

03;04;10

## **О влиянии давления азота на энергию убегающих электронов, генерируемых в газовом диоде**

© А.Г. Бураченко, В.Ф. Тарасенко

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск  
E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 26 июля 2010 г.

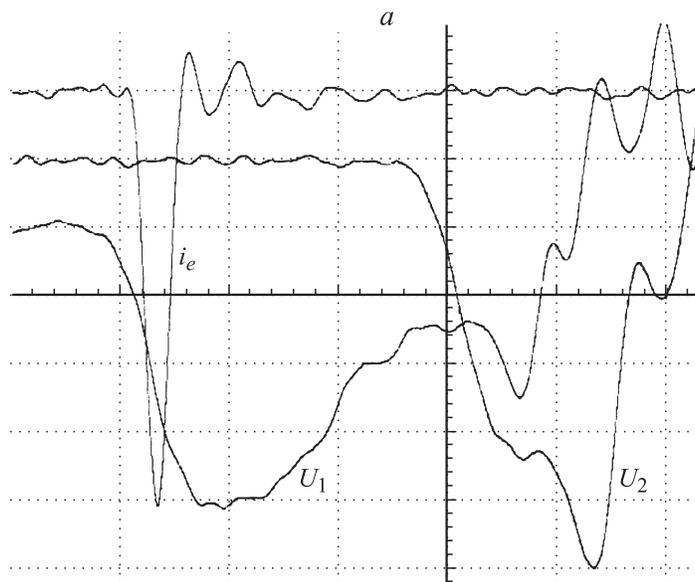
С помощью времяпролетного спектрометра исследованы спектры убегающих электронов, генерируемых в газовом диоде при фронте импульса напряжения  $\sim 300$  ps, его амплитуде  $\sim 140$  kV и изменении давления азота от 760 до 0.1 Torr. Определено время генерации тока пучка относительно импульса напряжения. Показано, что энергия электронов сложным образом зависит от давления азота в газовом диоде и конструкции катода. Установлено, что наименьшее напряжение пробоя промежутка с трубчатым катодом и плоским анодом импульсами реализуется при давлении азота  $\sim 100$  Torr. Показано, что при уменьшении давления азота от  $\sim 100$  Torr напряжение на промежутке и энергия основной группы электронов увеличиваются.

В последние годы существенно увеличился интерес к изучению генерации пучков убегающих электронов и рентгеновского излучения в газах повышенного давления, а также к созданию методик измерений пикосекундных импульсов [1–13]. Было показано, что при субнаносекундном пробое различных газов генерируются сверхкороткие лавинные пучки электронов с длительностью импульса тока пучка на полувысоте  $\sim 0.1$  ns [1,8]. При микросекундной длительности фронта импульса напряжения амплитудой  $\sim 1$  MV зарегистрированы двойные импульсы рентгеновского излучения [3]. Показано, что угол разлета убегающих электронов из газового диода превышает  $2\pi$  [1]. При атмосферном давлении воздуха установлены условия для получения амплитуды сверхкороткого лавинного электронного пучка (СЛЭП) с амплитудой  $\sim 50$  А и более [8,12]. Показано [11], что режим генерации СЛЭП с длительностью импульса на полувысоте  $\sim 0.1$  ns в гелии, водороде и азоте сохраняется до давлений 60, 30 и 10 Torr

соответственно. Плотность тока пучка с площадок диаметром 1–2 см в центре фольги в условиях [11] достигала  $\sim 100$  А/см<sup>2</sup>. Однако в явлении генерации убегающих электронов в газах повышенного давления при пробое промежутков  $d$  с неоднородным распределением электрического поля  $E$  остается множество нерешенных вопросов. Результаты, полученные в различных работах, и используемые методики измерений существенно различаются, например спектры электронов, полученные в работах [1,10]. Тогда как знание энергетического спектра электронного пучка позволяет не только определять механизм генерации убегающих электронов в газовом диоде, но и является одним из важных параметров СЛЭП при его практическом применении.

Цель данной работы — исследовать влияние давления азота и конструкции катода на распределение электронов по энергиям.

