

**Рутберг Ф.Г., Будин А.В., Пинчук М.Э.,
Богомаз А.А., Лекс А.Г., Лосев С.Ю.,
Позубенков А.А., Светова В.Ю.**

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, РФ

Увеличение плотности энергии в канале сильноточного разряда в газе высокой плотности вследствие резонанса различного типа колебаний диаметра канала

Исследован импульсный разряд в водороде при амплитуде тока до 1,5 МА и начальном давлении рабочего газа до 160 МПа. Выявлены колебания диаметра канала разряда, коррелирующие с колебаниями напряжения на дуге и давления на стенке разрядной камеры. Установлено, что колебания диаметра канала обусловлены выравниванием магнитного и газокинетического давления. В некоторых экспериментах наблюдалось резкое увеличение колебаний напряжения на дуге, которое, как предполагается, было вызвано резонансом акустических колебаний газа в камере и собственных колебаний диаметра канала разряда, поскольку частоты этих колебаний, согласно оценкам и данным экспериментов, близки друг к другу. Подбор соответствующих начальных условий эксперимента позволяет увеличить плотность энергии в канале разряда.

Ключевые слова: разряд в водороде, плотность энергии, колебания, резонанс.

Досліджено імпульсний розряд у водні при амплітуді струму до 1,5 МА та початковому тиску робочого газу до 160 МПа. Виявлено коливання діаметра каналу розряду, що корелюють з коливаннями напруги на дузі та тиску на стінці розрядної камери. Встановлено, що коливання діаметра каналу обумовлені вирівнюванням магнітного та газокінетичного тиску. У деяких експериментах спостерігалось різке збільшення коливань напруги на дузі, що, як передбачається, було викликано резонансом акустичних коливань газу в камері та власних коливань діаметра каналу розряду, оскільки частоти цих коливань, згідно з оцінками та даними експериментів, близькі один до одного. Підбір відповідних початкових умов експеримента дозволяє збільшити щільність енергії в каналі розряду.

Ключові слова: розряд у водні, щільність енергії, коливання, резонанс.

Актуальной научной задачей является достижение максимально возможной плотности энергии в канале сильноточного разряда [1]. В частности, увеличение начальной плотности среды при формировании пинчевых разрядов позволяет существенно повысить их излучательные характеристики. В таких разрядах возможно получение вещества с экстремальными параметрами, что также представляет важную задачу физики, актуальную для многих критических технологий [2].

В предлагаемой работе представлены результаты исследований мощного импульсного разряда в водороде при начальных давлениях до 160 МПа, что соответствует концентрации частиц перед разрядом свыше 10^{22} см⁻³. В процессе исследований при начальных давлениях газа 5–35 МПа был обнаружен режим сжатия канала разряда [3, 4], связанный, на

наш взгляд, с достижением критического тока радиационного сжатия (обобщенный ток Пиза-Брагинского) [5]. При начальных давлениях до 10 МПа производилась регистрация мягкого рентгеновского излучения (МРИ) из канала разряда [4]. Благодаря этим измерениям установлено, что сжатие канала сопровождалось излучением МРИ из канала. До и после основного сжатия регистрировались колебания интенсивности рентгеновского излучения разряда с частотой 100–250 кГц. В оптическом диапазоне также наблюдались колебания диаметра канала, которые коррелировали с колебаниями напряжения на дуге и давления на стенке разрядной камеры.

При начальных давлениях водорода 80–160 МПа, которые создаются предварительным адиабатическим сжатием газа [6], наблюдается рост амплитуды колебаний акустического давления на стенку разрядной камеры (до 150 МПа) и син-

хронный с ним рост колебаний напряжения на разрядном промежутке (до 3 кВ). Эти значения в несколько раз превышают зарегистрированные при начальных давлениях 5–35 МПа.

На основании полученных экспериментальных данных проведен анализ возможности увеличения концентрации энергии в канале с использованием указанных явлений.

