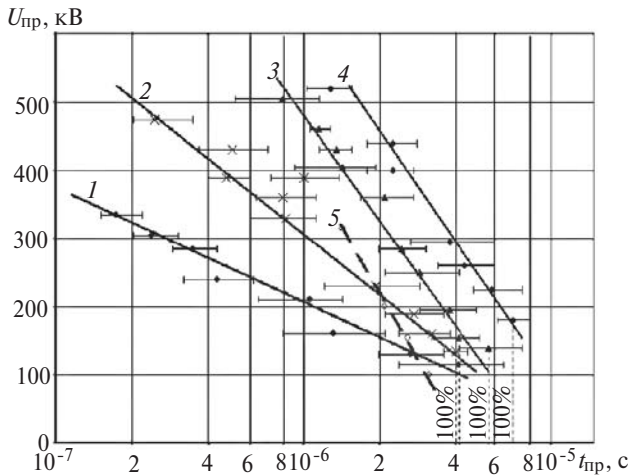


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики воды $\gamma = 4,1 \times 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$: 1 – $S=10 \text{ мм}$; 2 – 20 мм ; 3 – 50 мм ; 4 – 90 мм ; 5 – 50 мм , $\gamma = 3 \times 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; электроды «острие–плоскость», пробой на фронте [11]

На рис. 4 приведены ВСХ воды для разных удельных сопротивлений при $S=20 \text{ мм}$ (кривые 1,2). Из анализа кривых 1, 2 следует, что с уменьшением удельного сопротивления воды её пробивные напряжения возрастают при одинаковом времени до пробоя.

Этот эффект, в первую очередь, обусловлен скоростью спада напряжения. Литературные данные о влиянии γ на электрическую прочность жидкостей с повышенной проводимостью противоречивы [4, 12]. Электрическая прочность (пробивное напряжение) жидкостей с повышенной проводимостью может определяться не столько физическими процессами в разрядном промежутке, сколько зависящей от γ и параметров разрядного контура деформацией импульса [4, 12]. С этим предположением авторов можно согласиться.

Необходимо отметить, что временной интервал 100%-го пробоя воды практически не зависит от её удельного сопротивления в исследованном нами диапазоне γ (кривые 1, 2).

Приведённые предположения подтверждаются при сравнении ВСХ из литературы (рис. 3, кривая 5) для $\gamma = 3 \times 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при пробое на фронте импульса и результатов, полученных нами (кривая 3) для $\gamma = 4,1 \times 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при пробое на спаде импульса. Здесь также для кривой 3 пробивные напряжения в

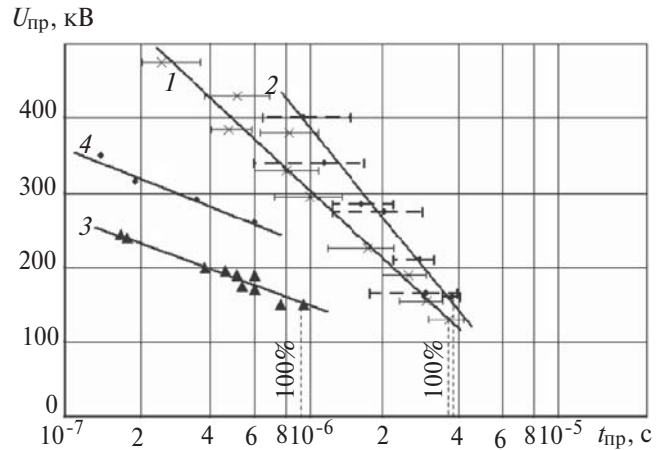


Рис. 4. Вольт-секундные характеристики воды и гранита при $S = 20 \text{ мм}$: 1 – $\gamma = 4,1 \times 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; 2 – $1,8 \times 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; 3 – гранит, пробой на спаде; 4 – гранит, пробой на фронте [13]

изучаемом временном диапазоне выше, чем для кривой 5. В данном случае свою роль играет и разная форма электродов в этих экспериментах, но тенденция сохраняется. Анализ пробивных напряжений воды в резко неоднородных полях при одинаковых условиях испытаний на фронте и спаде импульсов напряжения показывает, что пробивные напряжения практически одинаковы, что обусловлено механизмом возникновения и развития канала разряда в жидкости.