Эксперименты проводились на газовом диоде, на который подавались импульсы напряжения от генератора СЛЭП-150 с дополнительной передающей линией [1,6]. В данной работе использовались коллекторы с диаметром приемной части 5 и 9 мм. Генератор СЛЭП-150 формировал импульсы напряжения с амплитудой падающей волны в передающей линии  $\sim 140$  кВ и фронтом  $\sim 0.3$  нс. Длительность импульса напряжения на полувывоте составляла  $\sim 1$  нс. Анод был выполнен из Al-фольги толщиной 10  $\mu$ м. В ряде экспериментов в качестве анода использовалась сетка с прозрачностью 64%. В качестве катода применялась фольга из нержавеющей стали толщиной 100  $\mu$ м, свернутая в трубку диаметром 6 мм, или стальной шар диаметром 9.5 мм. Межэлектродный зазор с трубчатым катодом равнялся 12 мм, а со сферическим 4 мм. При данных зазорах для используемых катодов за фольгой при атмосферном давлении азота и воздуха регистрировались наибольшие амплитуды тока пучка, которые при атмосферном давлении воздуха и длительности импульса тока пучка на полувывоте  $\sim 100$  пс превышали 10 А. При уменьшении давления амплитуда тока пучка возрастала более чем на порядок. Передающая линия генератора была заполнена трансформаторным маслом и имела длину 13.3 см. Емкостные делители были установлены на расстоянии 18.3 и 9 см от плоскости анода и регистрировали импульсы напряжения  $U_1$  и  $U_2$  соответственно. Для регистрации импульсов напряжения с емкостных делителей и коллекторов применялся осциллограф DPO70604 (6 GHz, 25 GS  $\cdot$  s<sup>-1</sup>), который для защиты от наводок помещался в экран-комнату. Длина измерительных



**Рис. 1.** Фотографии с экрана осциллограмм импульсов напряжения с емкостных делителей напряжения ( $U_1$  и  $U_2$ ), тока электронного пучка ( $i_e$ ) и суммы тока электронного пучка и тока смещения ( $i_e + i_c$ ). Коллектор с приемной частью диаметром 5 мм. Трубоччатый катод. Масштабы:  $i_e$  — 0.008 A/div;  $U_1$  — 32.4 kV/div;  $U_2$  — 30.4 kV/div; 400 ps/div.

кабелей составляла  $\sim 1.3$  м. Для ослабления электрических сигналов применялись аттенюаторы 142-NM фирмы Varth Electronics.

Осциллограммы импульсов напряжения с двух датчиков, а также тока пучка за фольгой с коллектора диаметром приемной части 5 мм показаны на рис. 1, а. Осциллограмма  $U_1$  в течение времени  $t \sim 1.2$  ns от начала сигнала соответствует падающей волне напряжения, а осциллограмма  $U_2$  в течение времени  $t \sim 400$  ps от начала сигнала соответствует падающей волне, а затем — наложению падающей и отраженной волны напряжения. Используя эти осциллограммы, мы восстанавливали напряжение на промежутке при различных давлениях в газовом диоде и различных катодах. Примеры восстановленных ос-

