

Влияние полярности напряжения на синтез озона в диэлектрическом барьерном разряде

В. В. Андреев, Ю. П. Пичугин

Экспериментально исследовано влияние полярности напряжения на высоковольтном электроде диэлектрического барьерного разряда (ДБР) на синтез озона в воздухе при атмосферном давлении в двух различных конфигурациях ДБР: с вращающимся со скоростью 3000 об/мин диэлектрическим диском и с классической схемой с плоскими электродами. В ДБР с движущимся диэлектриком на электроды подавалось постоянное напряжение, а в случае классической ячейки ДБР – переменное напряжение с частотой 50 Гц. В случае ДБР с вращающимся диэлектрическим диском при отрицательной полярности высоковольтного электрода концентрация озона в выходном воздушном потоке в 3,5–4 раза выше, чем при положительной полярности. В случае классической ячейки ДБР влияние полярности переменного напряжения существенно ниже, концентрации синтезированного озона при разных полярностях высоковольтного электрода отличаются в 1,4–1,5 раза.

Ключевые слова: диэлектрический барьерный разряд, вращающийся диэлектрик, озон, воздух, атмосферное давление, полярность высоковольтного электрода.

Введение

В последние годы активно проводятся исследования диэлектрического барьерного разряда (ДБР) и развиваются технологии его применения [1–5]. В ячейках ДБР диэлектрик испытывает интенсивные разрушительные воздействия как со стороны электрического поля микрозарядов, имеющих статистический характер, так и со стороны заряженных и активных частиц, взаимодействующих с поверхностью диэлектрика [6, 7].

Эффективным способом увеличения срока службы ячеек ДБР является использование в них вращающихся диэлектриков [8–11]. Ячейки ДБР с вращающимся диэлектриком по сравнению с классическими образцами обладают той отличительной особенностью, что микрозаряды в них возникают при подаче на электроды постоянного высоковольтного напряжения. При этом электрический ток между электродами зависит от характера импульсных микрозарядов.

Кроме того, разрабатываются поверхностные плёнки, устойчивые к воздействию микрозарядов [12, 13], в качестве покрытий диэлектриков, используемых в ячейках ДБР. Ещё одним направлением является разработка безбарьерных разрядных ячеек [14]. Однако в этом случае необходим импульсный источник питания с длительностью высоковольтных импульсов порядка 10 нс. В работе [14] в качестве такого источника был применён генератор высоковольтных наносекундных импульсов на основе вращающегося разрядника [15].

Оптимизация электрофизических и геометрических характеристик ячейки ДБР также даёт возможность увеличения срока службы диэлектрика. В частности, важно исследовать, одинаково ли эффективно протекают те или иные плазменные и плазмохимические процессы в ячейках ДБР при различных полярностях напряжения на высоковольтном электроде. Например, в работе [16] исследовано влияние полярности приложенного напряжения на характеристики (пространственную структуру разряда и электрическое поле в разрядной плазме) наносекундного поверхностного ДБР в воздухе при атмосферном давлении и показано, что, во-первых, энергозатраты в разряд практически не зависят от полярности приложенного напряжения; во-вторых, разряд при положительной полярности более однороден и характеризуется более высокими электрическими полями. В работе [17] установлено, что в газовом разряде с

Андреев Всеволод Владимирович, доцент, зав. кафедрой, к.ф.-м.н.

Пичугин Юрий Петрович, доцент, к.т.н.
Чувашский государственный университет
имени И. Н. Ульянова.

Россия, 428015, г. Чебоксары, Московский пр., 15.
Тел. 8 (902) 287-05-12. E-mail: andreev_vsevolod@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29 марта 2017 г.

© Андреев В. В., Пичугин Ю. П., 2017

ростом величины приложенного напряжения при его отрицательной полярности наблюдается бо́льший выход фуллеренов по сравнению с его положительной полярностью. Влияние полярности приложенного к высоковольтному электроду напряжения на газоразрядные процессы исследовано также в работах [18–20].

В данной работе экспериментально исследовано влияние полярности напряжения на высоковольтном электроде в ячейке ДБР различных видов на синтез озона в воздухе при атмосферном давлении.