Описание экспериментальных установок

Эксперименты проводились на двух электроразрядных установках [6, 7]. Электроды располагались по оси разрядной камеры, расстояние между ними могло варьироваться от 0,5 до 5 см. Катод изолирован от корпуса камеры. В качестве материала электродов использовались сталь, медь и вольфрам. Инициация дуги между электродами осуществлялась при помощи проволоочки, соединяющей в начальный момент катод с анодом. Длительность импульса тока составляла 100–200 мкс, амплитуда — до 1,5 МА, скорость нарастания тока 10^{10} – 10^{11} А/с. Введенная в разряд энергия достигала 0,5 МДж. Источником энергии служила конденсаторная батарея [8].

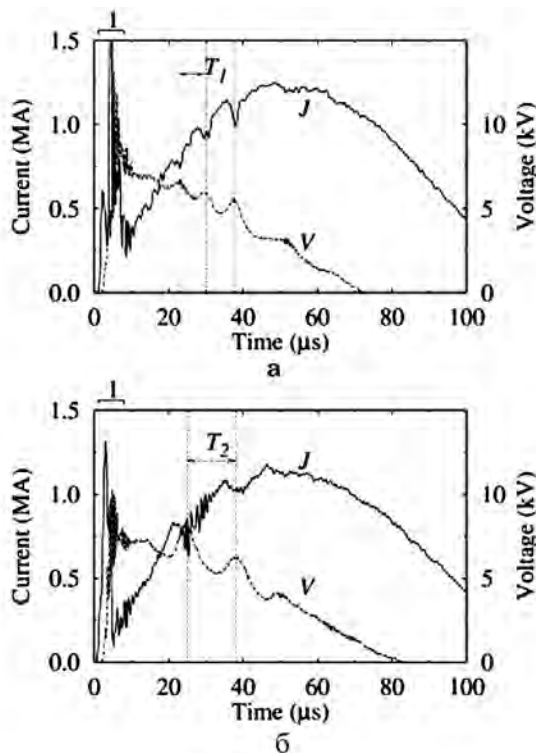


Рис.1. Ток J и напряжение V для разряда в водороде при начальном давлении 7 МПа со стальными электродами и медной проволочкой (а) и вольфрамовыми электродами и проволочками (б): 1 — стадия взрыва проволочки. Энерговклад в дугу около 300 кДж; межэлектродное расстояние 16 мм.

Детальные описания установок приведены в [6, 7]. Более подробное описание экспериментов и методов диагностики можно найти в [3, 4].

Данные экспериментов и их обсуждение

Разряд при начальном давлении 5–35 МПа

На рис.1 показаны типичные осциллограммы тока и напряжения на разрядном промежутке. На их основании было сделано предположение, что эволюция канала разряда сопровождается колебаниями диаметра канала разряда. Корреляционный анализ показал прямую связь колебаний диаметра канала разряда, определенного по фоторазверткам свечения разряда, и изменения сигнала на кривых напряжения и тока. Сжатие канала соответствует пик на кривой напряжения. До и после основного сжатия регистрировались коррелированные с фоторазверткой, током, напряжением и давлением на стенке разрядной камеры колебания интенсивности рентгеновского излучения разряда частотой 100–250 кГц. Полученная взаимосвязь сигналов позволяет использовать их для анализа поведения диаметра канала разряда при отсутствии фоторазвертки и других прямых измерений диаметра канала.

Колебания диаметра канала разряда в данном диапазоне начальных давлений, по нашему мнению, связаны с выравниванием газокINETического и магнитного давлений в канале разряда. При этом их период (с), согласно [9], в случае однородной плотности тока соответствует величине:

$$T = (56 r^2 / J) [m n / (\gamma - 1)]^{-1/2},$$

где r — радиус канала разряда, см; J — величина тока, А; m — масса атома металла в канале, г; n — концентрация металла в канале, см^{-3} .

Конкуренция между давлением плазмы наружу и $J \times B$ магнитной силой, действующей вовнутрь, вынуждает пинч осциллировать радиально. Эксперименты, проведенные с вольфрамовой и медной проволочками и соответствующими материалами электродов (см. рис.1), подтверждают, что выполняется соотношение $T_1/T_2 \sim (m_1/m_2)^{1/2}$ для осцилляций на кривых напряжения и тока. Что позволяет считать, что канал разряда, окруженный плотной водородной средой, состоит из металлической плазмы.

