

## Электрическая прочность водорода в субнаносекундном диапазоне времен

© С.Н. Иванов, К.А. Шарыпов

Институт электрофизики УрО РАН,  
620016 Екатеринбург, Россия  
e-mail: stivan@ier.uran.ru

(Поступило в Редакцию 29 января 2015 г.)

Получены данные по напряжениям коммутации ( $U_{br}$ ) газовых диодов в зависимости от давления газа ( $p$ ) и степени перенапряжения разрядного промежутка в субнаносекундном диапазоне времен. Эксперименты проведены в однородном электрическом поле. В качестве рабочего газа использовался водород. Давление менялось в пределах от 0.1 до 6.0 МПа. Эксперимент начинался при минимальной ширине разрядного промежутка  $d = 0.15$  мм. Затем  $d$  увеличивалось с шагом в 0.1–0.2 мм при фиксированном (0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 и 6.0 МПа) давлении газа до тех пор, пока разрядный промежуток не переставал пробиваться. Обнаружено, что увеличение давления с 5.0 до 6.0 МПа приводит к увеличению напряжения коммутации в водороде на 40–170% в зависимости от ширины разрядного промежутка. Полученные данные были построены в координатах  $U_{br}(pd)$ . Показано, что в субнаносекундном диапазоне нарушен закон подобия разряда. При одинаковом значении произведения давления на величину разрядного газового промежутка напряжение коммутации существенно зависит от давления газа в промежутке.

### Введение

Одной из проблем при построении физических моделей газового пробоя является отсутствие экспериментальных данных, полученных в одинаковых условиях. Как правило, данные для анализа берутся из нескольких экспериментов, в которых используются различные генераторы импульсов, измерительные тракты с разной погрешностью, и газовые диоды с разной конфигурацией разрядного промежутка, что затрудняет их анализ. В настоящей работе получен массив данных по напряжениям коммутации водородного диода с однородным распределением электрического поля в разрядном промежутке в субнаносекундном диапазоне времен. Эксперимент проводился в широком диапазоне давлений и перенапряжений разрядного газового промежутка. В эксперименте изменялись только давление (от 0.1 МПа до 6.0 МПа) и ширина разрядного промежутка. При этом использовалась одна и та же схема измерительного тракта, что позволяет проводить сравнительный анализ полученных данных.

В работах [1,2] было показано, что водород можно использовать в качестве рабочего газа в разрядниках субнаносекундного диапазона, работающих на высоких частотах срабатывания. Поэтому исследование коммутационных характеристик водорода в субнаносекундном диапазоне представляется весьма актуальным.