Экспериментальные исследования и результаты

Схематический вид ячейки ДБР с вращающимся диэлектриком представлен на рис. 1. Диэлектрический диск 2, к нижней стороне которого прикреплен заземленный металлический диск 6, служащий одним из электродов, закреплен на валу электродвигателя 5. Скорость вращения вала равна 3000 об/мин. Высоковольтный электрод 1, имеющий форму прямоугольной пластины, ориентирован в радиальном направлении Ox над поверхностью диэлектрического диска 2. Отметим, что в работе [10] уже был исследован ДБР, когда пластинчатый электрод 1 был расположен под различными углами к радиальному направлению Ox в плоскости поверхности диэлектрика 2. Скользящие электроды, предназначенные для удаления поверхностных зарядов с диэлектрика, изготовлены из медной фольги толщиной 0,5 мм (3 и 7 на рис. 1).

Схематический вид канала микроразряда в ячейке ДБР показан на рис. 2 в верхней части. В нём можно выделить три характерные области: узкую часть канала микроразряда 3 вблизи высоковольтного электрода, канал микроразряда 4 и расширенную часть канала микроразряда 5 вблизи поверхности диэлектрика. Фотографии микроразрядов в ячейке ДБР с вращающимся диэлектриком показаны в нижней части рис. 2. Следует отметить, что в такой ячейке ДБР наблюдается стабильная пространственная картина микроразрядов и их можно снимать с помощью фотоаппарата [8–15].

В ячейках ДБР с вращающимся диэлектрическим диском можно получить микроразряды как при положительной, так и при отрицательной полярности постоянного напряжения на высоковольтном электроде. Микроразряды и их распределение при отрицательной полярности высоковольтного электрода (-10 кВ) (рис. 2, фото сверху) существенно отличаются от картины при положительной полярности ($+10$ кВ) (фото снизу). В пер-

вом случае приборьерная часть канала микроразряда более широкая, чем во втором. При положительном постоянном напряжении на высоковольтном электроде возникает гораздо больше каналов микроразряда и пространственная картина распределения микроразрядов является более диффузной, чем при отрицательной полярности. Фотографии на рис. 2 получены для случая ячейки ДБР с вращающимся диэлектрическим диском из текстолита толщиной 1 мм и диаметром 20 см, а также высоковольтного электрода в виде металлической пластины длиной 3 см, высотой 1 см и толщиной 3 мм. Газоразрядный промежуток был равен 3 мм. На этих фотографиях слева и справа видны каналы микроразрядов, возникающих на краях пластины. Видно, что при положительной полярности эти микроразряды намного интенсивнее по сравнению с микроразрядами, возникающими на других участках газоразрядного зазора вдоль пластины, а при отрицательной полярности интенсивности микроразрядов на различных участках газоразрядного промежутка вдоль пластины не отличаются существенно друг от друга.

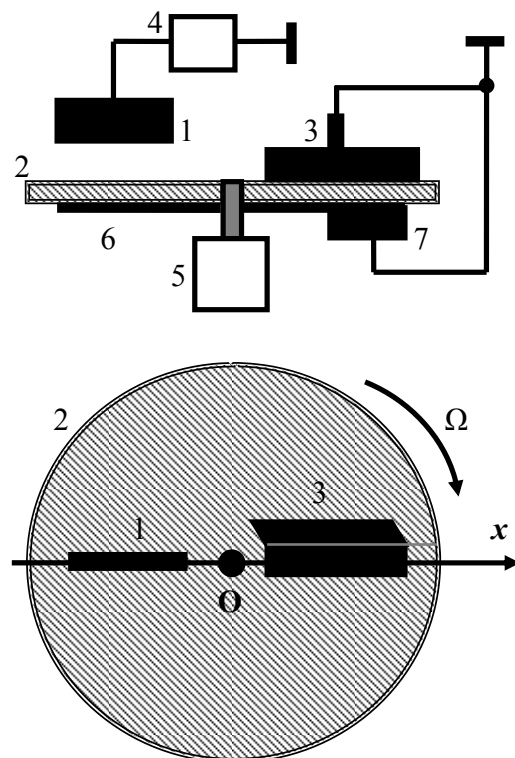


Рис. 1. Схема ячейки ДБР с вращающимся диэлектрическим диском (вверху). В нижней части рис. 1 показан вид сверху на вращающийся с угловой скоростью Ω диэлектрический диск; 1 — высоковольтный электрод; 2 — диэлектрический диск; 3 и 7 — металлические электроды, скользящие по поверхности диэлектрика и металлического диска 6, закреплённого на нижней поверхности диэлектрика; 4 — высоковольтный источник постоянного напряжения. Диэлектрический диск 2 закреплён на валу электродвигателя 5.