Изменение диаметра разрядной камеры в этом диапазоне начальных давлений не влияет на частотные и временные параметры сигналов (рис.2), что позволяет считать наблюдаемые колебания собственными колебаниями канала разряда, связанными с выравниванием магнитного

Разряд при начальном давлении 80–160 МПа

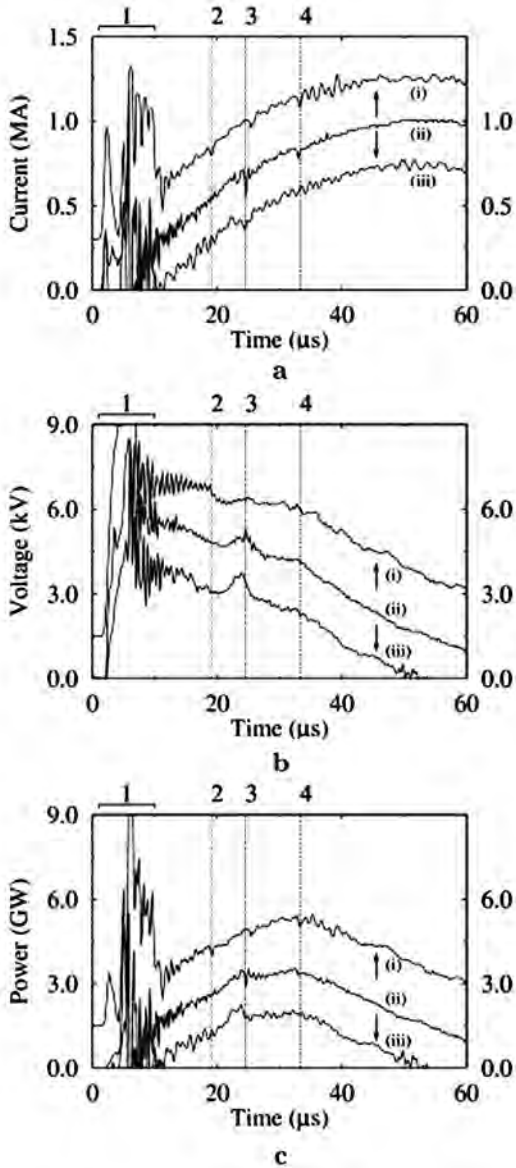


Рис.2. Разряд в водороде при начальном давлении 7 МПа, стальные электроды и медная проволочка: а – ток; б – напряжение; в – мощность, вкладываемая в дугу; (i) – диаметр разрядной камеры 63 мм; (ii) – 55 мм; (iii) – 43 мм; 1 – стадия взрыва проволочки и паузы тока; 2–4 – моменты наиболее характерных особенностей на кривых. Энерговклад в дугу около 150 кДж. Межэлектродное расстояние 10 мм.

и газокинетического давлений, и считать несущественным влияние акустических волн давления на характеристики самого канала разряда. Эти колебания являются источником интенсивных цилиндрических волн давления в объеме разрядной камеры, отражающихся от стенок разрядной камеры и фокусирующихся в ее центре.

При переходе к существенно бо́льшим начальным плотностям рабочего газа наблюдаются рост амплитуды колебаний акустического давления на стенку разрядной камеры и синхронный с ним рост колебаний напряжения на разрядном промежутке. Амплитуда этих колебаний и их число увеличиваются с ростом начальной плотности водорода.

На осциллограммах импульсного давления четко видно участок, соответствующий импульсу разрядного тока, характеризующийся наличием высокочастотных колебаний на сигнале (рис.3).

Медленный рост давления на рис.3,с обусловлен предварительным пороховым сжатием газа [6], последующий быстрый рост происходит вследствие нагрева газа импульсом тока, спад давления происходит из-за истечения газа из разрядной камеры после разрыва специальной предохранительной диафрагмы.

