

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

*Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, РФ*

## **Нагрев водорода высокой плотности излучением сильноточной дуги**

Приведены результаты исследования нагрева водорода высокой плотности при начальном давлении 5–160 МПа сильноточной электрической дугой с амплитудой тока до 1,6 МА при скорости его нарастания  $10^9$ – $10^{11}$  А/с. При изменении начального давления и скорости нарастания тока температура канала изменяется от единиц до сотен электронвольт. При этом радиус разрядной камеры на порядок превосходит радиус канала дуги, который составляет несколько миллиметров. Высокая эффективность нагрева газа объясняется поглощением излучения водородом, окружающим дугу, протекающую в парах иницирующей проволоочки. При скорости нарастания тока  $10^9$  А/с и относительно небольших амплитудах тока нагрев газа происходит за счет поглощения парами проволоочки излучения, прошедшего в полосе прозрачности водорода, то есть с энергией квантов менее 13,6 эВ. При скорости нарастания тока  $10^{11}$  А/с нагрев газа идет за счет поглощения водородом мягкого рентгеновского излучения дуги.

**Ключевые слова:** разряд в водороде, разряд высокого давления, перенос энергии излучением.

Наведено результати дослідження нагріву водню високої щільності при початковому тиску 5–160 МПа сильноточною електричною дугою з амплітудою струму до 1,6 МА при швидкості його наростання  $10^9$ – $10^{11}$  А/с. При зміні початкового тиску та швидкості наростання струму температура каналу змінюється від одиниць до сотень електронвольт. При цьому радіус розрядної камери на порядок перевершує радіус каналу дуги, який складає декілька міліметрів. Висока ефективність нагріву газу пояснюється поглинанням випромінювання воднем, що оточує дугу, яка протікає у парах ініціюючого дроту. При швидкості наростання струму  $10^9$  А/с та відносно невеликих амплітудах струму нагрів газу відбувається за рахунок поглинання парами дроту випромінювання, що пройшло у смугі прозорості водню, тобто з енергією квантів менш 13,6 еВ. При швидкості наростання струму  $10^{11}$  А/с нагрів газу йде за рахунок поглинання воднем м'якого рентгєнівського випромінювання дуги.

**Ключові слова:** розряд у водні, розряд високого тиску, перенесення енергії випромінюванням.

Одним из ключевых моментов для разработки импульсных генераторов плазмы является знание механизмов передачи энергии от электрической дуги к рабочему газу плазмотрона [1, 2]. В настоящей работе представлены некоторые результаты исследований процесса нагрева водорода высокой плотности мощным импульсным разрядом. За счет предварительного адиабатического сжатия начальное давление водорода достигало 160 МПа, что соответствует концентрации частиц перед разрядом свыше  $10^{22}$  см<sup>-3</sup>. Установлена существенная зависимость механизмов теплообмена от плотности окружающего дугу газа.

Эксперименты проводились на двух электроразрядных установках, детальные описания которых приведены в работах [3, 4]. В экспе-

риментах использовались электродные системы в осесимметричной геометрии. Анод с катодом располагались по оси разрядной камеры, расстояние между ними могло варьироваться от 0,5 до 5 см. 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 1,6 МА, скорость нарастания тока —  $10^9$ – $10^{11}$  А/с. Введенная энергия в разряд достигала 0,5 МДж. Источником энергии служила конденсаторная батарея [5].

Для исследования передачи энергии от разряда в газ были проведены эксперименты в режиме манометрической бомбы (то есть при по-

стоянном объеме, когда разрядная камера за-  
глушалась, и газ не истекал из разрядной каме-  
ры после разряда). Вложенная в газ энергия  
определялась из установившегося давления в  
разрядной камере до стадии остывания газа.  
Вблизи верхней границы энергокладов и при  
сверхвысоких начальных давлениях из сообра-  
жений безопасности разряды проводились с  
разрываемой предохранительной диафрагмой.  
Оценка вложенной в газ энергии в этом случае  
выполнялась, исходя из максимума давления в  
разрядной камере.

Более подробное описание экспериментов и  
методов диагностики можно найти в работах [6, 7].

На рис.1, 2 представлены осциллограммы  
для типичных экспериментов, где начальное  
давление водорода составляло соответственно  
32 и 84 МПа. В первом случае (рис.1) исполь-  
зовались стальные электроды диаметром 20 мм  
и медная проволочка, амплитуда разрядного то-  
ка  $J_A = 1250$  кА. Во втором случае (рис.2) ис-  
пользовались вольфрамовые электроды диаме-  
тром 6 мм и медная проволочка,  $J_A = 400$  кА.