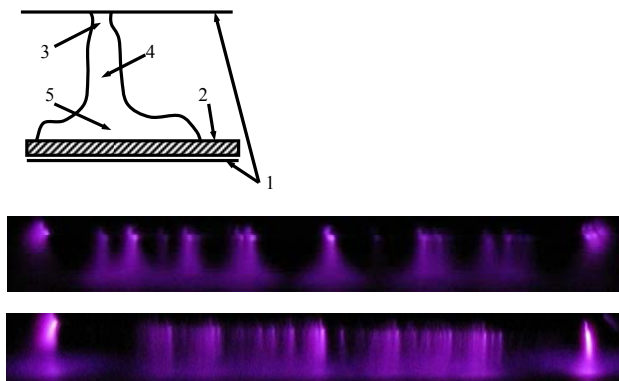


Рис. 2. Микроразряды в барьерном разряде. Вверху – схематический вид канала микроразряда. 1 – металлические электроды; 2 – диэлектрик; 3 – узкая приэлектродная часть канала; 4 – канал микроразряда; 5 – расширенная приборьерная часть канала микроразряда. Внизу: фото микроразрядов в ячейке ДБР с вращающимся диэлектрическим диском в случае отрицательной (-10 кВ) (верхнее фото) и положительной полярности ($+10\text{ кВ}$) (нижнее фото) постоянного напряжения.

В данной работе исследован синтез озона в воздухе при атмосферном давлении в ячейке ДБР с вращающимся диэлектриком при различных полярностях постоянного напряжения на высоковольтном электроде. Фотография электродной системы представлена на рис. 3. Диэлектрический диск из стеклотекстолита диаметром 28 см и толщиной 1 мм вращается со скоростью 3000 об/мин. Высоковольтный электрод из алюминиевой проволоки диаметром 2 мм и длиной 4 см закреплён на дне прямоугольной коробки длиной 7 см и шириной 4,5 см. Дно коробки изготовлено из текстолита толщиной 6 мм, боковые стенки шириной 1 см изготовлены из стеклотекстолита толщиной 4 мм. Коробка плотно прижата открытой стороной к вращающемуся диэлектрическому диску (см. рис. 3). Газоразрядный промежуток между поверхностью диэлектрика и высоковольтным электродом составляет 2 мм. По трубке в коробку подаётся воздух при атмосферном давлении с расходом $0,2\text{ м}^3/\text{ч}$. Концентрация озона на выходе из ячейки измерялась ультрафиолетовым оптическим газоанализатором «Циклон-5.11» с погрешностью не более 5 %. Оказалось, что при напряжении 7,5 кВ на высоковольтном электроде при отрицательной полярности измеренная концентрация озона в 3,5–4 раза выше, чем при положительной полярности.

В случае классического ДБР без подвижных элементов расширенные области каналов микроразрядов (обозначены цифрой 5 на рис. 2) вблизи поверхности диэлектрика, синхронно с частотой переменного напряжения на высоковольтном электроде сменяют друг друга. Отметим, что синтез озона в воздушном потоке при атмосферном

давлении в основном происходит в расширенной приборьерной области канала микроразряда [21].

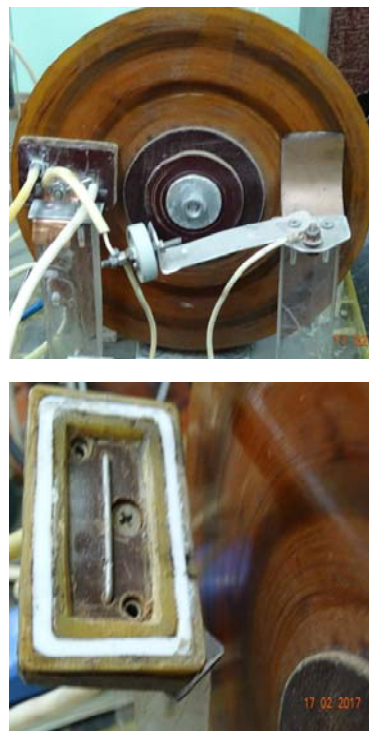


Рис. 3. Фото электродной системы ячейки ДБР с вращающимся диэлектрическим диском. Вид спереди на установку (верхнее фото) в рабочем состоянии; демонтированный высоковольтного электрода в коробке (нижнее фото). Между высоковольтным электродом и скользящим по поверхности диэлектрика электродом из медной фольги подключён конденсатор ёмкостью 1500 нФ для снижения влияния поверхностных зарядов на характеристики тока микроразряда.

