

# Экологически безопасный кавитационный способ генерации водорода в потоках воды с возникновением слабо ионизированной плазмы

**В.В. Багров**, заместитель директора, канд. техн. наук<sup>1</sup>

**Д.Ю. Графов**, ведущий инженер<sup>2</sup>

**А.В. Десятов**, д-р техн. наук, профессор<sup>2</sup>

**Н.Е. Кручинина**, декан, заведующий кафедрой, д-р техн. наук, профессор<sup>2</sup>

**К.А. Кутербеков**, д-р техн. наук, профессор<sup>3</sup>

**Т.Н. Нурахметов**, д-р техн. наук, профессор<sup>3</sup>

**Р.В. Якушин**, аспирант<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт энергетического машиностроения Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана

<sup>2</sup> Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, г. Москва,

<sup>3</sup> Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Казахстан, г. Астана

e-mail: avdesyatov@mail.ru

## Ключевые слова:

кавитация,  
низкотемпературная плазма,  
получение водорода.

*Описаны наблюдаемые изменения интенсивности линии излучения атомарного водорода в спектре плазменных образований, возникающих при схлопывании кавитационных пузырьков в воде высокой степени очистки. Предложена конструктивная схема ячейки для создания кавитации с последующим экологически безопасным методом концентрирования водорода из газовой смеси. Экспериментально установлено влияние материала, из которого изготовлено устройство для создания кавитации, и примесей химических веществ на яркость свечения спектра водорода и скорость его образования. Результаты экспериментов подтверждают возможность безопасной генерации водорода в кавитационных потоках и актуализируют необходимость проведения дальнейших исследований.*

## 1. Введение

Эффект возникновения плазменных образований при кавитации в диэлектрических ячейках давно известен [1, 2]. Природа эффекта связана с накоплением заряда статического электричества, появляющегося в результате электризации на границе диэлектриков с различными значениями диэлектрической проницаемости, а также за счет стока заряда при течении диэлектрической жидкости по поверхности проводника. Электризация сопровождается электрическим пробоем и образованием слабоионизированной плазмы в области кавитационного парогазового пузырька [3].

Разряды слабоионизированной плазмы способны диссоциировать молекулы воды на такие короткоживущие частицы, как гидроксил-радикала ( $\text{HO}^{\bullet}$ ),

гидропероксид-радикала ( $\text{HO}_2^{\bullet}$ ), атомарный водород ( $\text{H}$ ), атомарный кислород ( $\text{O}^{\bullet}$ ), а также  $\text{O}^{2-}$  и  $\text{O}$ . В результате их рекомбинации возможно образование молекулярного водорода ( $\text{H}_2$ ), пероксида водорода ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) и озона ( $\text{O}_3$ ) [4].

Метод кавитации в турбулентных потоках жидкости традиционно исследовался в рамках его применения в процессах безреагентной водоочистки от ионов тяжелых металлов, органических веществ и объектов микробиологии. Однако явление кавитации в сочетании с эффектом возникновения плазменных образований вызывает интерес как экологически безопасный способ концентрирования молекулярного водорода из продуктов разложения воды.

## 2. Экспериментальное исследование и его результаты

Мы исследовали кавитацию в высокоскоростном потоке очищенной воды, полученной мембранно-сорбционным методом с предварительной ультрафильтрацией. В качестве экспериментальной ячейки было выбрано устройство типа трубы Вентури. Аналогичные устройства ранее использовались для механической обработки поверхности высокоскоростной струей. Эффект кавитации усиливал эрозию поверхностных загрязнений. Конструктивная схема экспериментальной ячейки приведена на рис. 1.

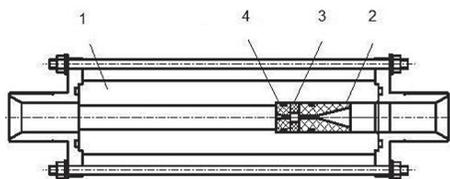


Рис. 1. Экспериментальная ячейка

Экспериментальная ячейка состояла из прозрачного корпуса 1, присоединительных фланцев, гидродинамического устройства, которое состоит из конфузора 2, расширительной камеры 3 и диффузора 4. Конфузор включает конический входной участок и цилиндрический участок (капилляр). Элементы гидродинамического устройства сменные, вставляются в прозрачный корпус, уплотняются резиновыми кольцами.