При начальном давлении газа 5–35 МПа  
напряженность электрического поля в дуге со-  
ставляет около 1 кВ/см, что существенно пре-  
вышает аналогичные значения для менее силь-  
ноточных и стационарных дуг и является при-  
знаком существования мощного канала потерь  
энергии из разряда. В этих условиях темпера-  
тура плазмы в канале составляет нескольких  
сотен электронвольт, и разряд является источ-

ником мягкого рентгеновского излучения (МРИ)  
[6, 7]. Естественно предположить, что именно за  
счет излучения теряется энергия разряда.

В наших условиях разряд протекает в па-  
рах инициирующей проволочки, и основная  
часть энергии излучается квантами со средней  
энергией  $h\nu = 2$  кТ [8]. В предположении, что  
газ греется МРИ, энергия прошедшего через  
газ излучения выразится формулой:

$$I = I_0 \exp(-n \sigma l),$$

где  $I_0$  — энергия излучения разряда;  $n$  — концен-  
трация газа в камере;  $\sigma$  — эффективное сечение  
поглощения квантов,  $\sigma = 5,4 \cdot 10^{-17} [h\nu_0 / (h\nu)]^{3,5}$   
для квантов с энергией выше потенциала иони-  
зации водорода  $h\nu_0$ ;  $l$  — расстояние от канала  
дуги до стенки камеры [9].

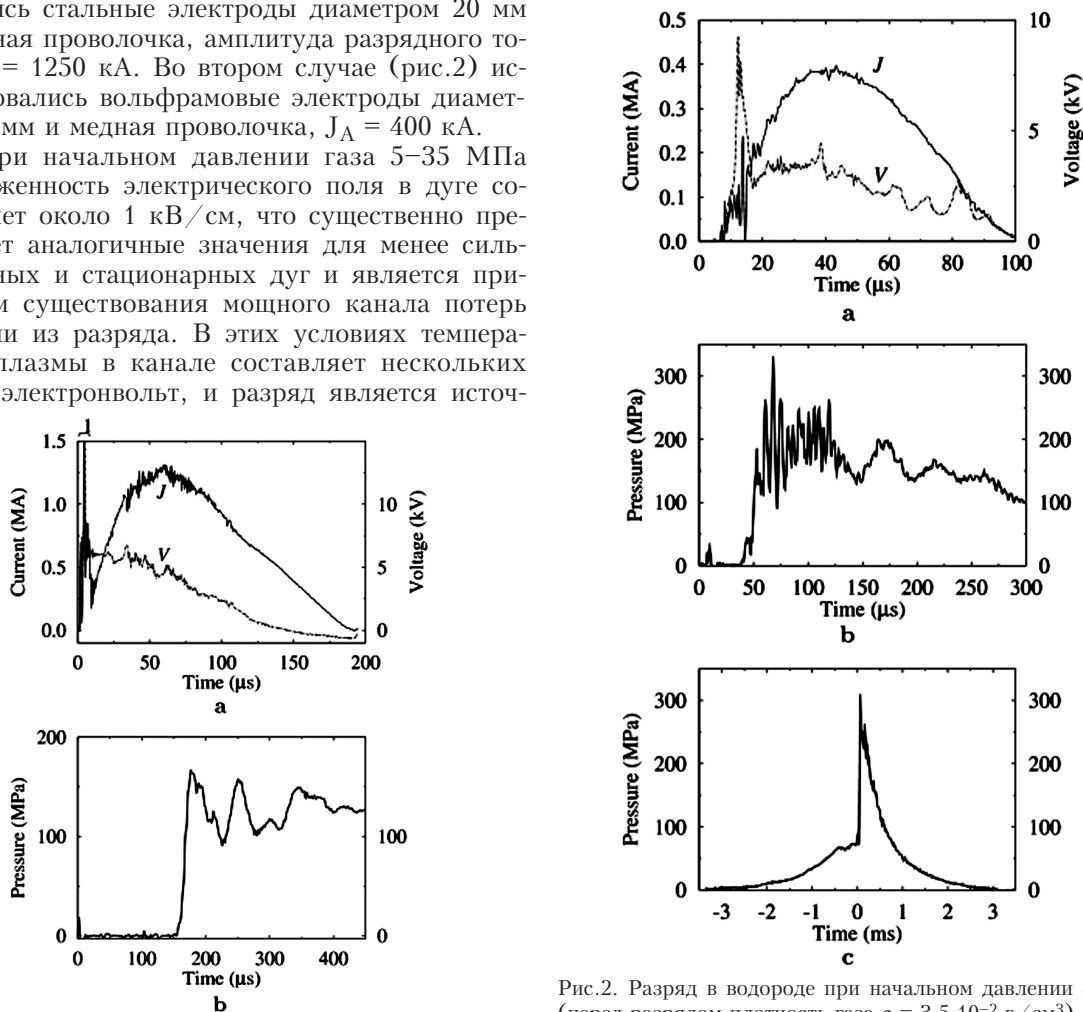


Рис.1. Разряд в водороде при начальном давлении 32 МПа. Токе  $J$  и напряжению  $V$  (а), импульсное давление после нагрева дугой (б), 1 — стадия взрыва проволочки. Энерговклад в дугу — около 500 кДж, межэлектродное расстояние — 20 мм.