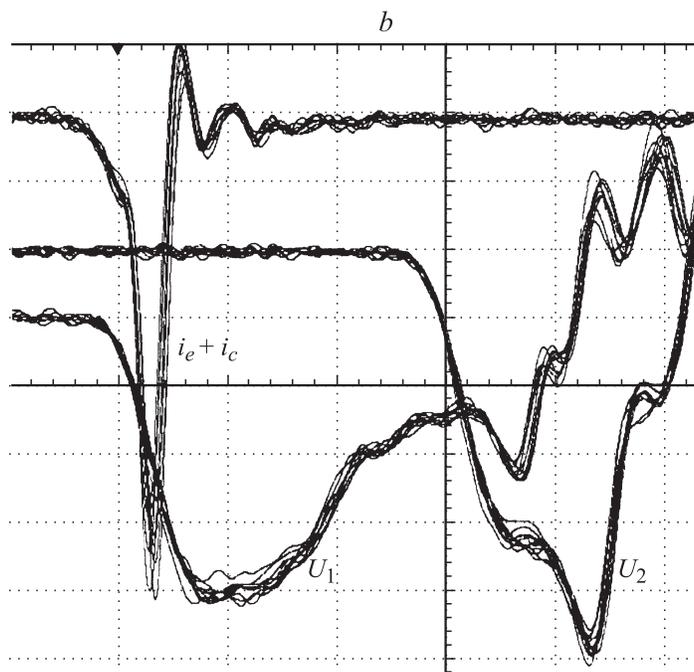


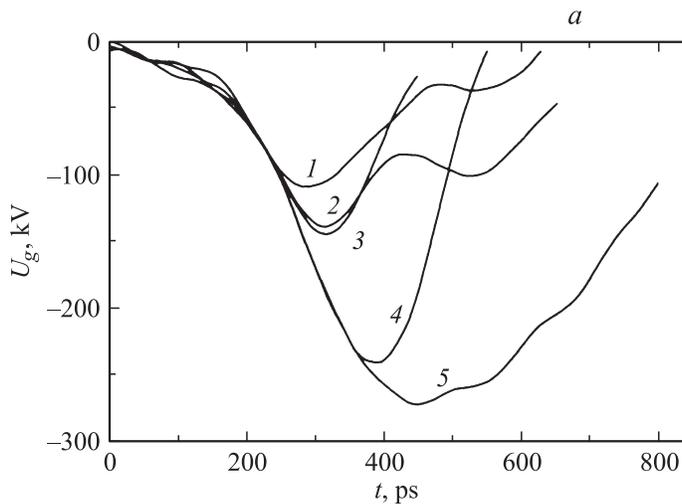
Рис. 1 (продолжение).

циллограмм приведены на рис. 2, *a* и *b*. Длительность восстановленных импульсов напряжения из-за влияния отражений от начала передающей линии не превышала 0.8 ns. Однако этого было достаточно для анализа условий генерации пучка убегающих электронов. Длительность тока пучка, а также задержка до его максимального значения от фронта импульса напряжения на уровне 0.1 были меньше 0.8 ns (рис. 2, *b*). Осциллограммы тока пучка и напряжения, приведенные на рис. 1, *a* и *b*, не синхронизованы во времени, но они привязаны друг к другу с точностью не хуже 10 ps.

Для синхронизации импульсов напряжения и тока пучка мы использовали ток смещения, который при замене фольги на сетку в тех же условиях регистрировался коллектором. На рис. 1, *b* приведены осциллограммы импульсов напряжения с датчиков, установленных в пе-

редающей линии, и тока пучка вместе с током смещения. Замена фольги (рис. 1, *a*) на сетку (рис. 1, *b*) не влияла на привязку осциллограмм импульсов напряжения к току пучка. Как показали наши исследования, совмещая начало емкостного тока и импульса напряжения, можно с высокой точностью определить время генерации тока пучка. Задержка генерации тока пучка и его амплитуда при стабильных импульсах напряжения и тренировке трубчатого катода слабо меняется от импульса к импульсу. На рис. 1, *b* показано наложение 10 импульсов, одновременно записанных на трех каналах осциллографа. Отметим, что величина тока смещения зависит не только от прозрачности сетки,  $dU/dt$  и скорости движения фронта волны ионизации в промежутке, но и от размеров ячеек сетки. При малых размерах ячейки вклад емкостного тока в амплитуду тока пучка очень мал и не регистрируется коллектором. При использовании редкой сетки он может превышать по амплитуде ток пучка.

Спектры электронов определялись с помощью времяпролетного спектрометра, который устанавливался после анодной фольги (конструкция спектрометра приведена в [1]). Ток пучка электронов измерялся коллектором на расстоянии 23 мм от фольги и на расстоянии 99 мм. Во втором случае пучок транспортировался в продольном магнитном поле с величиной индукции  $\sim 0.06$  Т, создаваемом самарий-кобальтовыми магнитами. Область дрейфа электронов пучка между коллектором и фольгой откачивалась форвакуумным насосом. Вывод пучка электронов в дрейфовую камеру спектрометра осуществлялся через диафрагму диаметром 5 мм, которая устанавливалась на оси газового диода. В данных экспериментах использовался коллектор диаметром 9 мм. Распределения электронов по энергиям (характерные точки) определялись в воздухе атмосферного давления и в азоте при давлениях от 0.1 до 760 Торг. На рис. 2, *c* приведены осциллограммы  $U_2$  для импульсов тока пучка, зарегистрированных коллектором на расстоянии 23 и 99 мм от анодной фольги при давлении азотом в газовом диоде 15 Торг. Импульсы тока пучка до и после дрейфовой камеры получены при разных импульсах напряжения, поэтому при анализе задержек мы использовали импульсы тока пучка с близкими по форме и амплитуде импульсами напряжения (рис. 2, *c*). Импульсы тока пучка и импульсы напряжения в каждой паре осциллограмм привязаны друг к другу с точностью не хуже 10 ps. Это позволило по задержке между максимумами  $i_{e-1}$  и  $i_{e-2}$ , а также между максимумом  $i_{e-1}$  и