Для интенсификации массообменных процессов в поток перед гидродинамическим устройством был помещен шнек, закрепленный в эбонитовой втулке. Шнек обеспечивал закрутку потока, увеличивая трение потока о стенки гидродинамического устройства. Для идентификации и измерения количества водорода, наряду с регистрацией оптических спектров излучения, были применены методы выделения водорода с помощью электрохимического мембранного и палладиевого сорбционного фильтров.

Электрохимический мембранный фильтр-конденсатор представлял собой электрохимическую ячейку с твердополимерным электролитом. Анод и катод ячейки – платинированная сажа, нанесенная на обе поверхности протонпроводящего полимера. При подаче напряжения на электроды ячейки водород, адсорбированный на аноде, переходит в электролит в виде протона и восстанавливается до молекулярного водорода на катодном катализаторе. Обратный поток молекулярного водорода ограничен низким коэффициентом диффузии сквозь мембрану.

В эмиссионных спектрах люминесценции, получаемых при проведении экспериментов с использованием металлического шнека и капилляра диаметром 1,5 мм, были найдены интенсивные линии излучения с длиной 434,1 нм, 486,1 нм и 656,3 нм

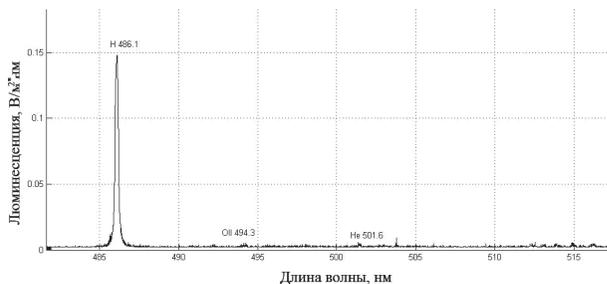


Рис. 2. Спектр водорода

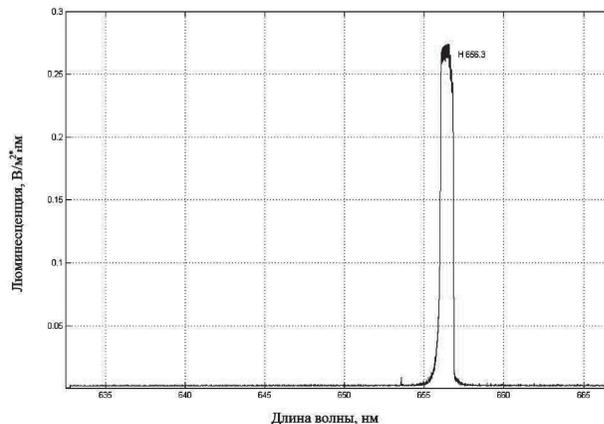


Рис. 3. Спектр водорода

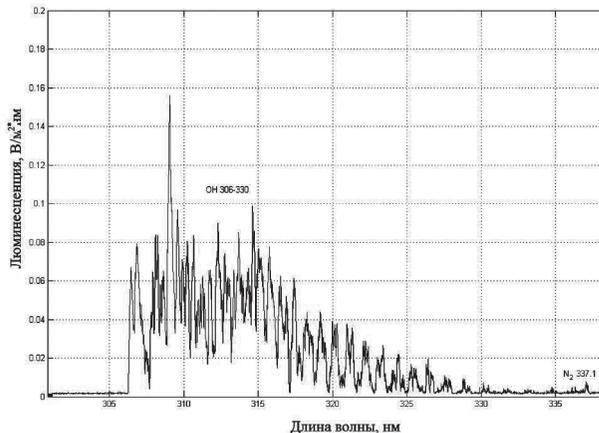


Рис. 4. Спектр гидроксила

атомарного водорода H (рис. 2, 3) и полосы излучения с длиной 306-330 нм гидроксильной группы OH (рис. 4). В этих спектрах наблюдались линии излучения однократно ионизованных атомов кислорода O II в сине-фиолетовой области спектра.