Исследования влияния полярности переменного напряжения проведены с двумя ячейками ДБР, схематически показанными на рис. 4. На два параллельных плоских металлических электрода 3 подавались напряжения взаимно противоположных полярностей относительно земли. В первой ячейке ДБР (рис. 4, вверху) газоразрядный промежуток имеет толщину $d = 2\text{ мм}$. В другой ячейке (рис. 4, внизу) диэлектрик 2 расположен так, что он делит газоразрядный промежуток пополам. Следовательно, в последнем случае количество расширенных приборьерных частей каналов микроразрядов в среднем в 2 раза выше, чем в ячейке ДБР с одним газовым зазором (рис. 4, вверху). Таким образом, если в расширенных приборьерных областях каналов микроразрядов, образующихся при различных полярностях напряжения на электродах, озон синтезируется с разными интенсивностями, то количество синтезированного за одинаковое время озона в двух ячейках ДБР, представленных на рис. 4, тоже должно быть неодинаково.

Ячейки ДБР питались от высоковольтного источника переменного напряжения с частотой 50 Гц. В случае ячейки сверху рис. 4 на электроды 3 подавалось напряжение с действующим значением 8 кВ. В ячейке ДБР, представленной внизу рис. 4, действующее значение напряжения было равно 9 кВ. Это было сделано для того, чтобы обеспечить равенство средних разрядных токов в обоих случаях (а именно, 0,68 мА). По трубке, подсоединённой к одному из отверстий 1, в ячейки ДБР подавался воздух при атмосферном давлении с расходом 0,2 м³/ч. Трубка, подсоединённая ко второму из отверстий 1, соединена с озонометром. Результаты измерений показали, что в ячейке ДБР, представленной внизу рис. 4, синтезируется в 1,4–1,5 раза большее количество озона по сравнению с ячейкой ДБР, изображенной в верхней части рис. 4. Однако в этом эксперименте не определяется явно, какая именно полярность высоковольтного электрода приводит к увеличению синтеза озона. О полярности высоковольтного электрода, при которой количество синтезируемого озона выше, можно судить, основываясь на результатах эксперимента с ячейкой ДБР с вращающимся диэлектриком. Следовательно, можно утверждать, что при отрицательной полярности высоковольтного электрода количество синтезируемого озона выше по сравнению со случаем его положительной полярности.

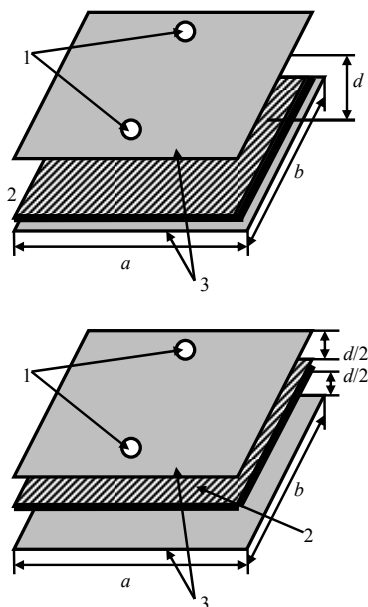


Рис. 4. Схематический вид классических ячеек ДБР с неподвижным диэлектриком. В разрядную ячейку воздух поступает через одно из отверстий 1 и отводится через второе отверстие. Диэлектрическая пластина 2 размером 170×95 мм изготовлена из текстолита толщиной 1 мм. Металлические электроды 3 имеют размер 160×85 мм. Для обеспечения одинакового воздушного потока в верхнем и нижнем промежутке в ячейке с симметричным расположением диэлектрика между электродами (нижний рисунок) на нижнем электроде также имеются отверстия, аналогичные 1.