Как и в предыдущем случае, частотный анализ колебаний на высокочастотном участке импульсного давления (рис.3,б) показывает, что характерные частоты волн давления соответствуют колебаниям на кривой напряжения (рис.3,а'-с'). Значительное увеличение амплитуд колебаний дает основания предположить, что при данных условиях роль акустических колебаний существенно возрастает.

Оценим величину изменения радиуса канала разряда, которая необходима для того, чтобы получить зарегистрированные значения амплитуды колебаний напряжения, по формуле:

$$E_1/E_0 = (r_0/r_1)^{1,8}, \quad (1)$$

где E_0 , r_0 и E_1 , r_1 – напряженность поля в канале и радиус канала до и после сжатия соответственно.

Рассчитаем амплитуду изменения радиуса канала по амплитуде колебаний давления, величина которой определялась из соотношения:

$$P_m = \Delta g \omega \rho c, \quad (2)$$

где Δg – амплитуда смещения; ω – круговая частота колебаний; ρ – плотность водорода после предварительного адиабатического сжатия; c – средняя скорость звука в объеме разрядной камеры в момент времени, соответствующий максимуму тока (P_m пересчитывается с учетом цилиндрической геометрии от зарегистрирован-

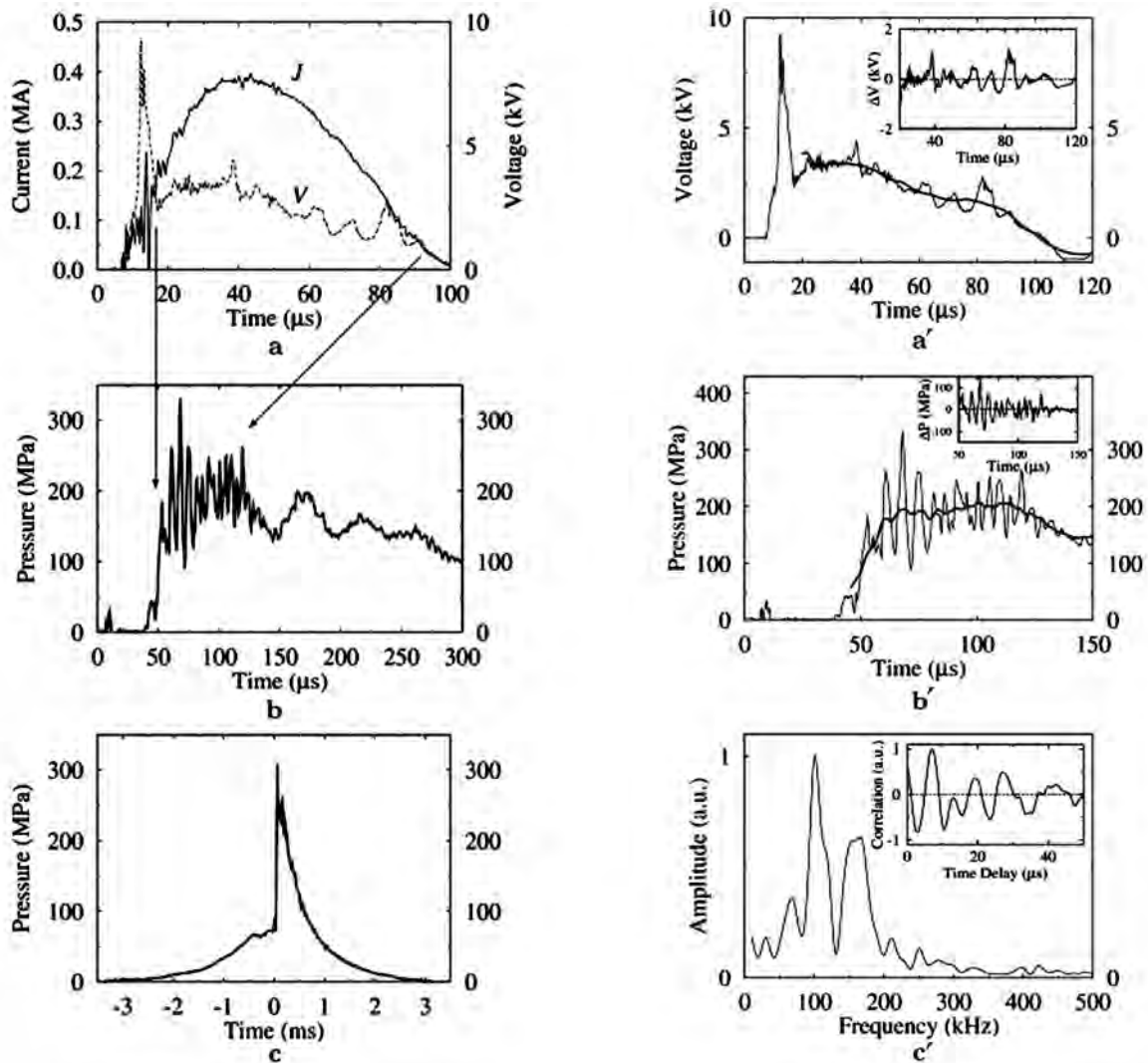


Рис.3. Разряд в водороде при начальном давлении 84 МПа (перед поджигом $\rho = 3,5 \times 10^{-2}$ г/см³), вольфрамовые электроды диаметром 6 мм и медная проволочка: а – ток и напряжение; б – импульсное давление после нагрева дугой; с – импульсное давление за весь эксперимент; а' – напряжение, усредненное напряжение и колебания