После проведения сравнительных опытов было выявлено влияние удельного электрического сопротивления материалов на интенсивность спектров водорода. Из этих материалов изготавливались составные части (шнек, конфузор) экспериментальной ячейки. На рис. 5 представлены результаты измерения яркости излучения спектра атомарного водорода при использовании конфузоров из фторопласта (удельное

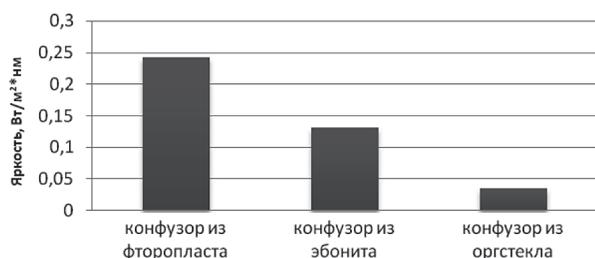


Рис. 5. Яркость спектра излучения атомарного водорода, полученная при использовании конфузора из фторопласта, эбонита и оргстекла

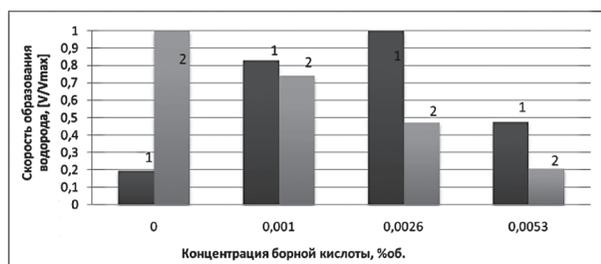


Рис. 6. Скорость образования водорода в зависимости от концентрации борной кислоты в воде (1 – без высоковольтных импульсных разрядов; 2 – с высоковольтными импульсными разрядами)

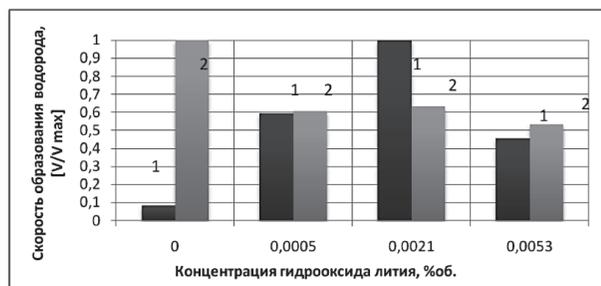


Рис. 7. Скорость образования водорода в зависимости от концентрации гидроксида лития в воде (1 – без высоковольтных импульсных разрядов; 2 – с высоковольтными импульсными разрядами)

электрическое сопротивление  $10^{17}$ - $10^{20}$  Ом\*м), эбонита ( $10^{12}$ - $10^{14}$  Ом\*м) и оргстекла ( $10^{11}$ - $10^{13}$  Ом\*м), при прочих равных условиях. Яркость люминесценции

измерялась в расширительной камере гидродинамического устройства. Заметно, что наибольшая яркость излучения атомарного водорода наблюдалась при использовании конфузора из фторопласта. Несколько меньше яркость при использовании конфузора из эбонита. Наименьшая яркость излучения атомарного водорода зафиксирована при использовании конфузора из оргстекла. Из полученных результатов видно, что чем больше удельное электрическое сопротивление материала, из которого изготовлен конфузор, тем выше яркость люминесценции.

Отмечено влияние химических веществ на скорость образования водорода. Так, при добавлении борной кислоты в опытах без подачи высоковольтных электрических импульсных разрядов отмечен оптимум концентрации кислоты в воде (0,0026% об.), при котором отмечена наибольшая скорость образования водорода. В опытах с подачей высоковольтных электрических импульсных разрядов отмечено стабильное снижение скорости образования водорода с ростом концентрации борной кислоты (рис. 6).

При добавлении гидроксида лития в опытах без подачи высоковольтных электрических импульсных разрядов отмечен оптимум концентрации гидроксида лития в воде (0,0021 % об.), при котором отмечена наибольшая скорость образования водорода (рис. 7). В опытах с подачей высоковольтных электрических импульсных разрядов, как и в опытах с добавлением борной кислоты, отмечено стабильное снижение скорости образования водорода с ростом концентрации гидроксида лития.

#### 4. Вывод.

На основании полученных результатов представляется целесообразным провести дальнейшие исследования по оптимизации процесса выделения водорода и интенсификации эффекта возникновения плазменных образований при кавитации за счет приложения внешних электрических полей, а также варьирования конструктивных характеристик разработанного гидродинамического устройства с целью повышения экологической безопасности процесса.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Колдомасов А.И. Плазменное образование в кавитирующей диэлектрической жидкости // Журнал технической физики, 1991. – Т. 61, № 2. – С. 188–190.
- Багров В.В., Десятов А.В., Казанцева Н.Н., Кубышкин А.П. и др. Вода, эффекты и технологии / Под ред. А.В.Десятова. – М.: ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2010. – 488 с.
- Маргулис М.А., Пильгунов В.Н. О механизме возникновения свечения и электризации при течении жид-

костей в узком канале // Журнал физической химии, 2009. – Т. 83, № 10. – С. 1975–1979.