Заключение

В работе экспериментально исследовано влияние полярности напряжения на высоковольтном электроде диэлектрического барьерного разряда (ДБР) на синтез озона в воздухе при атмосферном давлении в двух различных конфигурациях ДБР: с вращающимся со скоростью 3000 об/мин диэлектрическим диском и с классической схемой с плоскими электродами. В ДБР с движущимся диэлектриком на электроды подавалось постоянное напряжение, а в случае классической ячейки ДБР – переменное напряжение с частотой 50 Гц. В случае ДБР с вращающимся диэлектрическим диском при отрицательной полярности высоковольтного электрода концентрация озона в выходном воздушном потоке в 3,5–4 раза выше, чем при положительной полярности. В случае классической ячейки ДБР влияние полярности переменного напряжения существенно ниже, концентрации синтезированного озона при разных полярностях высоковольтного электрода отличаются в 1,4–1,5 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yang L., Liu Zh., Mao Zh., Li S., Chen Q. // Japanese Journal of Applied Physics. 2017. Vol. 56. 01AC02.
2. Peeters F. J. J., Rumphorst R. F., van de Sanden M. C. M. // Plasma Sources Sci. Technol. 2016. Vol. 25. 03LT03.
3. Massines F., Silva J., Lelièvre J.-F., Bazinette R., Vallade J., Lecouvreux P., Pouliquen S. // Plasma Process. Polym. 2016. Vol. 13. P. 170.
4. Sato Sh., Takahashi M., Ohnishi N. // Applied Physics Letters. 2017. Vol. 110. 194101.
5. Jiang N., Guo L., Shang K., Lu N., Li J., Wu Y. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2017. Vol. 50. No. 15. 155206.
6. Лукин В. В., Попович М. П., Ткаченко С. Н. Физическая химия озона. — М.: Изд-во МГУ, 1998.
7. Самойлович В. Г., Гибалов В. И., Козлов К. В. Физическая химия барьерного разряда. — М.: Изд-во МГУ, 1989.
8. Андреев В. В., Васильева Л. А., Кравченко Г. А., Пичугин Ю. П., Филиппов В. Г. // Нелинейный мир. 2009. Т. 7. № 11. С. 811.
9. Андреев В. В., Васильева Л. А., Матюнин А. Н., Пичугин Ю. П. // Прикладная физика. 2011. № 1. С. 52.
10. Андреев В. В., Пичугин Ю. П., Телегин В. Г., Телегин Г. Г. // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 12. С. 1130.
11. Андреев В. В., Пичугин Ю. П. // Физика плазмы. 2014. Т. 40. № 6. С. 563.
12. Андреев В. В. // Прикладная физика. 2014. № 6. С. 24.
13. Андреев В. В., Васильева Л. А. // Прикладная физика. 2016. № 4. С. 16.
14. Андреев В. В., Пичугин Ю. П. // Приборы и техника эксперимента. 2016. Т. 59. № 3. С. 134.
15. Андреев В. В., Пичугин Ю. П., Телегин В. Г., Телегин Г. Г. // Приборы и техника эксперимента. 2013. Т. 56. № 3. С. 58.
16. Нуднова М. М., Александров Н. Л., Стариковский А. Ю. // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 1. С. 94.

17. Приходько Н. Г. // Инженерно-физический журнал. 2010. Т. 83. № 1. С. 154.
18. Sokolova M., Hulka L., Pietsch G. J. // Plasma Processes and Polymers. 2005. Vol. 2. No. 3. P. 162.
19. Бондаренко П. Н., Емельянов О. А., Шемет М. В. // ЖТФ. 2014. Т. 84. № 6. С. 51.
20. Стишков Ю. К., Козлов В. Б., Ковалев А. Н., Самусенко А. В. // Электронная обработка материалов. 2010. № 4. С. 31.
21. Андреев В. В., Матюнин А. Н., Пичугин Ю. П., Телегин В. Г., Телегин Г. Г. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2011. Т. 34. № 4. С. 112.