напряжения; б' – давление, усредненное давление и колебания давления; с' – амплитудный спектр корреляционной функции и корреляционная функция. Стрелки между а и б показывают одинаковые моменты времени на кривых тока и давления. Энерговклад в дугу около 60 кДж; межэлектродное расстояние 12 мм.

ного давления на стенке к давлению на радиусе канала разряда).

Можно предположить, что наименьшее затухание будет у тех колебаний, частота которых близка к частоте установившихся акустических колебаний в объеме разрядной камеры. Период последних определялся по формуле $T = 1,5 R/c$ (где R – радиус разрядной камеры).

Для опыта (рис.3), где колебания на осциллограмме давления выражены наиболее отчетливо, амплитуда зарегистрированного давления на стенке $P = 77,5$ МПа; $r_1 = 2,1$ см; $r_0 = 0,35$ см; $c = 3,67 \times 10^5$ см/с; $\rho = 3,47 \times 10^{-2}$ г/см³. Тогда, согласно (2), $\Delta r = 18 \times 10^{-2}$ см.

По осциллограмме напряжения $E_0 = 1,9$ кВ/см; $E_1 = 5,1$ кВ/см, $r_0 = 0,35$ см из (1) смещение канала $\Delta r = 15 \times 10^{-2}$ см.

Выполненные оценки изменения радиуса канала двумя способами дали близкие результаты, что позволяет сделать вывод о преобладающей роли колебаний, возникающих во всем объеме разрядной камеры, и сжимающих канал разряда. Зарегистрированные колебания давления на стенке разрядной камеры и напряженности поля, особенно заметные при высоких начальных давлениях, могут быть вызваны многократным прохождением звуковых волн сжатия, отражающихся от стенок разрядной камеры. При этом должно про-