Рис.2. Разряд в водороде при начальном давлении 84 МПа (перед разрядом плотность газа  $\rho = 3,5 \cdot 10^{-2}$  г/см<sup>3</sup>). Ток  $J$  и напряжение  $V$  (а), импульсное давление после нагрева дугой (б); импульсное давление за все время эксперимента (с). Энерговклад в дугу — около 60 кДж, межэлектродное расстояние — 12 мм.

Тогда энергия, переданная газу, определится соотношением:

$$1 - \eta = \exp(-n \sigma l),$$

где  $\eta$  — эффективность передачи энергии от дуги к газу, рассчитываемая как отношение приращения внутренней энергии газа к вложенной в дугу электрической энергии.

Первая величина определялась на основании начального и максимального давления газа, вторая — как  $\int J(t)U(t)dt$ .

Экспериментальная зависимость  $\eta$  от начального давления газа  $P_0$  представлена на рис.3. Она имеет растущий характер. Величина  $\eta$  уменьшается с ростом энергозатрат в дугу, что обусловлено ростом температуры дуги и уменьшением  $\sigma$ . Этот факт также иллюстрирует зависимость  $\eta$  от энергии, вложенной в дугу (рис.4).

При переходе к значительно большим начальным плотностям рабочего газа, создаваемым предварительным адиабатическим сжатием газа, параметры разряда существенно изменяются. В этих экспериментах использовалась

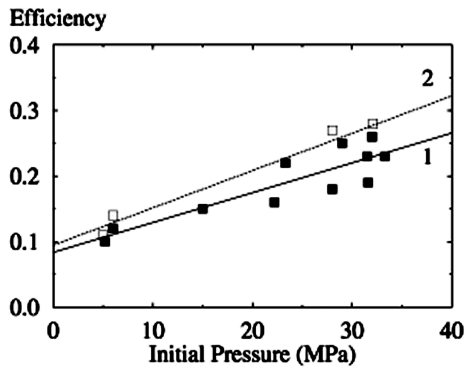


Рис.3. Зависимость эффективности  $\eta$  нагрева газа дугой от энергозатрат в дугу от начального давления газа  $P_0$  для разрядов со стальными электродами: 1 (линия и черные квадратики) — для экспериментов с энергозатратами в дугу более 300 кДж; 2 (линия и белые квадратики) — то же меньше 300 кДж.

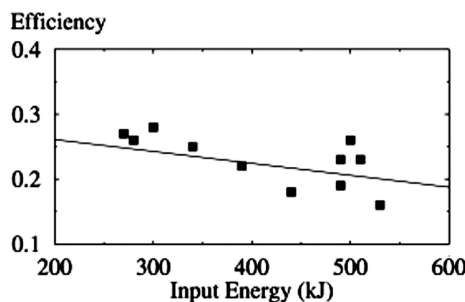


Рис.4. Зависимость эффективности  $\eta$  нагрева газа дугой от энергозатрат в дугу для разрядов со стальными электродами при начальном давлении водорода 15–35 МПа.

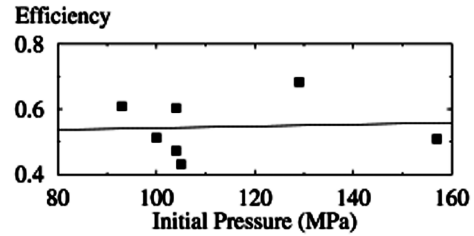


Рис.5. Зависимость эффективности  $\eta$  нагрева газа дугой от начального давления газа  $P_0$  для разрядов с вольфрамовыми электродами. Энергозатраты в дугу 50–100 кДж.

медная иницирующая проволока диаметром 0,5 мм. Радиус разлета паров проволоки может быть оценен, исходя из равенства внутренней энергии материала проволоки и энергии, затраченной на расширение окружающего газа:

$$n k T / (\gamma - 1) = \pi r_1^2 P,$$

где  $n$  — концентрация материала проволоки до взрыва,  $n = 6 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ ;  $T \sim 1 \text{ эВ}$  [10];  $\gamma = 1,66$ ;  $P$  — давление в камере в момент поджига разряда,  $P = 160 \text{ МПа}$ .