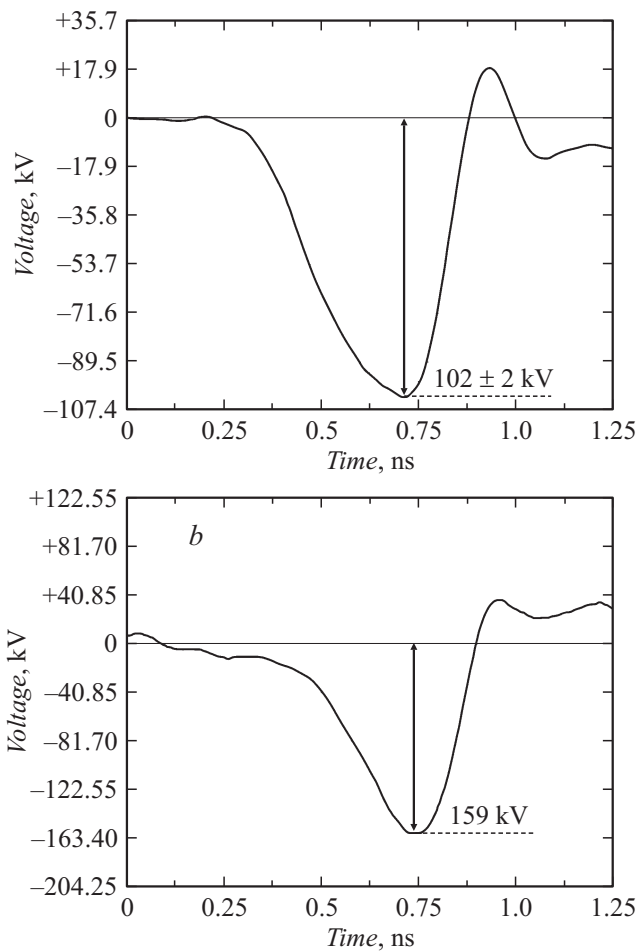
### Экспериментальная часть

Исследуемый газоразрядный промежуток был выполнен в виде разрыва центрального электрода коаксиального газового диода высокого давления. При этом была обеспечена временная развязка прикладываемого

к разрядному промежутку и отраженного от короткозамкнутого конца диода импульсов напряжения. В экспериментах применялись катод и анод из нержавеющей стали с радиусом закругления вершины 1 см. Такой большой радиус закругления электродов был выбран для формирования в разрядном промежутке достаточно однородного электрического поля, что, с одной стороны, облегчало интерпретацию полученных экспериментальных данных, и, во-вторых, исключало повышенное образование электронных лавин в областях усиленного поля, возникающих из-за геометрии катода.

К исследуемому водородному промежутку прикладывался импульс напряжения амплитудой  $102 \pm 2$  кВ, длительностью на полувывоте 380–400 пс, с фронтом (по уровням 0.1–0.9 от амплитуды) около 250 пс (рис. 1, а). Скорость нарастания напряжения на фронте импульса составляла  $3.3 \times 10^{14}$  В/с. Во время всех экспериментов, описанных в настоящей работе, параметры импульса не менялись. Свечение, возникающее при пробое газового зазора, наблюдалось через боковые окна камеры. В экспериментах использовался метод рефлектометрии: импульсное напряжение на выходе генератора импульсов (ГИ) (рис. 1, а) и отраженное от тестируемого газового зазора (рис. 1, б) регистрировалось с помощью широкополосных емкостных делителей, встроенных в передающий коаксиальный тракт, соединяющий ГИ и разрядный промежуток.

В эксперименте варьировались величина зазора катод–анод (с шагом в 0.1–0.25 мм, точность регулировки 0.05 мм) и давление газа ( $p$ ). Эксперимент начинался при минимальном зазоре  $d = 0.15$ –0.25 мм и увеличивался при фиксированном давлении газа с указанным выше шагом до тех пор, пока газовый промежуток не переставал пробиваться. Потом этот эксперимент



**Рис. 1.** Импульсы напряжения на выходе субнаносекундного формирователя ГИ (а) и отраженный (b) от разрядного газового промежутка (водород, 0,95 мм, 5,0 МПа).

повторялся при другом давлении газа. Эксперименты проводились при атмосферном давлении, 0,5, 1,0, 2,0, 3,0, 4,0, 5,0 и 6,0 МПа. В результате был получен набор данных по напряжениям коммутации водородного диода под действием субнаносекундных импульсов напряжения в зависимости от давления и степени перенапряжения разрядного промежутка. Эти данные легко сравнивать и обобщать, поскольку использовались один и тот же генератор импульсов, электроды и газовый зазор одной конфигурации, и одна схема регистрации.

Измерения проводились в однократном режиме и только после тренировки поверхности электродов несколькими сотнями импульсов высокого напряжения. После каждой смены давления в камере электроды разводились так, чтобы газовый промежуток не пробивался. Отсутствие пробоя контролировалось визуальным методом (по отсутствию свечения между электродами) и с помощью осциллографа. После этого в обстановке полного затемнения контролировалось отсутствие паразитных коронных разрядов, например, по поверхности изоляторов. Такой разряд будет засвечивать основной

промежуток, создавая нежелательные инициирующие электроны и, следовательно, снижать перенапряжение. Кроме того, поддерживающие центральный электрод камеры изоляторы были отодвинуты максимально далеко от разрядного промежутка.