- Бродский В.А., Кондратьева Е.С., Якушин Р.В. и др. Анализ перспективных физико-химических методов обработки и обезвреживания воды, содержащей высокотоксичные химические вещества и микроорганизмы // Химическая промышленность сегодня. – 2013. – №2. С. 52–56.

## Ecologically Safe Cavity Way of Hydrogen Generation in Water Flows with Low Ionized Plasma Emergence

**V.V. Bagrov**, Deputy Director, Ph.D. of Engineering, Research Studies Institute of Power Engineering Industry of Bauman Moscow State Technical University

**D.Yu. Grafov**, Leading Engineer, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow

**A.V. Desyatov**, Doctor of Engineering, Professor, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow

**N.E. Kruchinina**, Dean, Head of Chair, Doctor of Engineering, Professor, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow

**K.A. Kuterbekov**, Doctor of Engineering, Professor, Gumilev Europe-Asian National University, Astana, Kazakhstan

**T.N. Nurakhmetov**, Doctor of Engineering, Professor, Gumilev Europe-Asian National University, Astana, Kazakhstan

**R.V. Yakushin**, Postgraduate Student, Gumilev Europe-Asian National University, Astana, Kazakhstan

*Observed changes of atomic hydrogen radiation line intensity in the spectrum for plasma formations arising at a collapse of cavity bubbles in the water of high degree cleaning have been described. The constructive scheme of a cell for cavity creation with subsequent ecologically safe method of hydrogen concoction from a gas mix has been offered. The influence of cavity creation device material and chemicals impurity on the spectrum for hydrogen's luminescence brightness and its formation speed has been experimentally established. The results of experiments confirm the possibility of hydrogen safe generation in cavity streams and make actual the need for further researches.*

**Keywords:** cavity, low-temperature plasma, hydrogen production

### Параметры и характеристика ветра по шкале Фуджиты (окончание, начало см. на с. 20)

Баллы Бофорта	Словесное определение силы ветра	Средняя скорость ветра, м/с	Средняя скорость ветра, км/ч	Действие ветра	
				на суше	на море
7	Крепкий	13,9–17,1	50–61	Качаются стволы деревьев	Волны громоздятся, гребни волн срываются, пена ложится полосами по ветру. Максимальная высота волн до 5,5 м
8	Очень крепкий	17,2–20,7	62–74	Ветер ломает сучья деревьев, идти против ветра очень трудно	Умеренно высокие длинные волны. По краям гребней начинают взлетать брызги. Полосы пены ложатся рядами по направлению ветра. Максимальная высота волн до 7,5 м, средняя – 5,5 м
9	Шторм	20,8–24,4	75–88	Небольшие повреждения, ветер начинает разрушать крыши зданий	Высокие волны (максимальная высота – 10 м, средняя – 7 м). Пена широкими плотными полосами ложится по ветру. Гребни волн начинают опрокидываться и рассыпаться в брызги, которые ухудшают видимость
10	Сильный шторм	24,5–28,4	89–102	Значительные разрушения строений, ветер вырывает деревья с корнем	Очень высокие волны (максимальная высота – 12,5 м, средняя – 9 м) с длинными загибающимися вниз гребнями. Образующаяся пена выдувается ветром большими хлопьями в виде густых белых полос. Поверхность моря белая от пены. Сильный грохот волн подобен ударам
11	Жестокий шторм	28,5–32,6	103–117	Большие разрушения на значительном пространстве. Наблюдается очень редко.	Видимость плохая. Исключительно высокие волны (максимальная высота – до 16 м, средняя – 11,5 м). Суда небольшого и среднего размера временами скрываются из вида. Море всё покрыто длинными белыми хлопьями пены, располагающимися по ветру. Края волн повсюду сдуваются в пену
12	Ураган	> 32,6	> 117	Огромные разрушения, серьезно повреждены здания, строения и дома, деревья вырваны с корнями, растительность уничтожена. Случай очень редкий.	Исключительно плохая видимость. Воздух наполнен пеной и брызгами. Море всё покрыто полосами пены