Реализация пробоя на спаде импульса напряжения даёт наибольший эффект для горных пород [7, 8]. Исследования механизма пробоя твёрдых диэлектриков, проведённые в [7], показали, что напряжение зажигания канала разряда в твёрдых диэлектриках в 2,5–3 раза ниже, чем напряжение пробоя на фронте. Мы предполагаем, что подобного эффекта можно достичь и при электроимпульсных технологиях разрушения горных пород, осуществляя пробой на спаде и оптимизируя соответствующим образом форму и параметры импульса напряжения.

Вольт-секундные характеристики гранита получены для всех указанных ранее расстояний между электродами. Пробивные напряжения при пробое на спаде существенно меньше (приблизительно в 1,5 раза), чем при пробое на фронте. Это чрезвычайно важный эффект для электроимпульсных технологий, поскольку позволяет значительно снизить рабочие напряжения генераторов и передающих систем, что уменьшает как массогабаритные параметры технологических установок, так и повышает их надёжность и срок службы. Кроме этого во всём временном диапазоне, характерном для электроимпульсных технологий при рассматриваемом расстоянии между электродами, реализуется 100%-й пробой гранита, в то время как при пробое на фронте вероятность пробоя гранита не превышает 80% [13]. Зависимость пробивного напряжения от

расстояния между электродами при одинаковом времени до пробоя представлена на рис. 5.

Пробивные напряжения воды (кривая 1) в исследованном диапазоне расстояний между электродами существенно выше, чем для гранита (кривые 2–4), что обуславливает высокую вероятность внедрения канала разряда в горную породу. Этот эффект возрастает с увеличением расстояния. Граниты отличаются физико-механическими и структурными свойствами. Например, для кривой 2 удельная механическая прочность гранита при одноосном сжатии составляет 180 МПа, для кривой 3 – 140 МПа, а для кривой 4 – 233 МПа. Известно, что увеличение механической прочности горных пород вызывает увеличение пробивного напряжения [2, 14]. Тем не менее, при пробое гранита на спаде (кривая 4) пробивные напряжения в 1,5 раза ниже по сравнению с кривой 2, даже несмотря на то, что механическая прочность этого гранита в 1,29 раза выше. Кроме этого увеличение расстоя-

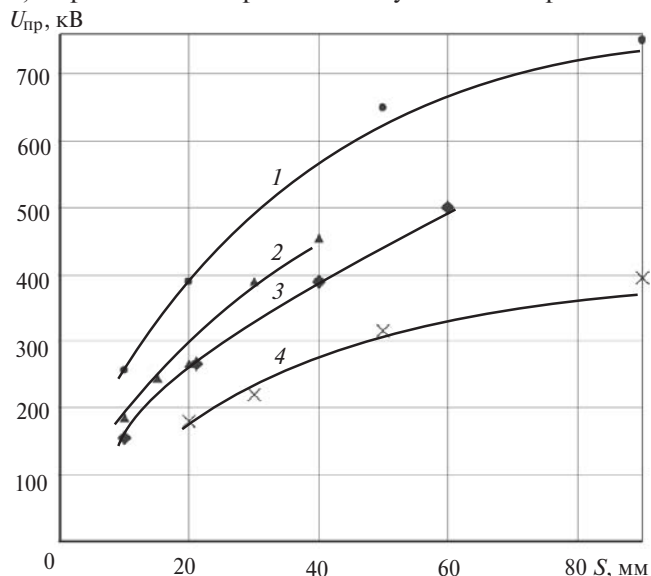


Рис. 5. Зависимость пробивного напряжения воды ($\gamma = 4,1 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) от расстояния между электродами при $t_{\text{пр}} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$: 1 – вода, $\gamma = 4,1 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; 2 – гранит, пробой на фронте [12]; 3 – гранит, пробой на фронте [13]; 4 – гранит, пробой на спаде

ния между электродами вызывает быстрое насыщение пробивных напряжений при пробое на спаде (кривая 4), т.е. эффективность снижения напряжения при пробое на спаде возрастает с увеличением расстояния между электродами.