### Обсуждение результатов эксперимента

На рис. 2, а приведены полученные зависимости напряжения коммутации  $U_{br}$  в водороде в зависимости от ширины разрядного промежутка для разных давлений газа. Полученные данные качественно можно разделить на три группы:

1. Кривая для атмосферного давления;
2. Набор кривых для давлений водорода, лежащих в диапазоне давлений 0,5–5,0 МПа.

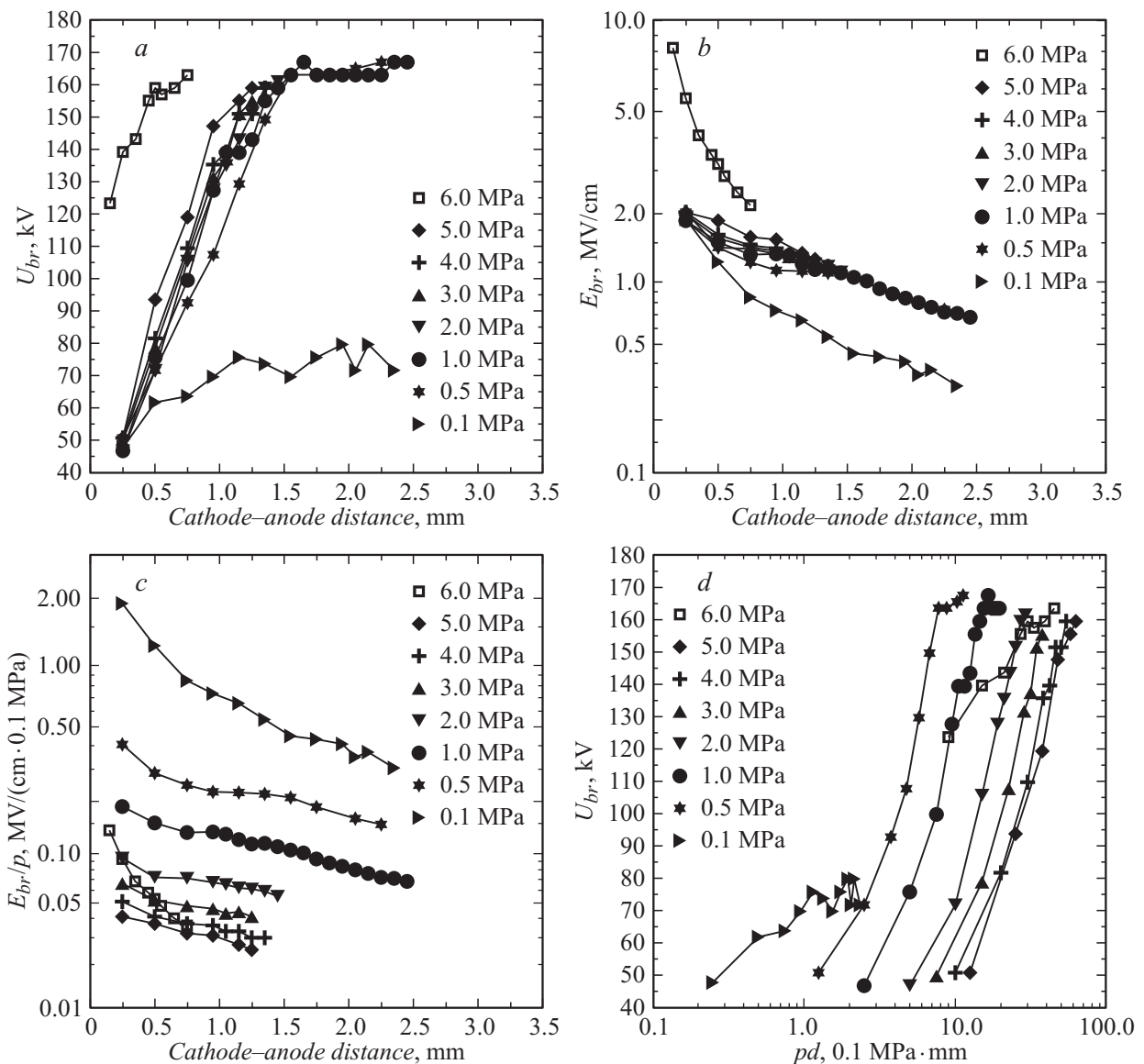
Видно, что увеличение давления водорода с 0,5 до 5,0 МПа приводит к увеличению напряжения коммутации на 15–35% в зависимости от ширины разрядного промежутка. При этом увеличение давления с атмосферного до 0,5 МПа приводит к увеличению напряжения коммутации на 20–110%. Причем эта разница становится наиболее заметной при ширине разрядного промежутка, превышающей 0,75 мм. Т.е. наблюдается резкий рост электрической прочности в диапазоне давлений атмосферное — 0,5 МПа. В случае азота [3] в этих же экспериментальных условиях мы не наблюдали в этом диапазоне существенного увеличения электрической прочности разрядного промежутка. Увеличение электрической прочности при изменении давления азота от атмосферного до 0,5 МПа составляло всего 5–10%.