**Рис. 2.** *a* — восстановленное напряжение на разрядном промежутке для давлений азота 105 (1), 760 (2), 30 (3), 15 (4) и 3.8 (5) Торг. Трубчатый катод. *b* — восстановленные напряжения на разрядном промежутке  $U_{g-1}$  и  $U_{g-2}$  при давлении азота 760 Торг и ток электронного пучка  $i_e$ , синхронизированный с напряжением  $U_{g-2}$ . Катод — шар. *c* — осциллограммы импульсов напряжения  $U_{2-1}$  и  $U_{2-2}$  и импульсов тока пучка, зарегистрированных коллектором на расстоянии 23 мм ( $i_{e-1}$ ) и 99 мм ( $i_{e-2}$ ) от анодной фольги при давлении азота в газовом диоде 15 Торг. Задержки между  $U_{2-1}$  и  $i_{e-1}$ , а также между  $U_{2-1}$  и  $i_{e-1}$ , обусловленные регистрационными трактами, одинаковы. Трубчатый катод.

несколькими точками на спаде импульса  $i_{e-2}$ , определять время пролета электронов с различными скоростями. Далее по известной формуле

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} - m_0 c^2,$$

где  $\beta = v/c$ ,  $m_0$  — масса покоя электрона,  $v$  — скорость электрона,  $c$  — скорость света, рассчитывалась энергия электронов с данной задержкой. Отметим, что данная методика позволяла установить энергию электронов в основных группах, но не имела достаточной точности при данной системе регистрации, чтобы определить распределение электронов внутри групп. Однако проведенные исследования позволили