PACS: 52.80.Tn

Effect of voltage polarity on ozone synthesis in a dielectric barrier discharge

V. V. Andreev and Yu. P. Pichugin

Chuvash State University
15 Moskovskii pr., Cheboksary, 428015, Russia
E-mail: andreev_ysevolod@mail.ru

Received March 29, 2017

The influence of voltage polarity on a high-voltage electrode in the dielectric barrier discharge (DBD) cell on the ozone synthesis in air at atmospheric pressure is studied experimentally. The experiments were performed with the DBD cell with a rotating dielectric disk with a speed of 3000 rpm, as well as with the classical DBD cell with flat electrodes, which do not have moving elements. In the first case, the DC high voltage was applied to the electrodes. In the second case of a classical DBD cell, the AC high voltage with frequency 50 Hz was applied to the electrodes. The experimental studies results with the DBD cell with a rotating disk-dielectric have shown that in case of negative polarity high-voltage electrode the ozone concentration in the outlet air flow about 3.5–4 times higher in comparison with the positive polarity. In case of the classical DBD cell, the influence of high-voltage electrode polarity is significantly lower and the amounts of synthesized ozone at different polarities of high-voltage electrode differ about 1,4–1,5 times only.

Keywords: DBD with rotating dielectric, ozone, air, atmospheric pressure, high-voltage electrode polarity.

REFERENCES

1. L. Yang, Zh. Liu, Zh. Mao, S. Li, and Q. Chen, Japanese Journal of Applied Physics **56**, 01AC02 (2017).
2. F. J. J. Peeters, R. F. Rumphorst, and M. C. M. van de Sanden, Plasma Sources Sci. Technol. **25**, 03LT03 (2016).
3. F. Massines, J. Silva, J.-F. Lelièvre, R. Bazinette, J. Vallade, P. Lecouivre, and S. Pouliquen, Plasma Process. Polym. **13**, 170 (2016).
4. Sh. Sato, M. Takahashi, and N. Ohnishi, Applied Physics Letters **110**, 194101 (2017).
5. N. Jiang, L. Guo, K. Shang, N. Lu, J. Li, and Y. Wu, Journal of Physics D: Applied Physics **50** (15), 155206 (2017).
6. V. V. Lunin, M. P. Popovich, and S. N. Tkachenko, *Ozone Physical Chemistry* (MGU, Moscow, 1998) [in Russian].
7. V. G. Samoilovich, V. I. Gibalov, and K. V. Kozlov, *Physical Chemistry of the Barrier Discharge* (MGU, Moscow, 1989) [in Russian].
8. V. V. Andreev, L. A. Vasil'eva, G. A. Kravchenko, et al., Nelineinyi Mir **7** (11), 811 (2009).
9. V. V. Andreev, L. A. Vasil'eva, A. N. Matyunin, and Yu. P. Pichugin, Prikl. Fiz., No. 1, 52 (2011).
10. V. V. Andreev, Yu. P. Pichugin, V. G. Telegin, and G. G. Telegin, Plasma Physics Reports **37** (12), 1053 (2011).
11. V. V. Andreev and Yu. P. Pichugin, Plasma Physics Reports **40** (6), 481 (2014).
12. V. V. Andreev, Prikl. Fiz., No. 6, 24 (2014).
13. V. V. Andreev and L. A. Vasilyeva, Prikl. Fiz., No. 4, 16 (2016).
14. V. V. Andreev and Yu. P. Pichugin, Instruments and Experimental Techniques **59** (3), 462 (2016).
15. V. V. Andreev, Yu. P. Pichugin, V. G. Telegin, and G. G. Telegin, Instruments and Experimental Techniques **56** (3), 299 (2013).
16. M. M. Nudnova, N. L. Aleksandrov, and A. Y. Starikovskii, Plasma Physics Reports **36** (1), 90 (2010).
17. N. G. Prikhod'ko, Journal of Engineering Physics and Thermophysics **83** (1), 171 (2010).
18. M. Sokolova, L. Hulka, and G. J. Pietsch, Plasma Processes and Polymers **2** (3), 162 (2005).
19. P. N. Bondarenko, O. A. Emelyanov, M. V. Shemet, Technical Physics **59** (6), 838 (2014).
20. Y. K. Stishkov, V. B. Kozlov, A. N. Kovalyov, and A. V. Samusenko, Surface Engineering and Applied Electrochemistry **46** (4), 315 (2010).
21. V. V. Andreev, A. N. Matyunin, Yu. P. Pichugin, V. G. Telegin, and G. G. Telegin, Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki, Seriya: Termoyadernyi Sintez **34** (4), 112 (2011).