В этом случае  $r_1 \sim 0,2 \text{ см}$  и концентрация паров меди  $n_1 \sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$ . Проводимость медной плазмы бралась из работы [11]. Указанным выше давлению и концентрации паров металла соответствует температура канала разряда около  $10^5 \text{ К}$ . Росселандов пробег излучения в этих условиях приблизительно  $10^{-2} \text{ см}$ , следовательно, разряд оптически непрозрачен. Здесь возможна ситуация, когда весь разрядный ток, состоящий из паров меди концентрацией  $10^{21} \text{ см}^{-3}$ , протекает через канал радиусом 0,2 см. При этом между разрядом и газом образуется экранирующая тонкая переходная зона, поглощающая излучение. В этих условиях разряд излучает кванты в окне прозрачности водорода, то есть с энергией  $h\nu < 13,6 \text{ эВ}$ . Наблюдаемая в экспериментах высокая эффективность нагрева газа дугой (рис.5), по-видимому, обусловлена поглощением излучения парами металла, рассеянными в объеме камеры, и последующей передачей энергии водороду, а также поглощением излучения молекулами водорода. Еще один механизм нагрева газа — за счет ударных волн, генерируемых каналом разряда при собственных колебаниях его радиуса. При сверхвысоких плотностях рабочего газа оба эти механизма теплообмена играют существенную роль в энергетическом балансе.

### Выводы

Для импульсного сильноточного разряда в водороде при начальных давлениях от 5 МПа до 160 МПа с амплитудой тока до 1,6 МА и скоростью его нарастания  $10^9$ – $10^{11} \text{ А/с}$  температура плазмы варьируется от единиц до сотен

электронвольт. Радиус дуги составляет несколько миллиметров, что на порядок меньше радиуса разрядной камеры. Высокая эффективность нагрева рабочего газа обусловлена поглощением излучения разряда водородом высокой плотности. Сам разряд протекает в парах металла инициирующей проволоочки. При скорости нарастания тока  $10^9$  А/с и относительно небольшой его амплитуде газ нагревается за счет поглощения излучения парами металла проволоочки в окне прозрачности водорода, то есть квантами с энергией  $h\nu < 13,6$  эВ. При скорости нарастания тока  $10^{11}$  А/с нагрев идет за счет поглощения водородом рентгеновского излучения разряда.

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

#### Список литературы

1. Rutberg Ph.G., Bogomaz A.A., Budin A.V. Experimental study of hydrogen heating in powerful electric discharge launcher // J. Prop. Power. — 1997. — Vol. 13, № 5. — P. 659–664.
2. Rutberg Ph. Physics and Technology of High-Current Discharges in Dense Gas Media and Flows. — New York : Nova Science Publishers Inc., 2009.
3. 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.
4. 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.
5. Емелин П.Ф., Фридман Б.Э., Рутберг Ф.Г. Емкостной накопитель энергии Е7-25 // Там же. — 1993. — № 5. — С. 109–115.
6. Богомаз А.А., Будин А.В., Лосев С.Ю. и др. Достигание критического тока Пиза-Брагинского в разряде сверхвысокого давления // Физика плазмы. — 2008. — Т. 34, № 5. — С. 404–413.
7. 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. — P. 122702-(1-9); DOI: 10.1063/1.3662053/.
8. Koshelev K. N., Pereira N.R. Plasma points and radiative collapse in vacuum sparks / J. Appl. Phys. — 1991. — Vol. 69. — P. R21–R44.
9. Зельдович Я.В., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. — М. : Наука, 1966.
10. Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лужинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. — М. : Энергоатомиздат, 1990.
11. Замышляев Б.В., Стуцкий Е.Л., Гусь А.Г., Жуков В.Н. Состав и термодинамические функции плазмы. — М. : Энергоатомиздат, 1984.

Поступила в редакцию 20.07.12

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

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

### **High-Density Hydrogen Heating by High-Current Arc Radiation**

The investigation results of high-density hydrogen heating at initial pressure ranged between 5–160 MPa by high-current electric arc with current amplitude up to 1,6 MA and current rate increase of  $10^9$ - $10^{11}$  A/s are presented. When changing the initial pressure and current rate increase the channel temperature varies from several electronvolts to hundreds electronvolts. At the same time discharge chamber radius exceed in order of magnitude the arc channel radius which is several millimeters. High efficiency of gas heating is caused by hydrogen radiation absorption surrounding the arc which flows in vapors of initiating wire. By current rate increase of  $10^9$  A/s and relatively low current amplitudes the gas heating occurs due to radiation absorption by initiating wire vapors. The radiation is held in the band transparency hydrogen in other words with photon energies less than 13,6 eV. By current rate increase of  $10^{11}$  A/s gas heating due to hydrogen absorption of soft arc X-rays.

**Key words:** discharge in hydrogen, high pressure discharge, radiation energy transfer.

Received July 20, 2012