3. Кривая для давления 6,0 МПа.

При этом давлении происходит резкий рост электрической прочности газового промежутка. Увеличение давления водорода с 5,0 до 6,0 МПа приводит к увеличению напряжения коммутации на 40–170% в зависимости от ширины разрядного промежутка. Такое увеличение электрической прочности происходит для всего диапазона длин разрядного промежутка.

При повышении давления и, как показывают графики на рис. 2, b, увеличению средней напряженности электрического поля в промежутке в момент пробоя ( $E_{br}$ ), увеличиваются также автоэмиссионный и взрывоэмиссионный токи с катода, снижая степень перенапряжения разрядного промежутка. Ранее подобный вывод был сделан при исследовании пробоя в азоте в наносекундном диапазоне [4–7]. В этих работах исследовались коммутационные характеристики азота в диапазоне давлений 2,0–9,0 МПа. При этом приведенная напряженность электрического поля (отношение напряженности электрического поля к давлению) в разрядном промежутке в момент пробоя падала с увеличением давления.

Подобная тенденция наблюдается и нами в субнаносекундном диапазоне в водороде в диапазоне давлений 0,1–5,0 МПа. При увеличении давления с атмосферного до 5,0 МПа приведенная напряженность электрического



**Рис. 2.** *a* — зависимость напряжения коммутации в водороде от расстояния катод–анод; *b* — зависимость средней напряженности электрического поля в разрядном промежутке в момент коммутации от расстояния катод–анод; *c* — зависимость средней приведенной напряженности электрического поля в разрядном промежутке в момент коммутации от расстояния катод–анод; *d* — зависимость напряжения коммутации в водороде от произведения давления на расстояние катод–анод.

поля в момент пробоя уменьшилась примерно в 35 раз (рис. 2, *c*). Но при увеличении давления с 5.0 до 6.0 МПа в нашем эксперименте происходит рост приведенной напряженности электрического поля  $E_{br}/p$  (рис. 2, *c*). Для разрядного промежутка шириной 0.25, 0.5 и 0.75 мм увеличение приведенной напряженности электрического поля в момент пробоя составляет соответственно 2.27, 1.43 и 1.125 раза.

И это несмотря на увеличение интенсивности авто- и взрывоэмиссионных процессов на катоде. Ясно, что есть еще один механизм, который может снижать перенапряжение разрядного газового промежутка, и который перестает действовать в случае водорода при повышении давления с 5.0 до 6.0 МПа.

В работах [8,9] одним из авторов настоящей работы было показано, что электроны в плазме субнаносекундного газового разряда могут переходить в режим непрерывного ускорения не только в разряженных газах и при давлениях порядка атмосферного, как считалось ранее, но и при высоких, вплоть до 4.0 МПа давлениях газа. Эксперименты проводились в азоте в условиях однородного распределения электрического поля в разрядном промежутке. Методом электронно-оптической хронографии [10–14] было показано, что условия [15–18], необходимые для перехода электронов в режим убегания [18–20], реализуются на стадии формирования катодного слоя за счет перераспределения электрического поля в разрядном газовом промежутке.