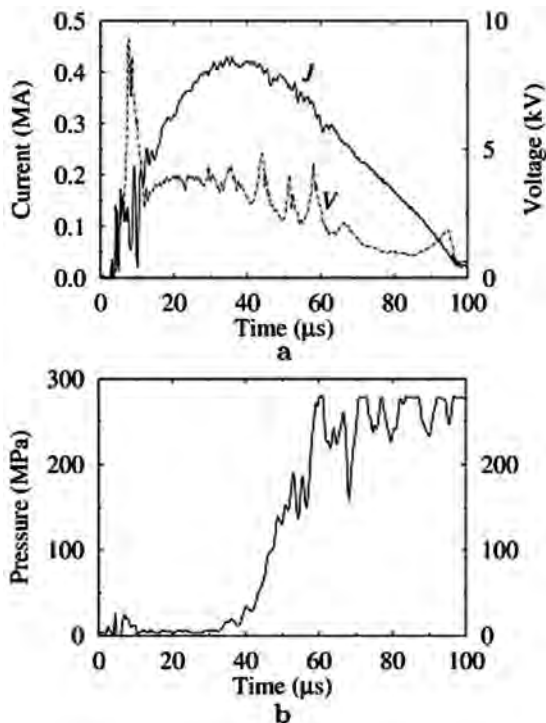


Рис.4. Колебания сигналов для разряда в водороде при начальном давлении 157 МПа (перед поджигом $\rho = 5,6 \times 10^{-2}$ г/см³): а – ток J и напряжение V; б – импульсное давление. Энерговклад в дугу около 75 кДж; межэлектродное расстояние 12 мм; вольфрамовые электроды диаметром 6 мм.

исходить изменение частоты вследствие прогрева рабочего газа в объеме разрядной камеры. Пример последовательной раскачки колебаний представлен на рис.4.

Энергетический баланс

Рассмотрим баланс мощности в разряде при начальных давлениях 80–160 МПа в области максимума тока. Для эксперимента, представленного на рис.3, параметры канала разряда, определенные по проводимости и давлению: $T = 10^5$ К; $n_1 = 1,6 \times 10^{20}$ см⁻³, $r = 0,35$ см. Расселандов пробег $l_R \sim 10^{-2}$ см, то есть справедлива модель поверхностного излучения по черному телу. Баланс мощности при наличии акустических колебаний:

$$N_1 + P_a + P_b \approx J E l,$$

где N_1 – мощность излучения через окно прозрачности; P_a – полная излученная акустическая мощность на стенки; P_b – мощность сходящихся в центре канала акустических колебаний; l – длина канала разряда.

$$P_a = I \cdot 2 \quad R^2 \lambda / l,$$

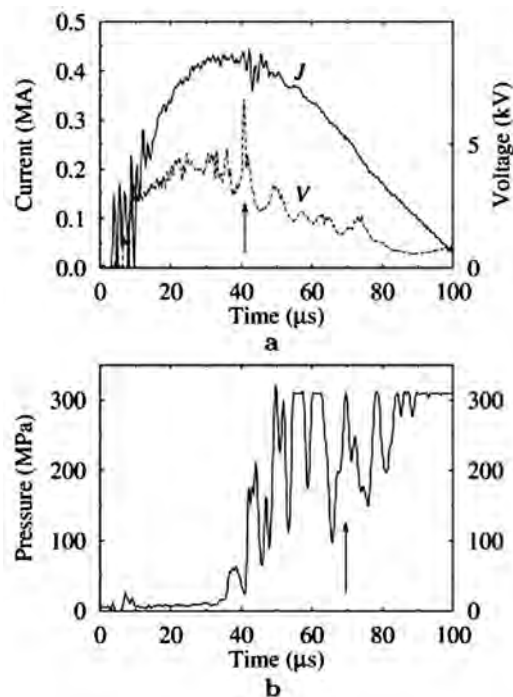


Рис.5. Колебания сигналов для разряда в водороде при начальном давлении 104 МПа (перед поджигом $\rho = 4,2 \times 10^{-2}$ г/см³): а – ток J и напряжение V; б – импульсное давление. Соответствующие максимальные всплески сигналов отмечены стрелками. Энерговклад в дугу около 75 кДж; межэлектродное расстояние 12 мм; вольфрамовые электроды диаметром 6 мм.

где I – интенсивность акустического излучения на стенке разрядной камеры радиуса R с характерной длиной волны λ , $I = P_m / (2 \rho c)$.

$$P_b = I \cdot 2 \quad r l.$$

Тогда $N_1 = 1,6 \times 10^8$ Вт; $P_a = 4,2 \times 10^8$ Вт; $P_b = 1,5 \times 10^8$ Вт; $N_1 + P_a + P_b = 7,3 \times 10^8$ Вт; $J E l = 7,6 \times 10^8$ Вт.