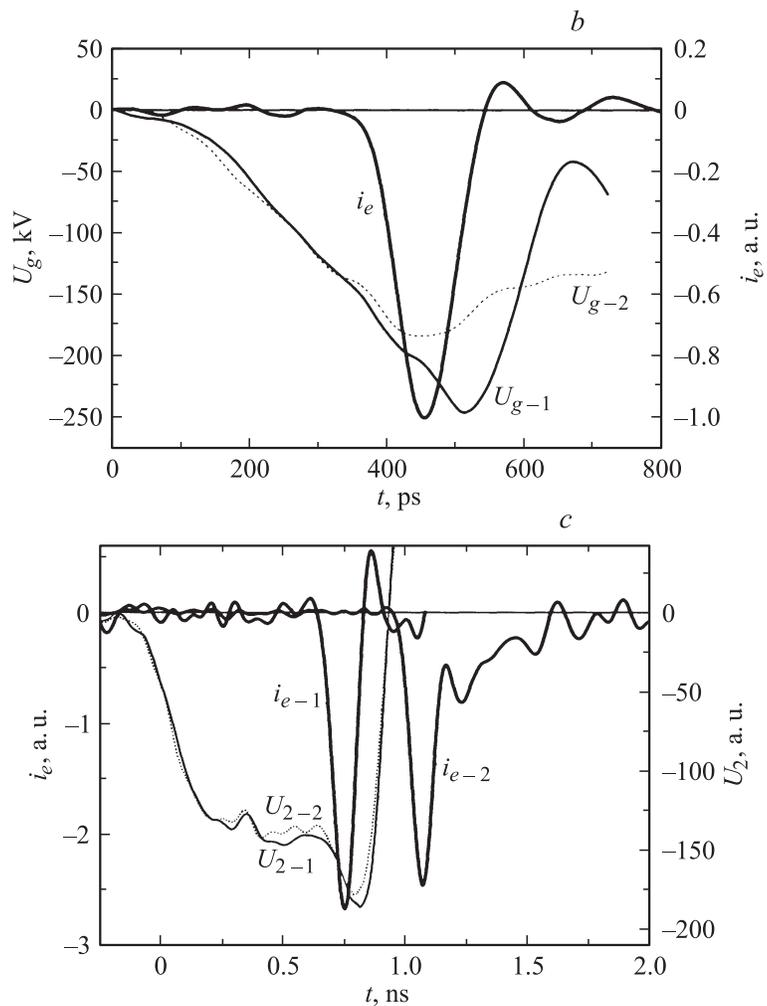
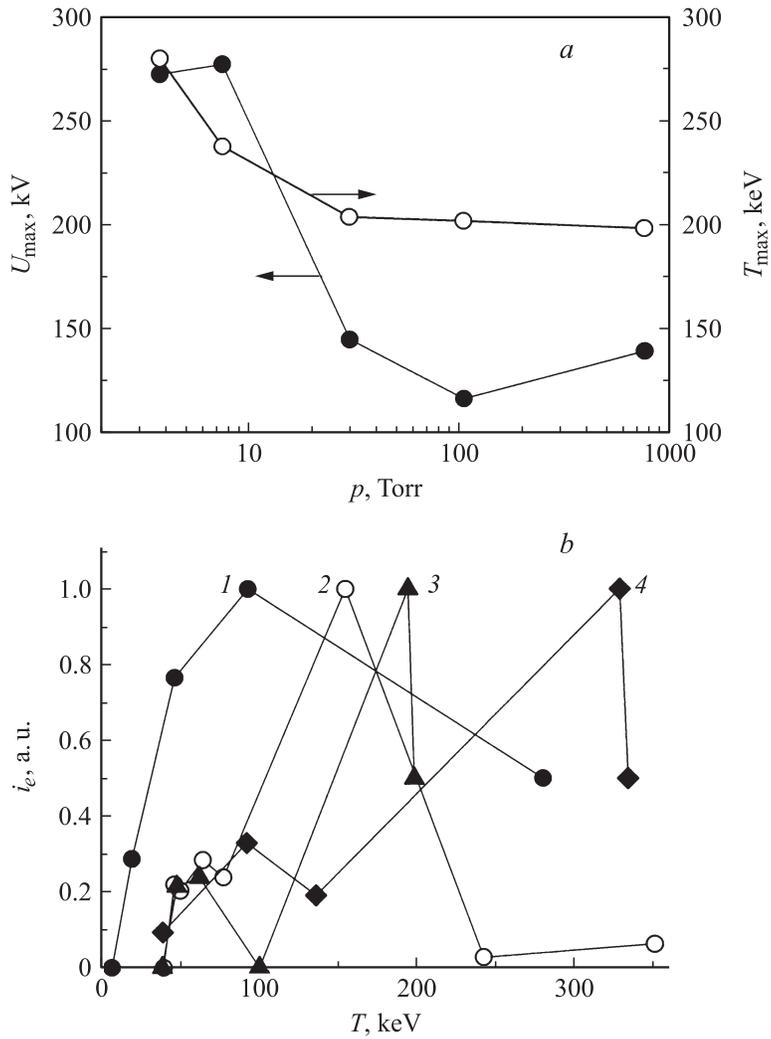


Рис. 2 (продолжение).

установить влияние давления азота на энергию электронов, которая соответствует максимальным и минимальным амплитудам тока пучка после пролета спектрометра. Как видно из рис. 2, с, после прохождения



**Рис. 3.** *a* — зависимости максимальной энергии электронов  $T_{\max}$  и максимального напряжения  $U_{\max}$  на разрядном промежутке газового диода для трубчатого катода. *b* — спектры электронов пучка для давлений азота 3.8 (1), 760 (2), 760 (3) и 15 (4) Torr. 1, 3, 4 — трубчатый катод; 2 — катод-шар.