Что такое „непрерывно ускоренные электроны“ [18–20]? Электроны в плазме газового разряда приобретают энергию направленного движения от электрического поля и расходуют ее главным образом на ионизацию и возбуждение нейтральных частиц. При высоких значениях приведенной напряженности электрического поля энергия, приобретаемая частью электронов на единице пути, может превышать энергию, отдаваемую в неупругих столкновениях с молекулами газа, и эти электроны будут переходить в режим непрерывного ускорения. Такие электроны, принято называть „убегающими“ или „непрерывно ускоренными“. Пересекая разрядный промежуток, они интенсивно ионизируют газовую среду по пути следования. При торможении убегающих электронов на аноде образуется рентгеновское излучение, инициирующее вторичные электроны и новые волны ионизации. Из-за высокой проникающей способности рентгеновских фотонов новые центры ионизации могут возникать на значительном расстоянии от первичного центра. При субнаносекундном пробое эти процессы имеют место на предпробойной стадии и, безусловно, снижают перенапряжение разрядного газового промежутка.

С увеличением давления происходит падение максимальной энергии непрерывно ускоренных электронов. В работе [8] было показано, что в диапазоне давлений 3.0–4.0 МПа в азоте энергия пучка убегающих электронов не превышала 48 keV. В этих экспериментах к разрядному промежутку (катод из нержавеющей стали с радиусом закругления вершины 1 см — плоский анод-сетка из нержавеющей стали) прикладывался импульс с теми же параметрами (рис. 1, а), что и в экспериментах, описанных в настоящей работе. При этом напряжение коммутации при давлении в 4.0 МПа составляло 176–191 kV, а средняя напряженность электрического поля в разрядном промежутке в момент коммутации была 1.06–1.161 MV/cm. Можно предположить, что с ростом давления газа наступает момент, когда электроны перестают переходить в режим непрерывного ускорения. И при этом давлении должно произойти увеличение электрической прочности разрядного промежутка. Что и наблюдается в эксперименте по пробое водорода в диапазоне давлений 5.0–6.0 МПа. Поскольку электрическая прочность азота примерно в 1.75 раза выше электрической прочности водорода [21], в работе [8] не удалось найти верхнюю границу перехода в режим непрерывного ускорения по давлению в азоте. Механическая прочность экспериментальной камеры не позволяла проводить эксперименты при таких высоких давлениях. Простая аппроксимация показывает, что для этого нужно проводить эксперимент при давлениях азота в 8.7–10.5 МПа.

Наблюдаемое увеличение электрической прочности в диапазоне давлений 0.1–0.5 МПа также можно объяснить эффектом убегания электронов. Очевидно, что количество электронов, которые смогли набрать энергию, достаточную для перехода в режим непрерывного

ускорения с увеличением давления, должно уменьшаться. В результате снижается эффективность ионизации газа пучком убегающих электронов на предпробойной стадии, и разрядный промежуток начинает пробиваться при больших перенапряжениях.

Полученная зависимость напряжения коммутации в водороде для субнаносекундного диапазона приведена на рис. 2, d в зависимости от произведения давления на величину разрядного газового промежутка. Известно, что для постоянных напряжений [19,21] напряжение коммутации определяется только произведением  $pd$ . В этом проявляется закон подобия [22]. В работе [23] были построены зависимости  $U_{br}$  от  $pd$  в случае пробоя водорода импульсами с фронтом порядка одной микросекунды. В этом случае закон подобия не нарушался. Из рис. 2, d видно, что в субнаносекундном диапазоне закон подобия нарушен. При одинаковом значении произведения давления на величину разрядного газового промежутка напряжение коммутации существенно зависит от давления газа в промежутке. Известно, что в микросекундном диапазоне убегающие электроны не регистрируются [19,20]. Это позволяет сделать вывод о том, что основной причиной нарушения закона подобия для напряжения коммутации в субнаносекундном диапазоне является ионизация газа во всем объеме разрядного промежутка на стадии запаздывания пробоя пучком убегающих электронов.