Отсюда следует, что значительная часть электрической мощности, вложенной в канал разряда, уходит на создание акустических колебаний.

Выводы

Показано, что расширение канала разряда при его формировании и в дальнейшем собственные колебания диаметра канала разряда, обусловленные выравниванием магнитного и газокинетического давлений, являются источником интенсивных цилиндрических волн давления в объеме разрядной камеры, отражающихся от стенок разрядной камеры и фокусирующихся в ее центре. При высоких плотностях рабочего газа акустические колебания играют значительную роль в энергодбалансе системы. При соответствующих начальных параметрах часто-

ты собственных колебаний канала и установившихся акустических будут близки. Тогда возможен резонанс колебаний.

Резкое увеличение амплитуды колебаний, наиболее отчетливо видимое на кривой напряжения, представлен на рис.5 (отмечено стрелками). Таким образом, подбор соответствующих начальных условий эксперимента позволяет существенно увеличить мощность, вкладываемую в канал дуги, и увеличить концентрацию энергии в канале.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект 12-08-01062-а, 10-08-00739-а).

Список литературы

1. Ryutov D.D., Derzon M.S., Matzen M.K. The physics of fast Z pinches // Rev. Mod. Phys. — 2000. — Vol. 72, № 1. — P. 167.
2. Rutberg Ph. Physics and Technology of High-Current Discharges in Dense Gas Media and Flows // Nova Science, Inc. — New York, 2009.
3. Богомаз А.А., Будин А.В., Лосев С.Ю. и др. Достижение критического тока Пиза-Брагинского в разряде сверхвысокого давления // Физика плазмы. — 2008. — Т. 34, № 5. — С. 404–413.
4. Rutberg Ph. G., Bogomaz A.A., Pinchuk M.E. et al. High-current discharge channel contraction in high density gas // Physics of Plasmas. — 2011. — Vol. 18, № 12, Article DOI: 10.1063/1.3662053/
5. Lebert R., Engel A., Neff W. Investigations on the transition between column and micropinch mode of plasma focus operation // J. Appl. Phys. — 1995. — Vol. 78, № 11. — P. 6414–6420.
6. Будин А.В., Рутберг Ф.Г., Савватеев А.Ф. Комбинированный электроразрядный ускоритель, работающий на водороде // Приборы и техника эксперимента. — 2004. — Т. 47, № 4. — С. 125–129.
7. Будин А.В., Лосев С.Ю., Пинчук М.Э. и др. Экспериментальный стенд для изучения сильнооточного разряда в плотной газовой среде // Там же. — 2006. — Т. 49, № 4. — С. 106–109.
8. Емелин П.Ф., Фридман Б.Э., Рутберг Ф.Г. Емкостной накопитель энергии Е7-25 // Там же. — 1993. — № 5. — С. 109–115.
9. Соловьев Л.С. О динамике цилиндрического Z-пинча // Физика плазмы. — 1984. — Т. 10, № 5. — С. 1045.

Поступила в редакцию 20.07.12

Rutberg Ph.G., Budin A.V., Pinchuk M.E., Bogomaz A.A., Leks A.G., Losev S.Yu., Pozubenkov A.A., Svetova V.Yu.

The Institute for Electrophysics and Electric Power RAS, St.-Petersburg, Russia

The Energy Density Increase in High-Current Discharge Channel in High Density Gas Due to Resonance of Channel Diameter Different Types Oscillations

Pulsed discharge in hydrogen with 1,5 MA current amplitude and initial working gas pressure up to 160 MPa is investigated. The discharge channel diameter oscillations which correlate with arc voltage oscillations and pressure on the discharge chamber wall are studied. It is established that the channel oscillations are caused by magnetic and gas pressures equalization. In some experiments it is observed sharp increase in arc voltage fluctuations, which purports to have been caused by the resonance of acoustic waves in gas chamber and the own vibrations of discharge channel diameter because the oscillations frequencies by the estimations and experimental data are close. The selection of initial experiment conditions allows to increase energy density in the discharge channel.

Key words: discharge in hydrogen, energy density, oscillations, resonance.

Received July 20, 2012