дрейфовой камеры времяпролетного спектрометра форма тока пучка изменялась. Однако фронт импульса тока пучка практически не изменялся в широком диапазоне давлений (от 760 до  $\sim 10$  Torr). При этих давлениях регистрировался основной пик тока пучка с длительностью на полувысоте  $\sim 100$  ps, за которым наблюдался минимум (рис. 2, *c*). При давлениях менее 10 Torr этот минимум исчезал. Максимальные энергии электронов для трубчатого катода, определенные по задержке, вносимой пролетным спектрометром, и максимальные напряжения на промежутке (примеры на рис. 2, *a*) приведены на рис. 3. Полученные данные показывают, что напряжения пробоя газового диода  $U_g$  минимальны при давлениях азота  $\sim 100$  Torr и что максимальные  $U_g$  регистрируются при малых давлениях азота. Максимальные энергии электронов  $T_{\max}$  при малых давлениях примерно соответствуют максимальным  $U_g$ . При давлениях азота 30 Torr и более  $T_{\max}$  начинает несколько превышать энергию, соответствующую  $U_g$  на промежутке. Более значительное увеличение  $T_{\max}$  относительно энергии  $eU_g$  было получено при использовании сферического катода. При  $U_g \sim 200$  kV (рис. 2, *b*, кривая  $U_{g-2}$ ) энергия зарегистрированных с помощью времяпролетного спектрометра электронов достигала  $\sim 350$  keV (рис. 3, *b*, зависимость 2). Полученные спектры существенно отличаются от приводимых в работах Л.П. Бабича (см. [10] и ссылки в [10]). Отметим, что максимальное напряжение на промежутке при сферическом катоде существенно меняется от импульса к импульсу. В ряде опытов были зарегистрированы импульсы напряжения (см.  $U_{g-1}$  на рис. 2, *b*) с большей амплитудой и более узким спектром электронов.

Таким образом, проведенные исследования показали, что при трубчатом катоде из фольги и межэлектродном зазоре 12 mm минимальное напряжение пробоя промежутка наблюдается при давлении азота  $\sim 100$  Torr. При давлениях азота более 30 Torr максимальная энергия электронов становится больше, чем  $eU_g$ . Это увеличение  $T_{\max}$  можно объяснить влиянием фронта волны ионизации на ускорение части электронов. При малых давлениях азота  $T_{\max}$  примерно соответствуют  $U_g$ .

Авторы благодарят Е.Х. Бакшт за помощь в работе.

Работа выполнена при поддержке ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“, ГК № 02.740.11.0562 и РФФИ, грант № 09-08-00030-а.

## Список литературы

- [1] *Tarasenko V.F., Baksht E.K., Burachenko A.G.* и др. // *Plasma Devices and Operation*. 2008. V. 16. N 4. P. 267–298.
- [2] *Chaparro J.E., Justis W., Krompholz H.G.* et al. // *IEEE Transaction of Plasma Science*. 2008. V. 36. N 5. P. 2505–2511.
- [3] *Dwyer J.R., Saleh Z., Rassaoul H.K.* et al. // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. D23207 (12 p.).
- [4] *Ретин Б.П., Ретьев А.Г.* // *ЖТФ*. 2008. Т. 78. В. 1. С. 78–85.
- [5] *Карелин В.И., Тренькин А.А.* // *Письма в ЖТФ*. 2009. Т. 35. В. 9. С. 37–43.
- [6] *Tarasenko V.F., Baksht E.Kh., Burachenko A.G.* et al. // *IEEE Transaction Plasma Science*. 2009. V. 37. N 6. P. 832–838.
- [7] *Мастюгин Д.С., Осипов В.В., Соломонов В.И.* // *Письма в ЖТФ*. 2009. Т. 35. В. 11. С. 10–17.
- [8] *Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф., Бакиит Е.Х.* и др. // *Письма в ЖТФ*. 2009. Т. 35. В. 21. С. 79–87.
- [9] *Nguyen C.V., van Deursen A.P.J., van Heesch E.J.M.* et al. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2010. V. 43. 025202 (4 p).
- [10] *Бабич Л.П., Лойко Т.В.* // *Физика плазмы*. 2010. Т. 36. В. 3. С. 287–294.
- [11] *Тарасенко В.Ф., Бакиит Е.Х., Бураченко А.Г.* и др. // *Письма в ЖТФ*. 2010. Т. 36. В. 4. С. 60–67.
- [12] *Костыря И.Д., Бакиит Е.Х., Тарасенко В.Ф.* // *ПТЭ*. 2010. № 4. С. 84–87.
- [13] *Яландин М.И., Реутова А.Г., Шарыпов К.А.* и др. // *Письма в ЖТФ*. 2010. Т. 36. В. 18. С. 1–9.