Авторы выражают благодарность чл.-корр. РАН В.Г. Шпаку, чл.-корр. РАН М.И. Яландину и к.т.н. С.А. Шунайлову за предоставленный для экспериментов генератор РАДАН-303, д.ф.-м.н. Ю.Д. Королеву и к.ф.-м.н. В.В. Лисенкову за полезное обсуждение полученных результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФАНО в рамках программы фундаментальных исследований Уральского Отделения РАН „Вещество в экстремальных состояниях“.

## Список литературы

- [1] Любутин С.К., Месяц Г.А., Рукин С.Н. и др. // ПТЭ. 2001. № 5. С. 80–88.
- [2] Agee F.J., Scholfield D.W., Prather W. et al. // Proc. of SPIE Int. Pulsed Power Conf. Albuquerque, NM, USA. 1995. Vol. 2557. P. 98–109.
- [3] Иванов С.Н., Шарыпов К.А. // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57. В печати.
- [4] Bukov N.M., Korolev Yu.D., Korovin S.D. // Proc. of the XIIIth Int. Symp. on High Current Electronics, Tomsk, Russia. 2004. P. 119–122.
- [5] Bukov N.M., Korolev Yu.D., Korovin S.D. // Proc. of the XXVIIth Int. Conf. Phenomena in Ionized Gases, Eindhoven, Netherlands. 2005. P. 4–6.
- [6] Королев Ю.Д., Быков Н.М., Иванов С.Н. // Физика плазмы. 2008. Т. 34. № 12. С. 1104–1109.
- [7] Korolev Yu.D., Bukov N.M. // IEEE Trans. Plasm. Sci. 2012. Vol. 40. N 10. P. 2443–2448.

- [8] *Ivanov S.N.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2013. Vol. 46. N 28. P. 285201 (6 p.).
- [9] *Иванов С.Н.* // Деп. в ВИНТИ. 25 декабря 2012 г. № 465-B2012. С. 1–11.
- [10] *Ivanov S.N., Lisenkov V.V., Shpak V.G.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. Vol. 43. N 31. P. 315204 (10 p.).
- [11] *Иванов С.Н., Лисенков В.В.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 1. С. 54–58.
- [12] *Ivanov S.N., Shpak V.G.* // IEEE Trans. on Plasm. Sci. 2011. Vol. 39. N 11. P. 2596–2597.
- [13] *Иванов С.Н., Лисенков В.В., Шпак В.Г.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 9. С. 62–68.
- [14] *Иванов С.Н.* // ДАН. 2004. Т. 399. № 4. С. 472–476.
- [15] *Бабич Л.П., Станкевич Ю.Л.* // ЖТФ. 1972. Т. 42. Вып. 8. С. 1669–1679.
- [16] *Lisenkov V.V., Osipov V.V.* // Изв. ВУЗов. Физика. 2012. Т. 55. № 10/3. С. 256–260.
- [17] *Vakhov K.I., Babich L.P., Kutsyk I.M. Temporal* // IEEE Trans. on Plasm. Sci. 2000. Vol. 28. N 4. P. 1254–1262.
- [18] *Гуревич А.Б.* // ЖЭТФ. 1960. Т. 39. № 5. С. 1296–1307.
- [19] *Королев Ю.Д., Месяц Г.А.* Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991. 224 с.
- [20] *Babich L.P.* High-energy Phenomena in Electric Discharges in Dense Gases. Theory, Experiment and Natural Phenomena. ISTC Science and Technology Series. Vol. 2. Arlington, Virginia: Futerpast, 2003. 353 p.
- [21] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: Наука, 1992. 536 с.
- [22] *Месяц Г.А.* // УФН. 2006. Т. 176. № 10. С. 1069–1091.
- [23] *Авилов Э.А., Белкин Н.В., Дудин А.В.* и др. // ПТЭ. 1973. № 1. С. 137–139.