Заключение. Исследования ВСХ воды и гранита при пробое на спаде импульса напряжения с целью реализации электроимпульсного эффекта показало, что имеет место 100%-й пробой в соответствующем временном интервале для всех исследованных расстояний между электродами.

Электрическая прочность воды при 100%-м пробое во всём диапазоне времени воздействия импульса напряжения и расстояний между электрода-

ми существенно выше, чем гранита. Уменьшение удельного сопротивления воды до $1,8 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ вызывает увеличение пробивного напряжения, что обусловлено схемными и энергетическими параметрами генератора импульсов, соответствующего технологическим применениям.

Значение пробивного напряжения гранита на спаде импульса значительно меньше (в 1,5 раза и более), чем при пробое на фронте, что обусловлено физическими особенностями развития канала разряда на спаде в жидком и твёрдом диэлектриках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьёв А.А., Воробьёв Г.А., Чепиков А.Т. Закономерности пробоя твёрдого диэлектрика на границе раздела с жидким диэлектриком при действии импульса напряжения. – Свидетельство на открытие №А-122 от 29.04.1998 г. с приоритетом от 14.12.1961 г.
2. Сёмкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. – СПб: Наука, 1995.
3. Бальгин И.Е. Электрическая прочность жидких диэлектриков. – М.; Л.: Энергия, 1964.
4. Ушаков В.Я., Клишкин В.Ф., Коробейников С.М., Лопатин В.В. Пробой жидкостей при импульсном напряжении. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005.
5. Воробьёв А.А., Воробьёв Г.А., Заводовская Е.К. и др. Импульсный пробой и разрушение диэлектриков и горных пород. – Томск: Изд-во ТГУ, 1971.
6. Курец В.И., Усов А.Ф., Цукерман В.А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2002.
7. Кузнецов Ю.И. Исследование пространственно-временных характеристик импульсного электрического разряда в каменной соли: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск, 1974.
8. Жгун Д.В. Исследование электроимпульсного пробоя и разрушения гранита и бетона в воде: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2000.
9. Техника высоких напряжений/ Под ред. П.И. Сиротинского. – М.; Л.: ГЭИ, 1940.
10. Важов В.Ф., Дашкевич С.Ю., Журков М.Ю., Муратов В.М. Электроимпульсный способ бурения и резания горных пород. – Труды Международ. научн. конф. «Становление и развитие научных исследований в высшей школе». – Томск: Изд-во ТПУ, 2009, т. 2.
11. Усов А.Ф., Сёмкин Б.В., Зиновьев Н.Т. Переходные процессы в установках электроимпульсной технологии. – СПб: Наука, 2000.
12. Ушаков В.Я. Импульсный электрический пробой жидкостей. – Томск: Изд-во ТГУ, 1975.
13. Жгун Д.В., Борисенко С.В. Электроимпульсный пробой твёрдых диэлектриков. – Труды 6-й Международ. научно-практ. конф. «Современные техника и технологии». – Томск: Изд-во ТПУ, 2000.
14. Брылин В.И. Бурение скважин специального назначения. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009.

Авторы: Важов Владислав Фёдорович окончил электроэнергетический факультет ТПИ в 1963 г. В 1975 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование многоимпульсной прочности полиэтиленовой изоляции». Доцент Института физики высоких технологий ТПУ.

Козлова Наталья Владиславовна окончила факультет автоматики и электромеханики ТПИ в 1991 г. Старший преподаватель кафедры экономики ТПУ.